



DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MER ET DE L'AQUACULTURE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

LEHBIB Mohamed

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN HYDROBIOLOGIE MARINE ET CONTINENTALE

Spécialité: Ressources halieutiques

THÈME

Cartographie et analyse de l'indice de chaleur par la télédétection de la température de surface du sol (*LST*) et de la mer (*SST*) dans la zone littorale et marine ouest de Mostaganem.

Soutenue le 15/06/2026

DEVANT LE JURY

Président	MEZALI Karim	Professeur	U. Mostaganem
Encadreur	FARAH Tahar	MCB	U. Mostaganem
Examineur	BENZAÏT Hocine	MCB	U. Mostaganem

Année universitaire 2025/2026

Dédicace

وَأَخِرُ دَعْوَاهُمْ أَنْ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices silencieux et leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours.

À mon grand frère, l'ingénieur **Moctar Esalem Lehbib**, modèle de persévérance et de réussite, dont l'exemple m'a toujours inspiré et guidé sur le chemin de l'excellence et du savoir.

À mes frères et sœurs, pour leur présence, leur encouragement et leur confiance.

À tous les enseignants de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, qui ont forgé ma formation et éveillé ma curiosité scientifique.

À mes amis et collègues de promotion, pour les moments partagés, les doutes surmontés ensemble et les souvenirs que je garderai.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont cru en moi et m'ont encouragé à aller jusqu'au bout.

Je dédie ce modeste travail.

Mohamed Lehbib

Remerciements

Avant tout, je remercie Allah, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la santé, la volonté et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent en premier lieu à mon encadreur, **Dr. FARAH Tahar**, Maître de Conférences à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, sa rigueur scientifique et la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de cette expérience.

Je remercie vivement les membres du jury, Pr. **MEZALI Karim** (président) et Dr. **BENZAÏT Hocine** (Examineur), pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail et pour le temps qu'ils y ont consacré.

J'exprime ma reconnaissance à l'ensemble du corps enseignant du Département des Sciences de la Mer et de l'Aquaculture de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, pour la qualité de la formation dispensée et les connaissances transmises tout au long de mon cursus universitaire.

J'adresse également mes remerciements à mon grand frère, l'ingénieur **Moctar Esalem Lehbib**, pour son soutien moral constant, ses encouragements et ses précieux conseils qui m'ont accompagné tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont aussi à ma famille, en particulier à mes parents, pour leur amour, leur patience et leurs sacrifices qui ont rendu possible l'aboutissement de ce parcours.

Enfin, je remercie tous mes collègues et amis de promotion pour l'entraide, la solidarité et les moments inoubliables partagés durant ces années d'études.

À tous, j'exprime ma sincère reconnaissance.

Résumé

La recherche porte sur l'application d'une approche géomatique sur l'imagerie spatiale pour cartographier et analyser l'indice de chaleur et de fraîcheur au niveau de la zone marine et littorale ouest de Mostaganem (Nord-ouest Algérie). La période d'observation a durée mois (janvier à mai 2026). Durant cette période, nous avons utilisé cinq (5) images thermiques acquises entre le mois de janvier et mai 2026 par les capteurs *STSTR* (Sentinel-3) et *TIRS* (Landsat-8/9). Le traitement des images a nécessité de redimensionner la taille des images, corriger l'effet de l'atmosphère, récupérer la température de surface enregistrée par les capteurs et la convertir en degrés Celsius. Ces méthodes de télédétection combinées aux SIG ont permis de réaliser une carte d'occupation du sol selon le modèle *Corine Land Cover* regroupant quinze (15) classes thématiques, où les forêts (40 %), les zones artificialisées (37 %) et les terres agricoles (22 %) dominent la zone continentale. L'indice de végétation (*NDVI*) a montré que 56 % de la zone littorale est couverte par une surface végétale contre 44 % par une surface minérale. Sur le plan bathymétrique, le fond marin varie entre 0 et -94 m, dont 85 % de la surface marine est situé entre -80 et -94 m de profondeur. Cinq (5) cartes mensuelles de températures de surfaces marines et continentales ont ainsi été réalisées. Les cartes ont montrés que la température moyenne est passée de 13,82 °C en janvier à 19,87 °C en mai 2026, ce qui correspond à une variation mensuelle d'environ 1,21 °C. La moyenne de *SST* marine (17,10 °C) est inférieure à celle de la *LST* terrestre (17,12 °C) à cause de la grande variabilité d'émissivité des surfaces continentales. La télédétection s'est montrée efficace, rapide et spatiale ou globale dans la cartographie et la surveillance de l'îlot de chaleur et de fraîcheur. Nos résultats ont permis de réaliser une cartographie spatiotemporelle de la température de surface qui y était limitée classiquement à la limite ponctuelle de la station météorologique. Nos résultats demeurent utiles dans l'aménagement et la gestion durables des zones marines et continentales.

Mots clés : îlots de chaleur, télédétection thermique; surface marine et continentale ; Mostaganem.

Abstract

This research focuses on applying a geomatics approach to satellite imagery to map and analyze the heat and coolness index in the western marine and coastal zone of Mostaganem (northwestern Algeria). The observation period lasted six months (January to May 2026). During this period, we used five (5) thermal images acquired between January and May 2026 by the STSTR (Sentinel 3) and TIRS (Landsat 8/9) sensors. Image processing involved resizing the images, correcting for atmospheric effects, retrieving the surface temperature recorded by the sensors, and converting it to degrees Celsius. These remote sensing methods, combined with GIS, made it possible to produce a land cover map based on the *Corine Land Cover* model comprising fifteen (15) thematic classes, with forests (40%), built-up areas (37%) and agricultural land (22%) dominating the continental zone. The vegetation index (*NDVI*) showed that 56% of the coastal zone is covered by vegetated surfaces compared to 44% by mineral surfaces. Bathymetrically, the seabed ranges from 0 to -94 m, with 85% of the marine area lying between -80 and -94 m depth. Five (5) monthly maps of marine and land surface temperatures were thus produced. The maps showed that the average temperature rose from 13.82°C in January to 19.87°C in May 2026, corresponding to a monthly variation of approximately 1.21°C. The average sea surface temperature (17.10°C) is lower than the average land surface temperature (17.12°C) due to the high variability in the emissivity of land surfaces. Remote sensing has proven to be effective, rapid, and spatially comprehensive in mapping and monitoring heat islands and cool islands. Our results have enabled the creation of a spatiotemporal map of surface temperature, which was traditionally limited to the specific location of the weather station. Our results remain useful for the sustainable planning and management of marine and terrestrial areas.

Keywords: heat islands, thermal remote sensing; marine and land surfaces; Mostaganem.

ملخص الى اللغة العربية

تتناول هذه الدراسة تطبيق نهج الجيوماتيک على الصور الفضائية لرسم خرائط مؤشر الحرارة والبرودة وتحليله في المنطقة البحرية والساحلية الغربية لمستغانم (شمال غرب الجزائر). استمرت فترة المراقبة لمدة خمسة أشهر (من يناير إلى مايو 2026). وخلال هذه الفترة، استخدمنا خمس (5) صور حرارية تم التقاطها بين شهري يناير ومايو 2026 بواسطة مستشعرات STSTR TIRS (Landsat 8/9 و Sentinel 3)

تطلبت معالجة الصور تغيير حجمها، وتصحيح تأثير الغلاف الجوي، واستخلاص درجة حرارة السطح المسجلة بواسطة أجهزة الاستشعار وتحويلها إلى درجات مئوية. وقد سمحت طرق الاستشعار عن بُعد هذه، مقترنةً بنظم المعلومات الجغرافية، بإنجاز خريطة لاستخدام الأراضي وفق نموذج Corine Land Cover تضم خمس عشرة (15) فئة موضوعية، حيث تسيطر الغابات (40%) والمناطق العمرانية (37%) والأراضي الزراعية (22%) على المنطقة القارية. كما أظهر مؤشر الغطاء النباتي (NDVI) أن 56% من المنطقة الساحلية مغطاة بسطح نباتي مقابل 44% بسطح معدني. ومن الناحية البحرية، تراوحت أعماق قاع البحر بين 0 و-94 م، حيث تقع 85% من المساحة البحرية بين -80 و-94 م عمقاً. وقد سمحت هذه الطرق أيضاً بإنجاز خمس (5) خرائط لدرجات حرارة الأسطح البحرية والبرية. وأظهرت الخرائط أن متوسط درجة الحرارة ارتفع من 13,82 درجة مئوية في يناير إلى 19,87 درجة مئوية في مايو 2026، وهو ما يعادل تبايناً شهرياً يبلغ حوالي 1,21 درجة مئوية

يقل متوسط درجة حرارة سطح البحر (17,10 درجة مئوية) عن متوسط درجة حرارة سطح الأرض (17,12 درجة مئوية) بسبب التباين الكبير في معامل الانبعاثية للأسطح القارية. وقد أثبتت تقنية الاستشعار عن بعد فعاليتها وسرعتها ونطاقها المكاني أو الشامل في رسم خرائط ومراقبة جزر الحرارة والبرودة. وقد مكنتنا نتائجنا من وضع خريطة زمانية ومكانية لدرجة حرارة السطح التي كانت تقتصر في العادة على النطاق المحدود لمحطة الأرصاد الجوية. وتظل نتائجنا مفيدة في التخطيط والإدارة المستدامين للمناطق البحرية والبرية

الكلمات المفتاحية: جزر الحرارة، الاستشعار الحراري عن بُعد؛ السطح البحري والبري؛ مستغانم.

Table des matières

1	Chapitre 1 : Synthèse bibliographique.....	1
1.1	Introduction.....	1
1.2	Définition	1
1.3	Différents types de températures	1
1.3.1	Température de surface	1
1.3.1.1	Rôles de la TST	2
1.3.2	Température de surface de la mer	2
1.3.2.1	Rôles de la TSM	2
1.3.3	Température de l'air.....	3
1.4	Facteurs influençant la température	5
1.4.1	Surfaces végétales naturelles	5
1.4.2	Surfaces minérales	5
1.4.3	Milieu environnant.....	5
1.5	Méthodes de mesures de la température	6
1.5.1	Méthodes in situ	6
1.5.2	Méthodes de la télédétection.....	6
1.5.2.1	Télédétection multispectrale	6
1.5.2.2	Télédétection thermique	6
1.5.2.3	Concepts généraux de la télédétection.....	7
1.5.2.4	Interaction du REM avec l'atmosphère	7
1.5.2.5	Fenêtres atmosphériques.....	7
1.5.2.6	Méthodes de prétraitement des images satellites.....	9
1.5.2.7	Imageries thermiques.....	10
1.5.2.8	Types de capteurs de mesures de TST et TSM.....	11
1.5.2.9	Capteur de Sentinel-3.....	11
1.5.2.10	Capteurs Landsat	12
1.5.2.11	Capteurs complémentaires.....	13

1.5.2.12	Caractéristiques techniques des capteurs thermiques	14
1.5.2.13	Intérêts des capteurs thermiques	15
1.5.2.14	Avantages de la télédétection thermique	16
1.5.2.15	Prétraitements d'images satellites.....	18
1.5.2.16	Chaîne logicielle de traitements d'images satellites	30
1.6	Analyse de la TST et de la TSM.....	32
1.6.1	Analyse descriptive et cartographique	32
1.6.2	Analyse de l'îlot de chaleur	33
1.6.3	Analyse des tendances temporelles.....	33
1.6.4	Relations avec <i>NDVI</i> , albédo et MNT	33
1.6.5	Modélisation de la TST et de la <i>TSM</i>	33
1.6.5.1	Analyse spatio-temporelle	33
1.6.6	Limites de la télédétection	34
1.7	Conclusion	35
2	Chapitre 2. Matériels et méthodes	36
2.1	Présentation de la zone d'étude	36
2.1.1	Localisation géographique	36
2.1.2	Géomorphologie de la zone d'étude	37
2.1.2.1	Zone marine	37
2.1.2.2	Géologie.....	37
2.1.2.3	Zone continentale.....	38
2.1.2.4	Géologie.....	38
2.1.2.5	Réseau hydrographique	39
2.1.2.6	Implications pour l'étude thermique	39
2.1.3	Climat.....	40
2.1.3.1	Données thermiques.....	40
2.1.3.2	Données hydriques.....	41
2.1.3.3	Relation entre les données climatiques.....	41

2.1.3.4	Conclusion sur le climat	42
2.2	Approche méthodologique utilisée	42
2.2.1	Levé topographique.....	42
2.2.2	Occupation du sol.....	43
2.2.3	Etude du climat	43
2.2.3.1	Correction radiométrique	45
3	Chapitre 3. Résultats et discussions	49
3.1	Analyse des résultats topographiques	49
3.1.1	Relief.....	50
3.1.1.1	Zone marine	51
3.1.1.2	Zone continentale (littoral)	51
3.1.2	Conclusion sur le milieu physique	54
3.2	Analyse des résultats thématiques	54
3.2.1	Occupation du sol.....	54
3.2.1.1	Milieu végétal (naturel)	56
3.2.2	Climat.....	58
3.2.2.1	Variation mensuelle de la <i>SST</i> et <i>LST</i>	68
3.2.2.2	Répartition spatiotemporelle de <i>SST</i>	69
3.2.2.3	Répartition spatiotemporelle de <i>LST</i>	69
3.3	Discussions	70
4	Conclusion générale.....	71
4.1	Recommandations.....	71

Références bibliographiques

Liste des figures

Figure 1: Image de SST en °C acquise en date du 30/01/2026 par le capteur <i>STSTR</i> du Sentinel-3.	46
Figure 2: Image de <i>LST</i> en °C acquise en date du 30/01/2026 par le capteur <i>STSTR</i> du Sentinel-3.	46
Figure 3 : Image de SST et <i>LST</i> en °C acquise en date du 22/02/2026 par le capteur thermique <i>TIRS</i> du Landsat-8.....	47
Figure 4: Image de SST et <i>LST</i> en °C acquise en date du 22/02/2026 par le capteur thermique <i>TIRS</i> du Landsat-8.....	47
Figure 5 : Localisation géographique de la zone d'étude. Conception : (Farah & Lehbib©2026). ...	49
Figure 6: Carte hypsométrique (sous marine et terrestre) de la zone d'étude. Conception : (Farah & Lehbib©2026).....	50
Figure 7 : Carte des pentes du terrain (continentale). Conception : (Farah & Lehbib©2026).	52
Figure 8: Carte d'expositions du terrain (continentale). Conception : (Farah & Lehbib©2026).	53
Figure 9 : Occupation du sol de la zone d'étude. Conception : (Farah & Lehbib©2026).....	55
Figure 10: Indice de végétation (IV) de la zone d'étude. Conception : (Farah & Lehbib©2026).....	57
Figure 11 : Carte de SST et <i>LST</i> (13/01/2026) de la zone. Conception : (Farah & Lehbib©2026). ..	59
Figure 12: Carte de SST et <i>LST</i> (22/02/2026) de la zone. Conception : (Farah & Lehbib©2026). ...	61
Figure 13 : Carte de SST et <i>LST</i> (29/03/2026) de la zone. Conception : (Farah & Lehbib©2026). ..	63
Figure 14: Carte de SST et <i>LST</i> (29/04/2026) de la zone. Conception : (Farah & Lehbib©2026). ...	65
Figure 15: Carte de SST et <i>LST</i> (25/05/2026) de la zone. Conception : (Farah & Lehbib©2026). ..	67

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques techniques des capteurs de satellites utilisés dans l'estimation de la TST et de la TSM (d'après Benmecheta, 2016 ; Sakhy et <i>al.</i> , 2011).....	14
Tableau 2: Caractéristiques techniques de quelques capteurs thermiques de mesures de TST et TSM d'après (Price; 1984 ; Wan; 2002 ; Wulder; 2021 ; Merchant; 2014 ; Sentinel; 2016 ; Schmetz; 2002)	14
Tableau 3 : Synthèse des prétraitements (d'après Teteka Mutondo et al., 2020 ; Jeevalakshmi & Narayana Reddy, 2017 ; Benmecheta, 2016 ; Galve et al., 2022 ; Marchal et al., 2022 ; Kshetri & Dahal, 2024).....	23
Tableau 4: Comparaison entre méthodes SC et SW (d'après Benmecheta, 2016 ; Galve et al., 2022).	29
Tableau 5: Synthèse comparative des chaînes logicielles pour le traitement d'images thermiques (d'après Benmecheta, 2016 ; ITT, 2007 ; ESA, 2021 ; Kshetri & Dahal, 2024 ; GeeksforGeeks, 2024 ; Zhang et al., 2020 ; Gorelick).	32
Tableau 6 : Liste des images satellites utilisées dans l'étude.	44
Tableau 7 : Répartition spatiotemporelle des surfaces de SST et LST.	60
Tableau 8 : Répartition spatiotemporelle des surfaces de SST et LST.	62
Tableau 9 : Répartition spatiotemporelle des surfaces de SST et LST.	64
Tableau 10 : Répartition spatiotemporelle des surfaces de SST et LST.	66
Tableau 11 : Répartition spatiotemporelle des surfaces de SST et LST.	68
Tableau 12 : Variation spatiotemporelle de SST et LST entre le mois de janvier et mai 2026 (5 mois).....	68
Tableau 13: Variation spatiotemporelle de SST entre le mois de janvier et mai 2026 (5 mois).	69
Tableau 14 : Variation spatiotemporelle de LST entre le mois de janvier et mai 2026 (5 mois).	69

Liste des abréviations

Abréviation	Signification en anglais	Signification en français
AMSR	Advanced Microwave Scanning Radiometer	Radiomètre avancé à balayage micro-ondes
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer	Radiomètre spatial avancé d'émission thermique et de réflexion
ATSR	Along Track Scanning Radiometer	Radiomètre à balayage le long de la trace
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer	Radiomètre avancé à très haute résolution
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function	Fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle
CCI	Climate Change Initiative	Initiative sur le changement climatique
CLC	CORINE Land Cover	Occupation / couverture des sols
DEM	Digital Elevation Model	Modèle numérique d'élévation
DN	Digital Number	Nombre numérique / valeur numérique
EB	Energy Balance	Bilan énergétique
ENVI	Environment for Visualizing Images	Environnement de visualisation d'images
ESA	European Space Agency	Agence spatiale européenne
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus	Cartographe thématique amélioré Plus
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological	Organisation européenne pour l'exploitation des satellites
FLAASH	Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes	Analyse atmosphérique rapide en ligne de visée des hypercubes spectraux
GED	Global Emissivity Database	Base de données mondiale d'émissivité
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Oceans	Carte bathymétrique générale des océans
GHR SST	Group for High Resolution Sea Surface Temperature	Groupe pour la température de surface de la mer à haute résolution
GIS	Geographic Information System	Système d'information géographique
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite	Satellite géostationnaire opérationnel environnemental
GUI	Graphical User Interface	Interface graphique utilisateur
UHI	Urban Heat Island	Îlot de chaleur urbain
IR	Infrared	Infrarouge
ITT	ITT Visual Information Solutions	Solutions d'information visuelle ITT
VI	Vegetation Index	Indice de végétation

L-SBAC	Linearized Single Band Atmospheric Correction	Correction atmosphérique à canal unique linéarisée
LEO	Low Earth Orbit	Orbite terrestre basse
LOWTRAN	Low Resolution Atmospheric Transmittance and Radiance Code	Code de transmittance et de radiance atmosphériques à basse résolution
LST	Land Surface Temperature	Température de surface terrestre
MMD	Maximum-Minimum Difference	Différence maximum-minimum
DTM	Digital Terrain Model	Modèle numérique de terrain
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer	Spectroradiomètre imageur à résolution modérée
MODTRAN	Moderate Resolution Atmospheric Transmittance and Radiance Code	Code de transmittance et de radiance atmosphériques à résolution modérée
MSG	Meteosat Second Generation	Meteosat de seconde génération
MTL	Metadata File	Fichier de métadonnées
NARR	North American Regional Reanalysis	Réanalyse régionale nord-américaine
NASA	National Aeronautics and Space	Administration nationale de
NCEP	National Centers for Environmental Prediction	Centres nationaux de prévision environnementale
NDBI	Normalized Difference Built-up Index	Indice normalisé de différence du bâti
NDVI	Normalized Difference Vegetation	Indice de végétation par différence
NDWI	Normalized Difference Water Index	Indice d'eau par différence normalisée
NEM	Normalized Emissivity Method	Méthode d'émissivité normalisée
NESDIS	National Environmental Satellite, Data, and Information Service	Service national des satellites, des données et de l'information
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	Administration nationale océanique et atmosphérique
NPP	National Polar-orbiting Partnership	Partenariat national en orbite polaire
OI	Optimum Interpolation	Interpolation optimale
OLI	Operational Land Imager	Imageur terrestre opérationnel
ONCT	National Office of Cartography and	Office national de cartographie et de
OSTIA	Operational Sea Surface Temperature	Analyse opérationnelle de la température
NIR	Near Infrared	Proche infrarouge
QGIS	Quantum Geographic Information	Système d'information géographique
REM	Electromagnetic Radiation	Rayonnement électromagnétique
RMSE	Root Mean Square Error	Erreur quadratique moyenne
ROI	Region of Interest	Région d'intérêt
RTM	Radiative Transfer Model	Modèle de transfert radiatif
SAVI	Soil-Adjusted Vegetation Index	Indice de végétation ajusté au sol

SB	Single Band	Canal unique
SBAC	Single Band Atmospheric Correction	Correction atmosphérique à canal unique
SC	Single Channel	Canal unique
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land	Algorithme de bilan énergétique de surface pour les terres
GIS	Geographic Information System	Système d'information géographique
SLSTR	Sea and Land Surface Temperature Radiometer	Radiomètre de température de surface de la mer et des terres
SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity	Humidité des sols et salinité des océans
SNAP	Sentinel Application Platform	Plateforme d'application Sentinel
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission	Mission radar topographique de la navette spatiale
SST	Sea Surface Temperature	Température de surface de la mer
SVF	Sky View Factor	Facteur de vue du ciel
SW	Split Window	Fenêtre divisée
SWIR	Short-Wave Infrared	Infrarouge à courtes longueurs d'onde
TEB	Town Energy Balance	Bilan énergétique urbain
TES	Temperature–Emissivity Separation	Séparation température–émissivité
TIR	Thermal Infrared	Infrarouge thermique
TIRS	Thermal Infrared Sensor	Capteur infrarouge thermique
TM	Thematic Mapper	Cartographe thématique
TOA	Top Of Atmosphere	Sommet de l'atmosphère
SST	Sea Surface Temperature	Température de surface de la mer
LST	Land Surface Temperature	Température de surface terrestre
UTM	Universal Transverse Mercator	Projection universelle transverse de
USGS	United States Geological Survey	Service géologique des États-Unis
USTHB	University of Science and Technology	Université des Sciences et de la
VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer	Suite de radiomètres imageurs visible et
VNIR	Visible and Near Infrared	Visible et proche infrarouge
WGS	World Geodetic System	Système géodésique mondial

Introduction

Face aux défis croissants posés par les changements climatiques et l'intensification des phénomènes thermiques extrêmes, la surveillance et la cartographie des températures de surface s'imposent comme des enjeux scientifiques majeurs. Dans les zones côtières et marines, l'interaction entre le milieu continental et l'environnement océanique crée des dynamiques thermiques complexes dont la compréhension nécessite des outils d'observation à la fois précis et spatialement étendus.

Le littoral de la wilaya de Mostaganem, situé au nord ouest de l'Algérie, constitue un territoire particulièrement représentatif de ce genre d'enjeux. Sa façade maritime, ses reliefs variés et son tissu urbain en expansion offrent un cadre idéal pour l'étude des phénomènes d'îlots de chaleur et de fraîcheur, à la fois marins et terrestres. La coexistence de surfaces aux propriétés radiatives contrastées — mer ouverte, zones bâties, végétation naturelle et plans d'eau — engendre des gradients thermiques que seule la télédétection satellitaire permet de capter et enregistrer l'émission thermique à grande échelle et de manière répétée dans le temps.

La télédétection thermique, à travers l'exploitation des données acquises par les capteurs embarqués sur les satellites Sentinel-3 et Landsat-8, offre aujourd'hui des opportunités sans précédent pour mesurer simultanément la température de surface marine (SST) et continentale (LST). Ces deux variables, complémentaires et étroitement liées, constituent des indicateurs clés du bilan énergétique de surface et des échanges thermiques entre la terre, l'océan et l'atmosphère.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre présente étude, qui utilise une approche géomatique basée sur la télédétection thermique qui a permis de cartographier et analyser l'indice de chaleur et de fraîcheur enregistré à l'aide des capteurs spatiaux entre janvier et mai 2026 au niveau de la zone marine et littorale ouest de Mostaganem. Ce travail vise à caractériser la distribution spatiale et l'évolution temporelle de la SST et de la LST, à identifier les zones de chaleur et de fraîcheur et leurs déterminants géographiques, et à contribuer ainsi à une meilleure compréhension des dynamiques thermiques propres à cette zone côtière.

Pour mener à bien notre travail, nous avons planifié notre mémoire en trois chapitres. Le premier présente un rappel et une synthèse bibliographique portant sur les concepts fondamentaux liés aux températures de surface, aux méthodes de télédétection thermique et aux outils d'analyse spatio-temporelle. Le second décrit les caractéristiques générales de la zone d'étude en utilisant le matériel et les méthodes nécessaires. Le troisième a concerné la discussion et l'analyse des résultats obtenus, notamment les cartes thématiques (géomorphologie, occupation des sols et la SST et LST). A la fin, nous avons conclu notre étude par une conclusion générale en synthétisant les principaux enseignements et en proposant quelques recommandations jugées utiles à l'aménagement et la gestion durable de la zone d'étude.

1 Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

1.1 Introduction

Les paramètres climatiques sont des facteurs clés qui influencent les conditions de la planète à la fois à une échelle locale et globale. Parmi ceux-ci, la température et les précipitations jouent un rôle fondamental dans la détermination des conditions météorologiques et climatiques d'une région. La température, par exemple, détermine non seulement les cycles climatiques, mais aussi les processus biologiques et hydrologiques essentiels à la vie. Les précipitations, quant à elles, influencent directement la disponibilité de l'eau et l'humidité du sol, impactant les écosystèmes et les activités humaines. Ces deux paramètres interagissent de manière complexe et sont souvent étudiés conjointement pour mieux comprendre les phénomènes climatiques et leurs effets sur l'environnement (Benmechetta, 2016 ; Teteka Muutondo et *al.*, 2020).

1.2 Définition

La température est une mesure physique qui reflète l'énergie thermique d'un objet ou d'une substance. Elle est liée au mouvement des particules au sein de la matière, plus les particules bougent rapidement, plus la température est élevée. En météorologie, la température est une variable clé, mesurée par des instruments tels que les thermomètres, et est souvent exprimée en degrés Celsius (°C), Fahrenheit (°F) ou Kelvin (°K). La température joue un rôle crucial dans de nombreux processus naturels, de la circulation atmosphérique à la croissance des plantes et la gestion de l'eau. Elle est un facteur déterminant dans l'analyse des climats et est utilisée pour prévoir les conditions météorologiques, notamment dans le cadre des études climatiques et de la modélisation des changements climatiques (Wan & Dozier, 1996 ; Sakhy et *al.*, 2011).

1.3 Différents types de températures

1.3.1 Température de surface

La température de surface terrestre (TST) ou en anglais *Land surface Temperature (LST)* est la température radiométrique de la surface terrestre telle que déterminée indirectement par les détecteurs des satellites à partir de la radiation émise dans la région de l'infrarouge thermique. La TST est la température de la couche superficielle de la surface terrestre, également appelée « peau » de la surface, qui englobe les sols nus, la végétation, les surfaces bâties et les plans d'eau. La TST se différencie des températures in situ car elle prend en compte l'effet des propriétés radiatives de la surface et des conditions atmosphériques au moment de l'acquisition satellitaire (Benmechetta, 2016).

La TST se distingue de la température de l'air, qui est mesurée à une certaine hauteur standard de l'ordre de deux mètres au-dessus du sol.

1.3.1.1 Rôles de la TST

La TST est un élément essentiel dans l'analyse des échanges d'énergie entre la surface terrestre et l'atmosphère. Elle intervient directement dans le bilan d'énergie de surface, en influençant le rayonnement net, les flux de chaleur sensible et latente, ainsi que les processus d'évapotranspiration. Dans ce sens, la TST est un indicateur essentiel pour l'étude des dynamiques climatiques, hydrologiques et écologiques à différentes échelles spatiales (Benmecheta, 2016 ; Teteka Muutondo et *al.*, 2020).

Dans l'environnement urbain, la TST est couramment utilisée pour détecter et analyser les îlots de chaleur urbains de surface. Elle permet de souligner les contrastes de température entre les zones bâties et les zones végétalisées, et d'étudier leurs relations avec l'occupation du sol, la densité du bâti et la morphologie urbaine. Ces analyses sont essentielles pour l'aménagement urbain durable et la gestion des risques associés aux vagues de chaleur (Sakhy et *al.*, 2011).

1.3.2 Température de surface de la mer

La température de surface de la mer (TSM) appelée en anglais *Sea Surface Temperature (SST)* désigne la température de la surface de la mer. Elle est une variable essentielle pour les études océaniques et climatiques. La TSM se distingue de la TST par sa faible émissivité proche de l'unité et sa plus grande homogénéité spatiale, ce qui facilite son estimation par télédétection. À l'inverse, l'estimation de la TST est plus complexe en raison de la grande variabilité de son émissivité et de l'hétérogénéité des surfaces terrestres (Benmecheta, 2016 ; Sobrino et *al.*, 2008).

1.3.2.1 Rôles de la TSM

La TSM joue plusieurs rôles, parmi lesquels nous citons ce qui suit :

1. Influence sur les phénomènes climatiques mondiaux. La TSM joue un rôle essentiel dans les événements climatiques tels que *El Niño* et *La Niña*, qui sont associés à des variations de la TSM. Ces phénomènes peuvent entraîner des sécheresses, des inondations et des cyclones tropicaux, affectant ainsi les conditions climatiques mondiales (Donlon et *al.*, 2007),
2. Échanges d'énergie océan-atmosphère. Une TSM élevée entraîne une augmentation de l'évaporation de l'eau de mer, ce qui apporte de l'humidité dans l'atmosphère, favorisant la formation de nuages et de tempêtes, notamment des cyclones tropicaux (McClain et *al.*, 1985),

3. Circulation océanique. La TSM influence directement les courants marins qui régulent la circulation océanique et les échanges thermiques entre l'océan et l'atmosphère. Cela joue un rôle fondamental dans la régulation du climat à l'échelle mondiale (Benmecheta, 2016),
4. Modélisation et prévisions climatiques. La TSM est utilisée dans les modèles climatiques pour prévoir les tendances à long terme, permettant ainsi de mieux comprendre les changements climatiques et d'améliorer les systèmes de prévision météorologique (Sobrinho et *al.*, 2008),
5. Suivi des anomalies thermiques et des phénomènes océaniques. La TSM est un indicateur essentiel pour la détection des anomalies thermiques marines, comme les vagues de chaleur marines, qui ont des impacts importants sur les écosystèmes marins, la pêche et les courants océaniques (Walton, 1987),
6. Suivi des impacts environnementaux. La surveillance de la TSM permet de détecter les effets de la pollution thermique, l'acidification des océans, et les impacts des activités humaines sur les océans. Elle aide également à surveiller les risques associés aux phénomènes climatiques extrêmes et leur influence sur les écosystèmes marins (Donlon et *al.*, 2007).

En résumé ; La TST et la TSM sont donc des paramètres clés dans l'analyse des échanges d'énergie entre la surface et l'atmosphère, ainsi que dans l'étude des processus climatiques et environnementaux. Elles interviennent directement dans le bilan énergétique de surface, le cycle hydrologique, la dynamique climatique, l'urbanisation et les échanges océan-atmosphère (Oke, 1987 ; Wan & Dozier, 1996).

La TST dépend directement des propriétés thermiques et radiatives de la surface observée. Il en résulte que la TST a généralement une variabilité spatiale plus forte et des contrastes thermiques plus marqués que la température de l'air (Benmecheta, 2016).

1.3.3 Température de l'air

La température de l'air dépend principalement des conditions atmosphériques locales telles que le vent, l'humidité et la stratification thermique. Elle est mesurée conventionnellement à une hauteur standard de deux mètres au-dessus du sol, à l'aide de capteurs placés dans des abris météorologiques normalisés. Elle reflète les conditions thermiques de la couche atmosphérique de surface et dépend principalement de facteurs tels que le vent, l'humidité relative, la stratification thermique et les échanges de chaleur avec la surface sous-jacente. Contrairement à la TST, qui est une mesure radiative instantanée de la surface, la température de l'air intègre les effets de mélange turbulent et présente une variabilité spatiale plus faible. La différence entre ces deux grandeurs, appelée

contraste TST–température de l'air, constitue un indicateur important des échanges de chaleur sensible entre la surface et l'atmosphère (Benmecheta, 2016 ; Wan & Dozier, 1996).

La température de l'air est une variable météorologique fondamentale qui caractérise l'état thermique de la couche atmosphérique de surface. Elle est mesurée conventionnellement à une hauteur standard de deux mètres au-dessus du sol, à l'aide de thermomètres ou de capteurs électroniques placés dans des abris météorologiques normalisés (abris de Stevenson), afin d'éviter toute influence directe du rayonnement solaire et du sol (Oke, 1987). La température de l'air dépend de plusieurs facteurs interdépendants :

1. Le rayonnement solaire incident, qui constitue la principale source d'énergie chauffant la surface terrestre, laquelle réchauffe ensuite l'air par conduction et convection,
2. Les conditions atmosphériques locales, notamment le vent, l'humidité relative et la nébulosité, qui modulent les échanges thermiques entre la surface et l'atmosphère,
3. La stratification thermique de l'atmosphère, qui détermine la stabilité ou l'instabilité de la couche limite atmosphérique et conditionne le transport vertical de chaleur,
4. La nature de la surface sous-jacente, notamment son albédo, son émissivité et son humidité, qui influencent les flux de chaleur sensible et latente échangés avec l'atmosphère (Benmecheta, 2016).

La température de l'air se distingue fondamentalement de la TST sur plusieurs points. D'abord, la TST est une mesure radiative instantanée de la couche superficielle de la surface, tandis que la température de l'air reflète les conditions thermiques de la masse d'air au-dessus de cette surface, intégrant les effets de mélange turbulent. Ensuite, la TST présente généralement une variabilité spatiale plus forte et des contrastes thermiques plus marqués, notamment en milieu urbain où coexistent des surfaces à propriétés thermiques très différentes.

En télédétection, la température de l'air ne peut pas être mesurée directement par les capteurs satellitaires thermiques, qui enregistrent uniquement le rayonnement émis par la surface. Cependant, plusieurs études ont proposé des méthodes statistiques et physiques pour estimer la température de l'air à partir de la TST satellitaire, en exploitant la corrélation entre ces deux variables à différentes échelles spatiales et temporelles (Mostovoy et al., 2006 ; Zhu et al., 2013). Ces approches sont particulièrement utiles dans les zones où les stations météorologiques sont peu nombreuses ou inexistantes, comme les régions arides, côtières ou montagneuses.

1.4 Facteurs influençant la température

La variabilité de TST et TSM est régie par un ensemble de facteurs physiques, environnementaux, et atmosphériques. Ces facteurs interviennent de manière différenciée en fonction des surfaces étudiées, expliquant ainsi les contrastes thermiques relevés par les capteurs des satellites (Benmecheta, 2016).

1.4.1 Surfaces végétales naturelles

La température de surface des milieux végétalisés naturels sont normalement plus basses que celle des espaces artificiels. Cela peut s'expliquer par la présence de la couverture végétale, laquelle favorise l'évapotranspiration et donc l'augmentation du flux de chaleur latente au détriment du flux de chaleur sensible. De plus, l'ombrage et la rugosité contribuent à réduire l'échauffement de la surface (Sakhy et *al.*, 2011 ; Teteka Mutondo et *al.*, 2020).

1.4.2 Surfaces minérales

Les surfaces minérales, c'est-à-dire non végétalisées tels que les sols nus, les surfaces urbaines (ou matériaux de construction), les surfaces en eau (zones humides, mers et océans) ont une forte capacité de stockage thermique et une faible évapotranspiration, ce qui conduit généralement à des températures de surface élevées. Dans une surface urbaine, cela est exacerbé par l'imperméabilisation des sols et le piégeage de rayonnement dans des canyons urbains (Sakhy et *al.*, 2011). Les surfaces d'eau, comme les zones humides, les mers et les océans sont caractérisées par une inertie thermique élevée et une émissivité élevée. Cela signifie que la variation de température de surface est relativement modérée et que la TSM est, en général, plus stable que la TST terrestre, à la fois dans l'espace et dans le temps (Benmecheta, 2016).

1.4.3 Milieu environnant

La TST et la TSM sont fortement influencées par les conditions environnementales, notamment par les conditions atmosphériques. La vapeur d'eau atmosphérique, la transmittance atmosphérique, les radiances ascendantes et descendantes atmosphériques, ainsi que l'existence des aérosols, sont des facteurs qui modifient l'estimation du signal thermique détecté par les capteurs des satellites. Ces modifications doivent être corrigées par des corrections atmosphériques appropriées pour parvenir à une estimation correcte de la température de surface (Benmecheta, 2016 ; Galve et *al.*, 2022).

1.5 Méthodes de mesures de la température

1.5.1 Méthodes in situ

Les mesures in situ de température, réalisées à l'aide de stations météorologiques, de capteurs thermiques ponctuels ou de bouées océaniques, fournissent des données précises mais limitées spatialement. Leur couverture est souvent insuffisante pour représenter la forte hétérogénéité thermique des surfaces continentales et marines, en particulier dans les zones difficiles d'accès (déserts, montagnes, vastes étendues océaniques) (Becker & Li, 1990).

1.5.2 Méthodes de la télédétection

Actuellement, la télédétection infrarouge thermique permet de surmonter les limites de la méthode in situ en fournissant une information spatialisée continue de la température de surface. Les capteurs satellitaires offrent une couverture synoptique, homogène et répétitive, permettant l'observation simultanée de grandes régions à différentes échelles spatiales et temporelles (Wan & Dozier, 1996 ; Benmecheta, 2016). Cette capacité fait de la télédétection un outil indispensable pour l'étude de la variabilité spatiale et temporelle de la TST et de la TSM.

La télédétection est une méthode d'observation et de collecte de données à distance, sans contact direct avec l'objet d'étude. Elle repose sur l'utilisation de capteurs installés sur des satellites, des avions, ou des drones pour enregistrer le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par la surface terrestre ou marine. Ce rayonnement est capté dans différentes gammes de longueurs d'onde, allant des rayons gamma aux ondes radio, en passant par les infrarouges et la lumière visible (Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W., 2015).

1.5.2.1 Télédétection multispectrale

Elle consiste à capter des images dans plusieurs bandes spectrales distinctes, allant de la lumière visible à l'infrarouge proche. Cela permet d'analyser les propriétés de la surface terrestre en fonction de ses caractéristiques spectrales, qui varient selon les matériaux (sols, végétation, eau, etc.). Par exemple, la végétation peut être distinguée des autres surfaces grâce à son absorption spécifique dans certaines bandes de l'infrarouge proche et de la lumière rouge (Tucker, 1979).

1.5.2.2 Télédétection thermique

Elle se concentre sur la mesure du rayonnement infrarouge émis naturellement par les objets et surfaces en fonction de leur température. Elle est utilisée pour estimer des paramètres thermiques, tels que la température de surface terrestre (TST) et de surface de la mer (TSM), en mesurant la radiance infrarouge thermique. La télédétection thermique est cruciale pour l'étude des phénomènes

tels que les îlots de chaleur urbains, le stress hydrique en agriculture, ainsi que pour la surveillance de la dynamique océanique (Voogt, J. A., & Oke, T. R., 2003).

1.5.2.3 Concepts généraux de la télédétection

Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu émet un rayonnement électromagnétique (REM). Le corps noir est un objet théorique qui absorbe l'intégralité du rayonnement incident et réémet une énergie maximale qui dépend uniquement de sa température. Le REM émis par un corps noir est décrit par la loi de Planck, qui établit la relation entre la radiance spectrale, la longueur d'onde et la température absolue du corps (Planck, 1901 ; Becker & Li, 1990). Dans la réalité, les surfaces naturelles ne se comportent pas comme des corps noirs parfaits. Elles émettent une fraction du rayonnement théorique du corps noir, définie par le paramètre appelé émissivité. L'émissivité est un coefficient compris entre 0 et 1, qui dépend de la nature du matériau, de son état de surface et de la longueur d'onde considérée. En télédétection thermique, l'émissivité est un paramètre fondamental, car toute erreur dans son estimation se répercute directement sur la température de surface calculée (Becker & Li, 1990 ; Benmecheta, 2016). Les surfaces continentales présentent une forte variabilité d'émissivité selon l'occupation du sol (sol nu, végétation, surfaces urbaines), contrairement aux surfaces marines dont l'émissivité est élevée et relativement homogène, proche de l'unité. Cette différence explique pourquoi l'estimation de la TST est plus complexe que celle de la TSM (McClain et *al.*, 1985 ; Sobrino et *al.*, 2004).

1.5.2.4 Interaction du REM avec l'atmosphère

Le rayonnement infrarouge thermique émis par la surface doit traverser l'atmosphère avant d'atteindre le capteur satellitaire. Or, certains gaz atmosphériques, notamment la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et l'ozone, absorbent fortement le rayonnement infrarouge, ce qui limite l'observation directe de la surface (Wan & Dozier, 1996).

1.5.2.5 Fenêtres atmosphériques

Les fenêtres atmosphériques correspondent à des intervalles spectraux pour lesquels l'atmosphère est relativement transparente. En télédétection thermique, la principale fenêtre atmosphérique se situe entre 8 et 13 μm , domaine dans lequel l'absorption atmosphérique est minimale. C'est dans cette région spectrale que la majorité des capteurs thermiques satellitaires acquièrent leurs données (Sobrino et *al.*, 2004 ; Benmecheta, 2016). L'exploitation de deux bandes spectrales proches au sein de cette fenêtre (par exemple autour de 11 μm et 12 μm) permet de corriger partiellement les effets atmosphériques, notamment ceux liés à la vapeur d'eau, grâce à la méthode dite *Split-Window* (McClain et *al.*, 1985 ; Wan & Dozier, 1996).

La télédétection thermique constitue aujourd'hui un outil scientifique fondamental pour l'analyse des dynamiques énergétiques de surface et l'estimation des températures radiatives terrestres et marines. Elle repose sur la mesure du rayonnement infrarouge thermique émis naturellement par les surfaces conformément aux lois du rayonnement du corps noir, notamment la loi de Planck et la loi de Stefan-Boltzmann (Benmecheta, 2016). Le domaine spectral exploité se situe principalement dans la fenêtre atmosphérique comprise entre 8 et 14 μm , intervalle dans lequel l'absorption atmosphérique est relativement faible, permettant une observation efficace du rayonnement émis par la surface.

L'approche par télédétection thermique présente un double intérêt méthodologique :

1. Elle permet la cartographie synoptique des contrastes thermiques continentaux (zones urbaines, agricoles et naturelles),
2. Elle offre la possibilité d'analyser les gradients thermiques terre–mer caractéristiques des environnements côtiers.

L'estimation de la TST ou de la TSM ne correspond pas directement à la température de brillance mesurée par le capteur. Elle résulte d'un processus de correction impliquant la conversion radiométrique, la prise en compte des effets atmosphériques et l'intégration du paramètre d'émissivité de surface (*Remote Sensing*, 2022). Cette distinction est essentielle, notamment dans les milieux littoraux où les contrastes d'émissivité entre surfaces minérales, végétalisées et aquatiques sont marqués.

Ainsi, la télédétection thermique ne se limite pas à une simple lecture radiative ; elle implique une chaîne de traitement physiquement fondée visant à restituer une température cinétique aussi proche que possible de la réalité de surface.

La télédétection thermique permet ainsi d'estimer indirectement la TST et la TSM à diverses échelles spatiales et temporelles. Les travaux scientifiques montrent que les capteurs infrarouges embarqués sur les satellites offrent une couverture synoptique et répétitive inatteignable par des mesures in situ seules, ce qui est fondamental pour l'analyse des échanges thermiques sol–atmosphère et océan–atmosphère (Wan & Dozier, 1996 ; McClain et *al.*, 1985). Ces données sont massivement exploitées pour cartographier les îlots de chaleur urbains et quantifier le stress hydrique des sols, ainsi que pour détecter les tendances climatiques de surface (Weng et *al.*, 2004 ; Imhoff et *al.*, 2010 ; Li et *al.*, 2013 ; Peprah et *al.*, 2023).

Les applications pratiques couvrent par exemple la gestion de l'eau et de l'irrigation en agriculture, la surveillance des sécheresses, l'urbanisme thermique, et l'observation des processus océaniques (El Niño, courants océaniques) sur le long terme.

1.5.2.6 Méthodes de prétraitement des images satellites

Les prétraitements sont le socle méthodologique qui conditionne la fiabilité de toute estimation de la TST et, par extension, l'analyse comparative terre–mer dans une zone littorale telle que l'interface continent–océan (Benmecheta, 2016). Le prétraitement vise à transformer des données brutes (*DN*) en variables physiques cohérentes (radiance, réflectance, paramètres atmosphériques, masques de qualité) et à sécuriser la comparabilité spatiale et temporelle des produits (même projection, même emprise, gestion stricte des nuages, cohérence inter-bandes) (Teteka Mutondo et al., 2020; Marchal et al., 2022).

En zone littorale, l'enjeu n'est pas uniquement de « corriger » l'image, mais de rendre physiquement interprétables des mesures où l'atmosphère (vapeur d'eau, aérosols, visibilité) et les contrastes de surface (eau/sol nu/bâti/végétation) laissent une empreinte forte sur le signal observé (ITT, 2007; Benmecheta, 2016). Le manuel *FLAASH* rappelle que l'imagerie de télédétection contient simultanément de l'information sur l'atmosphère et sur la surface, et que la suppression de l'influence atmosphérique est une étape critique dès lors que l'on vise des analyses quantitatives (réflectance de surface, indices, paramètres énergétiques) (ITT, 2007). Cette remarque est directement pertinente pour une méthodologie TST/TSM, car les indices spectraux mobilisés pour expliquer (ou paramétrer) la variabilité thermique reposent sur des bandes optiques dont la réflectance doit être robuste aux variations atmosphériques (ITT, 2007; Teteka Mutondo et al., 2020; Jeevalakshmi & Narayana Reddy, 2017).

Deux difficultés supplémentaires apparaissent typiquement dans les scènes littorales (Benmecheta, 2016). La première est la variabilité spatio-temporelle des paramètres atmosphériques, qui rend fragile une correction fondée sur un point unique (station) lorsque l'humidité et l'orographie créent des gradients, phénomène explicitement signalé comme critique en conditions atmosphériques humides dans l'évaluation des paramètres de correction (Galve et al., 2022). La seconde est l'effet de mélange spatial (*pixel mixing*) et d'« *adjacency effect* » : *FLAASH* formalise que la diffusion atmosphérique peut mélanger la radiance entre pixels voisins, entraînant des erreurs de réflectance, en particulier sous conditions de brume/haze et lorsque de forts contrastes existent dans la scène. (ITT, 2007). L'interface terre–mer constitue précisément un cas de contraste élevé (eau sombre vs surfaces continentales plus réfléchissantes), ce qui justifie, dans un flux littoral, soit l'activation des

corrections d'adjacence (optique), soit des précautions de sélection/échantillonnage en bord de côte pour limiter les pixels mixtes (ITT, 2007; Jeevalakshmi & Narayana Reddy, 2017).

1.5.2.7 Imageries thermiques

L'imagerie thermique passive mesure le rayonnement émis par un objet du fait de sa température. Pour un objet de température de surface T_s (exprimée en Kelvin) la radiance spectrale émise à la longueur d'onde λ s'écrit comme suit :

$$[L(\lambda, T_s) = \varepsilon(\lambda) \cdot B(\lambda, T_s)]$$

Avec :

- ✓ $B(\lambda, T)$ est la fonction de Planck,
- ✓ $\varepsilon(\lambda)$ l'émissivité spectrale ($0 < \varepsilon \leq 1$).

La loi de Stefan-Boltzmann relie l'émittance intégrée M à la température : ($M = \sigma T^4$) pour un corps noir (Stefan, 1879 ; Boltzmann, 1884). Autrement dit, la radiance infrarouge croît rapidement avec T , ce qui rend sensible la mesure spatiale de la TST/TSM. Les objets réels émettent moins qu'un corps noir ($\varepsilon < 1$), d'où la nécessité d'estimer ε pour convertir la température de brillance mesurée (*brightness temperature*) en température réelle (Li et al., 2013). De plus, l'atmosphère (vapeur d'eau, gaz) absorbe/réémet dans certaines bandes. En pratique, on choisit la « fenêtre atmosphérique » (8–14 μm) où l'absorption est minimale pour l'observation au sol depuis l'espace (Sobrino et al., 2004). Les algorithmes de restitution (p. ex. fenêtre fendue) corrigent les effets atmosphériques et d'émissivité (Price, 1984 ; Becker & Li, 1990).

La loi de Stefan-Boltzmann (SB) relie l'émittance totale intégrée M (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) d'un corps noir à sa température absolue T (en Kelvin) selon la relation :

$$M = \sigma \cdot T^4$$

Avec :

- ✓ σ : la constante de Stefan-Boltzmann, égale à $5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$,
- ✓ T : la température absolue de surface (en Kelvin),
- ✓ M : l'émittance totale du corps noir (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

Cette loi montre que la radiance infrarouge croît très rapidement avec la température (puissance 4), ce qui rend la mesure satellitaire particulièrement sensible aux variations de TST et SST (Stefan, 1879 ; Boltzmann, 1884).

1.5.2.8 Types de capteurs de mesures de TST et TSM

Les principaux capteurs thermiques passifs opèrent sur deux types d'orbite : polaires (orbite héliosynchrone *LEO*) et géostationnaires. Les satellites polaires (ex. *NOAA*, *MODIS*, *Landsat*, *Sentinel-3*, *Suomi-NPP*) offrent une résolution spatiale élevée (ordre du kilomètre ou moins) et une couverture globale régulière (une ou deux fois par jour) (Justice et *al.*, 2002 ; Wulder et *al.*, 2019). Les satellites géostationnaires (*Meteosat MSG*, *GOES*, *Himawari*) observent continûment la même région avec une très haute fréquence (toutes les 5–15 minutes) mais à résolution plus grossière (quelques km) (Schmetz et *al.*, 2002). Sur le plan spectral, les images thermiques utilisent principalement la bande infrarouge « thermique » (8–14 μm) pour la mesure de la température de surface, car c'est la fenêtre atmosphérique majeure pour l'émission de la surface (Sobrino et *al.*, 2004). Certains capteurs intègrent également des canaux infrarouge moyen (*SWIR*, $\sim 3\text{--}5\ \mu\text{m}$) destinés à des usages particuliers (ex. détection de feux, mesures de TST nocturnes) (Giglio et *al.*, 2016). Par exemple le capteur *STSTR* du Sentinel-3 comporte une bande à 3,74 μm en complément de ses bandes 10,85 μm et 12,00 μm dédiées au TST/TSM (Donlon et *al.*, 2012).

Les radiomètres micro-ondes passifs (par ex. *AMSR-E*, *SMOS*, *AMSR2*) constituent une autre « image thermique » au sens large pour la TSM : ils mesurent la température de surface à travers la couverture nuageuse (Wentz & Meissner, 2000). Leur résolution ($\sim 25\ \text{km}$) est bien inférieure aux capteurs infrarouge (IR), mais ils peuvent opérer sous couvert nuageux total (hors fortes précipitations) (Gentemann et *al.*, 2004). En revanche, les capteurs infrarouges spatiaux sont limités aux pixels non nuageux (environ 20 % de la surface océanique mondiale) (Kilpatrick et *al.*, 2015). Enfin, des caméras thermiques aéroportées ou montées sur drones existent pour la TST locale (résolutions métriques / centimétriques) et permettent une observation détaillée d'îlots de chaleur urbains ou de flux thermiques d'eau (Voogt & Oke, 2003), mais restent hors de portée des applications globales de TST/TSM.

1.5.2.9 Capteur de Sentinel-3

La mission Sentinel-3 (*ESA/EUMETSAT*) est spécifiquement conçue pour la mesure de la température de surface. Elle comprend deux satellites jumeaux (3A et 3B, lancés en 2016 et 2018) équipés du radiomètre *STSTR*. Ce radiomètre acquiert simultanément plusieurs bandes multispectrales et thermiques, dont trois bandes *TIR* centrées à 3,7 μm , 10,8 μm et 12,0 μm , avec une résolution spatiale de 1 km. Il dispose d'une visée double (nadir + arrière) qui améliore la correction atmosphérique et la calibration radiométrique. Avec deux satellites en formation, Sentinel-3 couvre quasi quotidiennement l'ensemble de la surface mondiale (près d'une couverture totale par jour). Les produits TST et TSM issus de *STSTR* sont caractérisés par une excellente

stabilité radiométrique et une précision de l'ordre du demi-degré en moyenne (Ghent et *al.*, 2024). Par exemple, les évaluations montrent une erreur moyenne <1K (Kelvin) pour la TSM par rapport aux mesures in situ. De ce fait, les données Sentinel-3 ont démontré une meilleure fiabilité à long terme que les séries d'anciennes missions (*MODIS*, *AVHRR*) pour le suivi climatique de la TSM (Donlon et *al.*, 2018 ; Merchant et *al.*, 2019). Le principal défaut de Sentinel-3 est sa résolution modérée (1 km), qui reste insuffisante pour détecter les variations microscale. En océanographie, les produits TSM de Sentinel-3 (ex. services Le programme CCI (*Climate Change Initiative*) est une initiative de l'Agence Spatiale Européenne (*ESA*) visant à produire des séries de données climatiques homogènes et cohérentes à long terme à partir d'observations satellitaires. Dans le cadre de la TSM, le projet CCI/ TSM compile et harmonise les données de plusieurs missions satellitaires pour générer des produits de température de surface de la mer validés et accessibles à la communauté scientifique internationale (Merchant et *al.*, 2019).

1.5.2.10 Capteurs Landsat

La série de satellites Landsat (*TM/ETM+* sur Landsat 4-7, puis *OLI/TIRS* sur Landsat 8-9) fournit des mesures thermiques à très haute résolution spatiale (bandes *TIR* centrées sur 10–12 μm). Par exemple, Landsat 8/9 embarquent le *Thermal Infrared Sensor (TIRS)* avec deux bandes thermiques (environ 10,6–11,2 μm et 11,5–12,5 μm) à 100 m (recalculées à 30 m pour la diffusion). Cette haute résolution spatiale confère à Landsat un avantage notable pour l'étude des phénomènes locaux : les images Landsat ont ainsi permis d'identifier précisément les îlots de chaleur urbains et de quantifier leurs relations avec l'occupation du sol et la végétation (Weng et *al.*, 2004 ; Imhoff et *al.*, 2010). Elles sont également utilisées pour surveiller le stress hydrique agricole et l'évapotranspiration à l'échelle de parcelles (Li et *al.*, 2013). En revanche, la revisite n'est que de l'ordre de 16 jours (deux satellites en service donnant 8 jours aujourd'hui), ce qui limite la fréquence d'observation, et la présence de nuages peut interrompre la chaîne d'images. Sur le plan spectral, les capteurs Landsat sont maintenus parfaitement étalonnés, mais doivent être corrigés de l'émissivité de surface pour obtenir la température réelle (Benmecheta, 2016). Enfin, si la lente inertie thermique des océans rend la TSM plus uniforme que la TST (McClain et *al.*, 1985), les données Landsat peuvent quand même être exploitées pour cartographier la température de l'eau en zones côtières ou continentales (Reynolds et *al.*, 2002). Remote Sensing (2022) montrait que le fichier métadonnées (*.MTL*) des images Landsat, fournit des coefficients radiométriques permettant la conversion des valeurs numériques (*Digital Numbers*) en radiance spectrale selon la relation suivante :

$$L_{\lambda} = M_L \times Q_{cal} + A_L$$

- ✓ Où M_L et A_L : sont respectivement les coefficients multiplicatif et additif fournis dans les métadonnées.

La température de brillance est ensuite obtenue par inversion de la loi de Planck suivante :

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

Cependant, cette température de brillance correspond à une température radiative au sommet de l'atmosphère. Elle doit être corrigée pour tenir compte de la transmissivité atmosphérique et de l'émissivité de surface afin d'obtenir la TST réelle.

Les satellites Landsat offrent une très haute résolution spatiale (de l'ordre de 60–100 m dans le domaine thermique) adaptée aux études locales (ex. identification précise des îlots de chaleur urbains). Cette diversité de capteurs illustre la complémentarité spatiale–temporelle en télédétection thermique : l'usage simultané de données à haute résolution spatiale (Landsat) et à haute répétitivité temporelle (Sentinel-3) permet de concilier détail local et couverture globale dans l'analyse des processus thermiques (Wan, 2008 ; Peprah et *al.*, 2023).

1.5.2.11 Capteurs complémentaires

Bien que le satellite Sentinel-2 ne possède pas de bande thermique, il joue un rôle méthodologique stratégique dans l'estimation indirecte de la TST. Grâce à ses bandes multispectrales à haute résolution spatiale (10–20 m), il permet la caractérisation détaillée de l'occupation du sol et le calcul d'indices spectraux essentiels à l'analyse thermique.

Essalek & Bouchaiba (2019) montraient que dans les approches combinées Landsat–Sentinel, les données Sentinel-2 sont mobilisées pour :

1. Le calcul de l'indice *NDVI*,
2. L'estimation de la fraction de végétation,
3. L'identification des surfaces artificialisées,
4. L'amélioration de l'estimation de l'émissivité.

Cette complémentarité renforce la robustesse méthodologique en intégrant des paramètres biophysiques fins influençant la température de surface.

1.5.2.12 Caractéristiques techniques des capteurs thermiques

Tableau 1: Caractéristiques techniques des capteurs de satellites utilisés dans l'estimation de la TST et de la TSM (d'après Benmecheta, 2016 ; Sakhy et *al.*, 2011).

Satellites	Capteurs	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Application typique (TST/TSM)
Landsat 8/9	OLI/TIRS	30 m (15 m panchromatique; 100 m thermique)	16 jours	TST local détaillée (urbain, agriculture)

Le tableau 1 montre que les capteurs du satellite Landsat 8 et 9 (*OLI/TIRS*) présentent une richesse spatiale (100 m de résolution spatiale), temporelle (16 jours) et spectrale (onze dont deux bandes thermiques « B10 et 11 »). Les données montraient que les images Landsat (30 m) permettent une cartographie plus précise des îlots de chaleur urbains que les images *MODIS* (1 km), qui tendent à lisser les contrastes thermiques intra-urbains (Li et *al.*, 2021). Ainsi, le Landsat est particulièrement adapté aux analyses locales ou méso-scalaires, telles que l'étude de la morphologie urbaine ou du stress hydrique agricole (USGS, 2020). Concernant la TSM, l'océan présentant une plus grande homogénéité thermique que les surfaces continentales, une résolution kilométrique est souvent suffisant pour détecter les grandes anomalies thermiques. Toutefois, dans les zones côtières ou les régions d'upwelling, une résolution plus fine améliore la détection des gradients thermiques locaux. Ainsi, la résolution spatiale élevée est indispensable pour analyser les hétérogénéités thermiques fines (TST urbaine, agriculture de précision), tandis qu'une résolution plus grossière est adaptée aux études synoptiques et climatiques de grande échelle. Les caractéristiques techniques des capteurs thermiques sont décrites dans le tableau 2.

Tableau 2: Caractéristiques techniques de quelques capteurs thermiques de mesures de TST et TSM d'après (Price; 1984 ; Wan; 2002 ; Wulder; 2021 ; Merchant; 2014 ; Sentinel; 2016 ; Schmetz; 2002)

Capteurs	Satellites	Bandes thermiques (µm)	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Usage TST/TSM	Références
<i>STSTR</i>	Sentinel-3A/B (<i>LEO</i>)	10.85, 12.00 (b8/b9)	1 km	2 jours (S3A/S3B)	TST, TSM	(Sentinel; 2016)
Landsat TIRS	Landsat 8/9 (<i>LEO</i>)	10.9, 12.0	100m (agrégé 1000m public)	16 jours	TST (terrestre)	(Wulder; 2021)

Le tableau 2 montre que les capteurs (*OLI/TIRS*) du satellite Landsat peuvent apporter un complément aux capteurs *STSTR* du Sentinel- 3

1.5.2.13 Intérêts des capteurs thermiques

Les capteurs thermiques jouent un rôle crucial dans de nombreuses études environnementales. Par exemple, l'analyse des îlots de chaleur urbains (ICU) repose largement sur l'imagerie thermique. Voogt et Oke (2003) ont montré que les images thermiques satellitaires et aériennes permettent de cartographier qualitativement les ICU en révélant les motifs de surface plus chauds en milieu urbain. Ils soulignent que l'avancée des capteurs (plus haute résolution spatiale et spectrale) permettrait de passer de simples descriptions visuelles à une compréhension plus quantitative du climat urbain. Des études de cas ont démontré des écarts de température de surface de l'ordre de 1–2 °C (voire plus) entre zones bâties et rurale en milieu urbain la nuit, cohérents avec l'effet d'îlot de chaleur.

En océanographie, la TSM issue des satellites est indispensable pour la modélisation des courants marins, des événements climatiques et la surveillance des masses d'eau. Donlon et al. (2012) présentent par exemple le système *Operational Temperature de surface de la mer and Ice Analysis (OSTIA)* qui produit quotidiennement des champs mondiaux de TSM sans trou (grille ~0.05°), intégrant de façon optimale les observations infrarouges (MO) et micro-ondes plus les mesures in situ. Les évaluations montrent que *OSTIA* atteint des biais très faibles et constitue une référence pour les modèles numériques. Ces séries temporelles de TSM multi-capteurs ont été utilisées pour étudier les courants océaniques et les événements thermiques (frontal fronts, vagues de chaleur marines), en corrélant par exemple les anomalies de TSM avec les changements de circulation et les événements climatiques extrêmes.

Des programmes internationaux comme *Group for High-Resolution (GHRTSM)* TSM et l'initiative *CCI (Climate Change Initiative) / TST (ESA Climate Change Initiative sur la TST)* visent à produire des séries climatiques homogènes à long terme. *GHRTSM* a démontré qu'il était possible d'assembler les données TSM multi-satellites dans un cadre opérationnel global et de répondre aux besoins de la réanalyse climatique (Donlon et al., 2007) ; il propose des produits TSM standardisés et validés. De même, Merchant et al. (2013) décrivent la démarche du *CCI/TST* pour compiler les données TST de différentes missions terrestres en produits climatiques concertés. Ces initiatives ont généré des bases de données utilisables pour analyser les tendances spatiales et temporelles du climat, comme l'évolution des températures de surface sur plusieurs décennies.

Enfin, ces données thermiques multi-sources sont couramment fusionnées ou interpolées pour améliorer la couverture spatiale / temporelle. Par exemple, le projet *MITSM (Multi-sensor Improved Sea Surface Temperature)* (Gentemann et al., 2004) a produit des TSM multi-capteurs optimaux

pour les prévisions cycloniques. Les auteurs ont montré qu'en combinant des données infrarouges et micro-ondes on obtient des cartes *TSM* plus complètes et robustes que chaque produit pris individuellement. À l'ère actuelle, les produits *TSM* comme ceux de NOAA *OITSM* (*Optimum Interpolation Temperature de surface de la mer*) sont le résultat d'assemblages harmonisés de missions *AVHRR*, *VIIRS*, *MODIS*, etc. (par exemple Gentemann et al., 2004 ; Kilpatrick et al., 2015). Ces séries historiques fusionnées servent à la calibration des modèles océaniques et climatiques, ainsi qu'à la surveillance des indicateurs environnementaux (phénomènes El Niño, ondes de chaleur, décalages de courants).

1.5.2.14 Avantages de la télédétection thermique

En milieu marin

En milieu marin, l'estimation de la *TSM* par la télédétection présente un avantage majeur en raison de l'émissivité quasi constante de l'eau, proche de l'unité, ce qui facilite la correction radiométrique et améliore la précision des algorithmes thermiques (McClain et al., 1985). Le capteur infrarouge tels que *STSTR* du Sentinel-3 permet d'estimer la *TSM* avec une précision généralement inférieure à $\pm 1^\circ\text{K}$ dans des conditions atmosphériques favorables (Walton, 1987 ; Minnett et al., 2019). La *TSM* constitue un paramètre fondamental pour l'étude des échanges thermiques océan-atmosphère, la circulation océanique et la surveillance des phénomènes climatiques globaux tels qu'*El Niño* et *La Niña* (Donlon et al., 2007). La télédétection permet un suivi quasi continu de la *TSM* à l'échelle mondiale, ce qui serait impossible à réaliser uniquement à partir des mesures in situ. Elle est également utilisée pour la détection des anomalies thermiques marines, des upwellings côtiers et des pollutions thermiques d'origine anthropique.

Depuis 2015, les progrès technologiques ont considérablement amélioré la qualité des produits *TST* et *TSM*. L'intégration multi-capteurs, combinant par exemple Sentinel-3 et Landsat, a permis de concilier haute résolution spatiale et forte résolution temporelle, améliorant ainsi le suivi dynamique des températures de surface (Li et al., 2017 ; Li et al., 2019). Par ailleurs, l'utilisation de bases de données d'émissivité plus précises et le recours à des approches basées sur l'apprentissage automatique ont contribué à réduire les incertitudes liées à l'hétérogénéité des surfaces continentales (Hulley et Hook, 2017 ; Zhang et al., 2020). En milieu marin, les produits *TSM* issus des capteurs de nouvelle génération, notamment Sentinel-3, ont montré une meilleure stabilité radiométrique et une réduction des biais, renforçant leur utilisation dans les études climatiques à long terme (Donlon et al., 2018 ; Merchant et al., 2019).

La télédétection thermique a également joué un rôle majeur dans l'estimation de la TSM à l'échelle globale. Les travaux basés sur les données NOAA-AVHRR ont démontré que la TSM pouvait être estimée avec une grande précision, ce qui a permis son intégration dans les modèles climatiques et les systèmes de prévision météorologique (McClain et *al.*, 1985 ; Reynolds et *al.*, 2002). Plus récemment, l'utilisation de capteurs tels que MODIS et ATSR a permis d'améliorer la continuité et la fiabilité des séries temporelles de la TSM. Ces données ont été largement utilisées pour l'analyse des courants marins, des anomalies thermiques océaniques et des échanges d'énergie océan-atmosphère (Donlon et *al.*, 2007).

L'un des principaux atouts de la télédétection réside dans sa capacité à analyser la TST et la TSM à différentes échelles spatiales et temporelles. Les capteurs à haute résolution spatiale, tels que Landsat, sont particulièrement adaptés aux études locales et urbaines, tandis que les capteurs à large couverture, comme MODIS et AVHRR, permettent un suivi fréquent et global (Wan, 2008 ; Benmecheta, 2016). Les archives satellitaires disponibles sur plusieurs décennies offrent une opportunité unique pour l'analyse diachronique des températures de surface. Elles permettent d'évaluer l'impact de l'urbanisation, des changements d'occupation du sol et du réchauffement climatique sur l'évolution des régimes thermiques de surface (Sobrino et *al.*, 2017).

Le recours à la télédétection thermique pour l'étude de la TST et TSM est largement documenté dans la littérature scientifique internationale. Depuis les premières applications opérationnelles, de nombreux auteurs ont montré que les capteurs infrarouges thermiques embarqués sur les satellites ont permis d'estimer la température de surface de manière indirecte à différentes échelles spatiales et temporelles, offrant ainsi une couverture synoptique difficilement accessible par les mesures in situ (Wan et Dozier, 1996 ; McClaine *al.*, 1985).

En milieu continental

En milieu continental, la TST correspond à la température radiative de la surface, influencée par la nature du sol, la couverture végétale, l'humidité, la topographie et l'occupation du sol (Sobrino et *al.*, 2004). Les capteurs tels que Landsat TM/ETM⁺/OLI-TIRS permettent d'estimer la TST à différentes résolutions spatiales, adaptées aussi bien aux études locales qu'aux analyses régionales ou globales (Wan, 2008). De nombreuses études ont démontré l'efficacité de la télédétection pour la cartographie et l'analyse des îlots de chaleur urbains de surface. Sakhy et al. (2011) ont montré, à partir d'images Landsat, que la TST permet de mettre en évidence les contrastes thermiques entre les zones urbaines et rurales, ainsi que leurs relations avec la couverture végétale et la morphologie urbaine. Les résultats révèlent une corrélation négative entre la TST et l'indice de végétation par différence normalisée dénommé en anglais *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*,

confirmant le rôle modérateur de la végétation sur les températures de surface (Sakhy et *al.*, 2011). En agriculture et en hydrologie, la TST est largement utilisée comme indicateur indirect de l'état hydrique des sols et de la végétation. Couplée aux indices spectraux et aux modèles de bilan d'énergie, elle permet d'estimer l'évapotranspiration réelle et de détecter les zones soumises au stress hydrique (Bastiaanssen et *al.*, 1998 ; Allen et *al.*, 2007). La télédétection offre ainsi un outil efficace pour la gestion des ressources en eau et le suivi des sécheresses à grande échelle.

1.5.2.15 Prétraitements d'images satellites

Correction géométrique

La cohérence géométrique est un prérequis à l'analyse conjointe (indices + thermique), car une simple désalignement entre bandes ou dates peut fausser les statistiques (corrélations, zonages) et introduire des erreurs de localisation dans les cartes de chaleur (Marchal et *al.*, 2022; Kshetri & Dahal, 2024). Kshetri & Dahal (2024) illustrent un flux de travail où les traitements sont conduits à la fois en système géographique (WGS84) et en système projeté *UTM*, montrant que l'harmonisation de projection fait partie intégrante des traitements SIG pour la production finale de TST et d'indices.

En présence de scènes multiples se recouvrant, la mosaïque devient une étape structurante, mais potentiellement génératrice d'artefacts si la provenance des pixels (date, conditions d'acquisition) n'est pas contrôlée. Marchal et *al.*, (2022) indiquent plusieurs stratégies de mosaïquage envisageables (premier pixel, valeur médiane ou maximale, sélection manuelle, etc.) et précisent que le choix dépend de la qualité des images, de la présence de nuages et des conditions d'acquisition. Un point méthodologique critique est explicitement souligné : pour un pixel donné, toutes les bandes spectrales doivent provenir de la même image, condition requise pour le calcul d'indices tels que le *NDVI* qui suppose l'acquisition simultanée sous conditions similaires. Cette contrainte est particulièrement importante en littoral, car des mélanges inter-dates peuvent artificiellement créer des ruptures terre–mer ou des anomalies sur la ligne de côte si les bandes ne sont pas strictement co-acquises.

Le découpage ou en anglais *clipping* à l'emprise de la zone d'étude, enfin, est recommandé pour réduire la charge de calcul et limiter les analyses à un espace homogène d'interprétation (Marchal et *al.*, 2022).

Correction radiométrique

Le prétraitement radiométrique vise à convertir les *DN* en grandeurs physiques à partir des paramètres fournis dans les métadonnées de l'image Landsat, condition préalable au calcul

rigoureux d'indices et à l'exploitation thermique (Teteka Mutondo et *al.*, 2020; Jeevalakshmi & Narayana Reddy, 2017). Dans la procédure Landsat-8 reprise par Teteka Mutondo et *al.* (2020), la luminance spectrale au sommet de l'atmosphère est obtenue par la relation standard des produits Landsat :

$$L_{\lambda} = M_L \times Q_{cal} + A_L$$

Avec :

- ✓ (M_L) et (A_L) : sont les facteurs multiplicatif et additif de radiance et Q_{cal} la valeur DN du pixel.

Cette étape n'est pas un détail technique ; elle garantit que l'image devient comparable à d'autres dates/scènes dans une logique de série temporelle, puisque les coefficients radiométriques sont appliqués de manière explicite et reproductible (Teteka Mutondo et *al.*, 2020; Marchal et *al.*, 2022).

Pour les traitements thermiques, la conversion de la radiance en température de brillance repose sur l'inversion de la relation de Planck avec des constantes thermiques (K-1) et (K-2) fournies en métadonnées, démarche explicitement intégrée comme étape 2 dans une chaîne Landsat-8 de récupération de TST. Dans cette logique, l'équation d'inversion doit être appliquée de façon cohérente avec les unités et les constantes indiquées pour la bande thermique considérée. La même source fournit un exemple chiffré de constantes thermiques pour la bande 10, illustrant que la conversion est paramétrée par des valeurs instrumentales (table méta) et non par des constantes universelles fixées a priori (Jeevalakshmi & Narayana Reddy, 2017).

Bandes spectrales

Les indices (*NDVI*, proxy urbain) et les paramètres radiatifs (albédo) reposent sur des bandes optiques, ce qui impose de sécuriser le passage $DN \rightarrow$ radiance/réflexance et, si possible, d'appliquer une correction atmosphérique pour réduire la variabilité non liée à la surface (ITT, Visual Information Solutions, 2007; Teteka Mutondo et *al.*, 2020). Teteka Mutondo et *al.* (2020) rappellent que la réflexance *TOA* non corrigée de l'angle solaire n'est pas une « vraie » réflexance *TOA*, et détaillent la conversion vers une réflexance tenant compte de l'angle d'élévation solaire, ce qui souligne l'importance de la géométrie d'illumination dans l'inter-comparaison des scènes. Dans une méthodologie littorale, cette cohérence est déterminante : les gradients terre–mer et les analyses multi-dates sont très sensibles aux variations d'illumination et de conditions atmosphériques si celles-ci ne sont pas contrôlées (Teteka Mutondo et *al.*, 2020; Marchal et *al.*, 2022).

Correction atmosphérique

Approche FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)

Le manuel *FLAASH* insiste sur le fait que la correction atmosphérique quantitative nécessite des informations sur la vapeur d'eau, les aérosols et la visibilité, informations rarement disponibles par mesures directes, d'où l'usage d'inférences à partir de la radiance image et de modèles de transfert radiatif « *first-principles* » (ITT, 2007). *FLAASH* est explicitement décrit comme un outil de correction atmosphérique reposant sur *MODTRAN4*, calculant une solution *MODTRAN* unique pour chaque image, plutôt que d'interpoler une base pré-calculée de résultats (ITT, 2007). Il est également précisé que *FLAASH* corrige les longueurs d'onde du visible au *SWIR* jusqu'à 3 μm , et que pour la région thermique il faut recourir à une autre procédure/outillage (option de correction atmosphérique thermique disponible dans l'environnement du logiciel *ENVI*) (ITT, 2007).

FLAASH formalise une équation de radiance au capteur intégrant :

1. La réflectance de surface du pixel,
2. Une réflectance moyenne régionale utilisée pour modéliser l'adjacence,
3. L'albédo sphérique atmosphérique,
4. La radiance de rétro-diffusion atmosphérique (ITT, 2007)

Les paramètres radiatifs nécessaires (termes issus de *MODTRAN*) dépendent des angles solaires et de visée, de l'élévation moyenne de la scène, du modèle atmosphérique, du type d'aérosols et de la visibilité (ITT, 2007). Le manuel indique aussi que ces paramètres sont fortement dépendants de la colonne de vapeur d'eau, variable qui peut être mal connue et varier dans la scène, ce qui justifie le « bouclage » *MODTRAN* sur une série de valeurs de vapeur d'eau afin de contraindre la solution (ITT, 2007). Dans un cadre littoral, où la variabilité de l'humidité atmosphérique peut être importante à l'échelle de la scène, cette dépendance renforce l'intérêt de procédures capables d'estimer ou d'absorber cette variabilité, plutôt que de supposer un état atmosphérique uniforme (ITT, 2007; Galve et al., 2022).

Approche composante thermique

Du point de vue thermique, Benmecheta (2016) détaille que certains algorithmes à canal unique exigent explicitement, en plus de la radiance/température au capteur, l'émissivité, la transmittance et les radiances ascendante et descendante. Cette liste est essentielle pour le prétraitement car elle indique quelles variables atmosphériques doivent être obtenues (par modèle, climatologie ou données auxiliaires) avant même l'étape d'extraction de TST proprement dite.

Dans la comparaison d'algorithmes Landsat-8, Galve et al. (2022) soulignent que les paramètres de correction atmosphérique obtenus à partir d'outils « *single-location* » (point unique) se dégradent avec la distance et les différences d'altitude, et que cette dépendance est particulièrement problématique en atmosphère humide. Pour dépasser cette limitation, ils décrivent *SBAC* (*Single Band Atmospheric Correction*) comme une approche produisant des paramètres atmosphériques pixel-à-pixel à partir de profils *NCEP* (National Centers for Environmental Prediction) et d'un modèle numérique de terrain (MNT), donc explicitement adaptée à la variabilité intra-scène (orographie et conditions atmosphériques). Galve et al., (2022) indiquent toutefois que *SBAC* peut être coûteux en calcul, d'où l'intérêt d'une version simplifiée (*L-SBAC — Linearized Single Band Atmospheric Correction*) fondée sur une linéarisation des paramètres atmosphériques selon la vapeur d'eau (w), afin de réduire la charge opérationnelle.

Gestion des nuages, ombres et pixels invalides

La gestion des nuages est un point de défaillance majeur en thermique, car les nuages masquent la surface et introduisent des températures non physiques si les pixels sont conservés. Marchal et al., (2022) précisent que la bande de qualité *QA_PIXEL* des produits Landsat est utilisée pour identifier et éliminer les zones nuageuses, puis qu'une zone plus large est éliminée autour des nuages afin d'éviter les bords résiduels (limites de nuages non détectés). Ils ajoutent qu'une vérification manuelle est réalisée pour s'assurer que les images finales sont dépourvues de nuages, voiles nuageux ou traînées d'avion, ce qui formalise une exigence de contrôle visuel en complément du masque automatique (Marchal et al., 2022).

En correction optique, *FLAASH* indique également que, pour les opérations d'averaging nécessaires à l'estimation de certaines grandeurs, les pixels contenant des nuages doivent être retirés avant moyenne, et mentionne l'usage de tests de brillance, ratios inter-bandes et vapeur d'eau pour détecter ces pixels (ITT, 2007).

Correction de l'émissivité

Bien que l'émissivité soit souvent traitée dans la phase d'extraction de TST, ses intrants et vérifications relèvent, en pratique, d'un prétraitement élargi car l'émissivité contrôle directement le passage de la température de brillance à la TST (Benmecheta, 2016; Galve et al., 2022). Jeevalakshmi & Narayana Reddy (2017) soulignent que l'émissivité de surface est hétérogène au pixel, et proposent une attribution d'émissivité basée sur des classes *NDVI* (eau, sol, mélange sol-végétation, végétation), ce qui fournit un schéma opérationnel de préparation de l'émissivité à partir de produits optiques. Galve et al. (2022) montrent d'ailleurs qu'une attribution inadéquate de

l'émissivité peut induire un biais systématique (sur-estimation) dans certains produits TST, ce qui souligne l'importance de contrôler ce paramètre en amont.

Dans une étude d'albédo basée sur *SEBAL*, Teteka Mutondo et al. (2020) articulent explicitement le lien entre correction atmosphérique, transmissivité et albédo de surface : l'albédo est corrigé des effets atmosphériques via un terme de radiance de trajet (*$\alpha_{path_radiance}$*) et une transmissivité atmosphérique au carré, avec une estimation de τ_{sw} dépendante de l'altitude (extraction possible un MNT). Ce point est méthodologiquement important en zone littorale : même si l'altitude de la zone peut être globalement faible, le schéma rappelle que l'albédo exploitable pour une analyse énergétique doit être cohérent avec les corrections atmosphériques et avec l'élévation moyenne/scène.

Enfin, la gestion des pixels côtiers exige une vigilance spécifique vis-à-vis des contaminations radiatives et des pixels mixtes (ITT, 2007; Jeevalakshmi & Narayana Reddy, 2017). *FLAASH* définit l'« *adjacency effect* » comme un mélange spatial de radiance entre pixels voisins dû à la diffusion atmosphérique et souligne que cet effet peut produire des erreurs significatives lorsque de forts contrastes existent dans la scène (ITT, 2007).

Tableau 3 : Synthèse des prétraitements (d'après Teteka Mutondo et al., 2020 ; Jeevalakshmi & Narayana Reddy, 2017 ; Benmecheta, 2016 ; Galve et al., 2022 ; Marchal et al., 2022 ; Kshetri & Dahal, 2024).

Étape de prétraitement	Objectif méthodologique	Risque si omission
Conversion $DN \rightarrow$ radiance (métadonnées)	Passer à des unités physiques comparables entre dates et scènes	Comparaisons temporelles biaisées, indices instables (Teteka Mutondo et al., 2020)
Température de brillance (K1/K2)	Obtenir une variable thermique intermédiaire cohérente pour l'extraction TST	Températures non comparables si unités/constantes incohérentes (Jeevalakshmi & Narayana Reddy, 2017)
Correction atmosphérique optique (FLAASH/MODTRAN)	Réflectance de surface robuste pour NDVI/albédo et variables explicatives	Indices sensibles à la vapeur d'eau/aérosols/visibilité (ITT Visual Information Solutions, 2007)
Paramètres atmosphériques thermiques (τ , $Li\uparrow$, $Li\downarrow$, w)	Corriger l'absorption/émission atmosphérique en thermique	Biais TST si atmosphère ignorée, surtout en conditions humides (Benmecheta, 2016 ; Galve et al., 2022)
Masque nuages/ombres (QA_PIXEL + dilatation + contrôle)	Éliminer pixels invalides et résidus en bord de nuage	Anomalies thermiques et ruptures spatiales artificielles (Marchal et al., 2022).
Reprojection / harmonisation géométrique	Assurer alignement multi-bandes et multi-capteurs	Corrélations et cartes faussées par décalage de pixels (Kshetri & Dahal, 2024).
Mosaïque contrôlée	Couvrir l'emprise tout en gardant cohérence inter-bandes/date	Mélange inter-dates, incohérences NDVI/indices (Marchal et al., 2022)
Contrôle d'adjacence / gestion bord de côte	Réduire contamination terre-mer et erreurs sous fort contraste	Erreurs de réflectance/indices près de la côte (ITT Visual Information Solutions, 2007)

Méthodes de calcul des indices spectraux

Indice de végétation

L'indice de végétation (IV) ou NDVI s'écrit avec la formule suivante :

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$$

Avec :

- ✓ PIR : Proche infrarouge,
- ✓ R : Rouge.

L'indice constitue un indicateur synthétique de la densité et de l'activité chlorophyllienne de la végétation. Plusieurs travaux ont mis en évidence une corrélation négative significative entre *NDVI* et *TST*, traduisant le rôle régulateur de l'évapotranspiration sur la température de surface (Sakhy et al., 2011 ; Amorim et al., 2016).

Rappel sur la notion de l'albédo de surface

L'albédo représente la fraction du rayonnement solaire réfléchi par la surface. Dans l'approche *Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL)*, l'albédo de surface est estimé à partir de l'albédo au sommet de l'atmosphère corrigé des effets atmosphériques (Bastiaanssen et al., 1998 ; Benmecheta, 2016). La formule s'écrit d'après Bastiaanssen et al., 1998 ; Teteka Mutondo et al., (2020) comme suit :

$$\alpha = \frac{(\alpha_{TOA} - \alpha_{path})}{T_{SW}^2}$$

Avec :

- ✓ $\alpha_{surface}$: albédo de surface réel,
- ✓ α_{TOA} : albédo au sommet de l'atmosphère (*Top Of Atmosphere*), mesuré par le satellite
- ✓ $\alpha_{path_radiance}$: albédo de trajet atmosphérique, représentant la contribution de la diffusion atmosphérique au signal mesuré, estimé généralement à 0,03,
- ✓ τ_{sw} : transmissivité atmosphérique dans le domaine solaire (*shortwave*), estimée par :

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \times 10^{-5} \cdot z$$

- ✓ Où z est l'altitude moyenne de la zone d'étude en mètres, extraite du MNT

L'albédo influence directement le bilan énergétique de surface en conditionnant la quantité d'énergie absorbée. Les surfaces minéralisées urbaines présentent généralement un albédo différent des surfaces végétalisées ou aquatiques, ce qui contribue aux contrastes thermiques observés.

Indice urbain

L'indice urbain ou *NDBI* (*Normalized Difference Built-up Index*) permet d'identifier les surfaces bâties et d'analyser leur relation avec la TST. Les surfaces urbanisées, caractérisées par une faible humidité et une forte inertie thermique, présentent généralement des températures plus élevées (Essalek & Bouchaiba, 2019). L'intégration du *NDBI* permet ainsi d'expliquer spatialement les noyaux thermiques observés.

Indices de la TST et de la TSM

Les algorithmes d'extraction de la TST à partir de Landsat sont groupés par Galve et al., (2022) en deux grandes familles suivantes :

1. *SC* (*Single-Channel*), basées sur une bande thermique unique (souvent centrée autour de 11 μm),
2. *SW* (*Split-Window*), qui exploitent au moins deux bandes situées dans la fenêtre (10–12 μm).

Dans la perspective littorale et marine, la TSM est construite sur des principes radiatifs analogues à ceux de TST, mais mobilise des paramétrisations (coefficients d'ajustement) différentes, une exigence de précision élevée et des hypothèses distinctes liées aux propriétés de l'eau et à l'atmosphère maritime (Benmecheta, 2016).

Méthodes à canal unique ou SC

Galve et al. (2022) présentent l'algorithme SC de Jiménez-Muñoz (2004) sous la formule suivante :

$$T = \gamma \left[\frac{1}{\varepsilon} (\Psi_1 L_{TOA} + \Psi_2) + \Psi_3 \right] + \delta$$

Avec :

- ✓ L_{TOA} : Est la radiance au sommet de l'atmosphère,
- ✓ ε : L'émissivité de la bande,
- ✓ Ψ_j : Des termes atmosphériques.

Ils précisent que γ et δ sont calculés à partir de la température de brillance T_i et d'un terme où γ est la longueur d'onde effective de la bande, et que les Ψ_j sont liés aux paramètres de correction atmosphérique via des relations dépendant de la vapeur d'eau w .

Du point de vue des variables nécessaires à la correction, Benmecheta (2016) explicite, dans la liste des symboles, les grandeurs radiatives utilisées dans l'équation de transfert suivante :

- a. I_λ (radiance au capteur),
- b. σ_λ (transmittance),
- c. $R_{at,\lambda}^\uparrow$ (radiance atmosphérique ascendante),
- d. $R_{at,\lambda}^\downarrow$ (radiance descendante),
- e. ε_λ (émissivité spectrale),
- f. $B_\lambda(T)$ (fonction de Planck).

Les méthodes à canal unique exigent un code radiance/transmittance de haute qualité, une bonne connaissance de l'émissivité et un profil atmosphérique précis, et que la topographie peut également intervenir dans les erreurs si elle n'est pas considérée (Benmecheta, 2016).

Elle quantifie aussi la sensibilité à l'émissivité : une erreur de 1% sur l'émissivité peut induire une erreur sur TST de l'ordre de 0,3 °K en atmosphère chaude et humide à 0,7 °K en atmosphère froide et sèche (Benmecheta, 2016).

Méthodes de fenêtre divisée ou SW

Galve et al. (2022) rappellent que les algorithmes SW s'appliquent aux capteurs ayant au moins deux bandes dans la fenêtre (10–12 μm) : un canal centré autour de 11 μm (atmosphère plus transparente) et un autre autour de 12 μm , où la vapeur d'eau absorbe davantage, la différence des températures de brillance permettant de corriger l'absorption par la vapeur d'eau.

L'exemple SW_{JM} est donné par Galve et al. (2022) sous la forme suivante :

$$T = T_{10} + 1.378(T_{10} - T_{11}) + 0.183(T_{10} - T_{11})^2 - 0.268 + (54.30 - 2.238w)(1 - \varepsilon) + (16.40w - 129.20)\Delta\varepsilon$$

Dans la même source :

✓ Emissivité moyenne :

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{10} + \varepsilon_{11}}{2}$$

Différence d'émissivité :

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{10} - \varepsilon_{11}$$

Méthodes basées sur modèles de transfert radiatif (RTM)

Benmecheta (2016) rappelle que des modèles tels que *LOWTRAN* et *MODTRAN* ont été largement mobilisés pour développer des algorithmes TSM et TSM.

Galve et al., (2022) montraient que *SBAC* (*Single Band Atmospheric Correction*) est présenté comme une méthodologie visant à produire des cartes pixel-à-pixel des paramètres atmosphériques, basée sur des profils *NCEP* et le code *MODTRAN* v5.2, et adaptée ici aux canaux 10 et 11 de Landsat-8/TIRS. Pour réduire le coût de calcul, *L-SBAC* introduit une relation de type :

$$\text{Paramètre atmosphérique} = a + bw$$

✓ Où w est la teneur en vapeur d'eau (0 à 5 cm).

Produits opérationnels et intrants d'émissivité

Galve et al. (2022) incluent le produit opérationnel *L8_ST* (Landsat-8, Level-2, TST) décrit comme dérivé de la bande 10 via l'équation de transfert radiatif, avec utilisation de données de réanalyse (*NARR*) pour caractériser l'atmosphère et *MODTRAN* pour les calculs radiatifs, en fournissant des valeurs de compensation atmosphérique par pixel. Ils indiquent que l'émissivité de ce produit est basée sur *ASTER-GED* et ajustée temporellement via l'information *NDVI* et que le produit fournit, en plus de la TST, les variables de compensation atmosphérique (dont l'émissivité bande 10).

Méthodes multi-angles

Les fichiers fournis décrivent une approche consistant à estimer simultanément émissivité et température à partir de paires d'images *AVHRR* jour/nuit, utilisant un indice spectral indépendant de la température (*TISI*) et supposant connue la *BRDF TIR* de surface ainsi que les profils atmosphériques (Benmecheta, 2016).

Méthodes TES (Temperature–Emissivity Separation)

Benmecheta (2016) montre que l'estimation conjointe de TST et de ε est intrinsèquement sous-déterminée (plus d'inconnues que de mesures), d'où la nécessité de contraintes supplémentaires, et présente *TES* comme une séparation fondée sur une relation semi-empirique entre le contraste spectral *MMD* (*Maximum-Minimum Difference*), défini comme la différence entre l'émissivité

maximale et minimale sur l'ensemble des bandes *TIR*, et l'émissivité minimale de surface, initialement établie pour *ASTER*.

La *TES* requiert au minimum quatre bandes *TIR* et n'est donc pas applicable à la plupart des capteurs opérationnels, mais qu'elle est utilisée sur *ASTER* (5 canaux *TIR* 10 à 14 μm) via des modules successifs (dont *NEM* et *MMD*) et exige des corrections atmosphériques précises, faute de quoi des discontinuités/artéfacts peuvent apparaître (Benmecheta, 2016).

Tableau 4: Comparaison entre méthodes SC et SW (d'après Benmecheta, 2016 ; Galve et al., 2022).

Critère	SC (Single-Channel)	SW (Split-Window)
Données nécessaires	1 bande <i>TIR</i> (souvent $\sim 11 \mu\text{m}$) + émissivité ε + paramètres atmosphériques (Ψ, τ , radiances atmosphériques)	2 bandes <i>TIR</i> ($11 \mu\text{m}$ et $12 \mu\text{m}$) ε + et $\Delta\varepsilon$ + vapeur d'eau w selon formulation
Principe	Inversion de l'équation de transfert radiatif à partir d'une radiance TOA et d'un modèle de correction atmosphérique	Correction de l'absorption de la vapeur d'eau par différence de températures de brillance entre deux bandes adjacentes
Forces	Applicable même si une seule bande est retenue ; cadre radiatif explicite ; compatible avec SBAC / L-SBAC pour paramètres pixel-à-pixel	Robustesse accrue aux effets de la vapeur d'eau via l'absorption différentielle ; très utilisée pour <i>TSM</i> et T_s
Performances	Comparaison bandes 10–11 pour SC : RMSE $\pm 1,4 \text{ K}$ (JM) vs $\pm 0,7 \text{ K}$ (SBAC) et $\pm 0,6 \text{ K}$ (L-SBAC) sur leur base de validation	RMSE commun $\pm 2,0 \text{ K}$ pour trois approches SW testées dans le cas d'étude de Galve et al
Points d'attention	Sensibilité à l'émissivité ($1 \% \rightarrow 0,3\text{--}0,7 \text{ K}$ selon conditions) et dépendance aux variables atmosphériques	Forte dépendance possible aux paramètres (coefficients, w , $\Delta\varepsilon$) ; nécessite qualité des deux bandes et séparation terre/mer bien définie

Méthodes de conversion de la radiance en températures

Les capteurs thermiques satellitaires mesurent une radiance spectrale au niveau du capteur. La conversion de cette radiance en température de surface nécessite plusieurs étapes de traitement. Dans un premier temps, les valeurs numériques brutes enregistrées par le capteur sont converties en radiance à l'aide des coefficients de calibration fournis avec les données (Benmecheta, 2016). Ensuite, la radiance mesurée est convertie en température de brillance par inversion de la loi de

Planck. Cette température correspond à celle d'un corps noir qui émettrait la même radiance que celle observée par le capteur. Toutefois, la température de brillance n'est pas égale à la température réelle de la surface, car elle ne tient pas compte de l'émissivité de la surface ni des effets atmosphériques (Becker & Li, 1990).

La conversion des radiances mesurées en températures nécessite des algorithmes adaptés. Pour la mesure de la TST, on utilise classiquement l'algorithme *split-window* : il combine deux canaux thermiques (≈ 11 et $12 \mu\text{m}$) pour corriger l'atmosphère en exploitant la différence d'absorption de la vapeur d'eau (Price, 1984 ; Becker & Li, 1990). Ce procédé fut d'abord proposé pour la TSM (Price, 1984) et atteint ~ 1 K de précision (Walton et al., 1998), puis étendu au TST (Becker & Li, 1990 ; Coll et al., 1994). En l'absence de deux bandes (ex. Landsat « *TM/ETM+* »), on applique un algorithme mono-canal en assumant une émissivité supposée ou déduite par l'indice de végétation ou *NDVI* (Wan, 1999 ; Sobrino et al., 2004). Les nouvelles approches physique (ex. *Temperature Emissivity Separation (TES)*) extraient simultanément la TST et l'émissivité spectrale des mesures multi-bandes (Gillespie et al., 1998). Pour la TSM, les algorithmes infrarouges (IR) corrigent aussi les gaz atmosphériques et appliquent souvent des coefficients empiriques ajustés sur bouées in situ (Walton et al., 1998 ; Kilpatrick et al., 2015). Il faut noter que la TSM satellitaire correspond à la température de la « peau » océanique (de quelques mm de surface) (Donlon et al., 2007), généralement un peu plus froide que la TSM mesurée en profondeur, en particulier sous fort ensoleillement. Dans tous les cas, la qualité des TST/TSM dépend de l'émissivité de surface (complexe pour la végétation et la mer), de la couverture nuageuse, et des conditions angulaires d'observation (Li et al., 2013 ; Sobrino et al., 2004).

1.5.2.16 Chaîne logicielle de traitements d'images satellites

L'estimation de la TST et de la TSM à partir d'images satellitaires ne se limite pas à l'application d'une unique formule mathématique. Elle repose sur une chaîne de traitement structurée, combinant des étapes de prétraitement, de correction, de calcul et d'analyse spatiale. La mise en œuvre de cette chaîne nécessite le recours à des logiciels spécialisés, capables de manipuler les données raster, d'appliquer des modèles de transfert radiatif et de produire des cartes thématiques exploitables (Benmecheta, 2016). Le choix de la chaîne logicielle dépend de plusieurs facteurs suivants :

- a. La complexité des traitements,
- b. Le volume de données,
- c. Le niveau d'automatisation souhaité,
- d. Les compétences techniques de l'utilisateur.

La chaîne de traitement doit permettre à la fois une analyse fine des contrastes thermiques continentaux (via Landsat) et une prise en compte des spécificités du milieu. Cette section présente un état de l'art des principales méthodes logicielles utilisées en télédétection thermique, en distinguant les solutions « clé en main » à interface graphique et les environnements de programmation offrant une flexibilité accrue.

Les logiciels de traitement d'images dédiés à la télédétection constituent la première famille d'outils mobilisables. Ils intègrent nativement des fonctions de calibration radiométrique, de correction atmosphérique et de calcul d'indices, ce qui les rend particulièrement adaptés à une mise en œuvre rapide et reproductible des protocoles standardisés.

Logiciel SNAP (Sentinel Application Platform),

Ce logiciel est développé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA), est un logiciel de référence, notamment pour le traitement des données Sentinel. Bien que destiné en priorité aux missions Sentinel, *SNAP* intègre des boîtes à outils (*toolboxes*) pour l'analyse optique et thermique, et sa compatibilité avec les données Landsat est assurée via des modules complémentaires. Il permet d'enchaîner les opérations de rééchantillonnage, de calcul d'indices spectraux et d'extraction de paramètres biophysiques (ESA, 2021).

Logiciel ENVI (Environment for Visualizing Images)

Ce logiciel occupe une place prépondérante. Il est largement cité dans la littérature pour sa capacité à effectuer des corrections atmosphériques avancées via des modules tels que *FLAASH* (ITT, 2007). *FLAASH*, basé sur le code de transfert radiatif *MODTRAN*, permet de corriger les effets des gaz et des aérosols sur les bandes optiques (visible à infrarouge court-ondes), une étape indispensable pour obtenir des réflectances de surface fiables. Le manuel *FLAASH* précise que cet outil nécessite la connaissance de paramètres d'entrée tels que le modèle atmosphérique, le type d'aérosol et la visibilité, et qu'il intègre une modélisation de l'effet d'adjacence, particulièrement important dans les zones à fort contraste comme les interfaces terre-mer (ITT, 2007). Pour le domaine thermique, *ENVI* propose également des outils de correction atmosphérique dédiés, complétant ainsi l'écosystème nécessaire à l'estimation de la TST.

Logiciel de systèmes d'information géographique (SIG)

Les systèmes d'information géographique (SIG) à vocation généraliste, tels que *ArcGIS Pro* ou *QGIS*, ont considérablement évolué et intègrent désormais des fonctionnalités avancées de traitement d'images. Le module *Image Analyst* d'*ArcGIS Pro* permet d'appliquer des corrections radiométriques, de calculer des indices (*NDVI*, albédo) et de classifier des images satellites. *QGIS*,

grâce à sa flexibilité et à sa communauté, offre l'accès à de nombreux plugins (ex. *Semi-Automatic Classification Plugin*) qui automatisent le téléchargement, le prétraitement et la classification d'images Landsat et Sentinel (Kshetri & Dahal, 2024). Ces outils SIG sont particulièrement utiles pour les étapes finales de la chaîne de traitements cartographiques (reprojection, mosaïquage, découpage et production cartographique).

Tableau 5: Synthèse comparative des chaînes logicielles pour le traitement d'images thermiques (d'après Benmecheta, 2016 ; ITT, 2007 ; ESA, 2021 ; Kshetri & Dahal, 2024 ; GeeksforGeeks, 2024 ; Zhang et al., 2020 ; Gorelick).

Chaîne logicielle	Type d'interface	Forces principales	Limites potentielles	Adéquation à l'étude de cas
SNAP	Graphique (GUI)	Gratuit, dédié aux missions ESA (Sentinel), bonnes fonctionnalités optiques.	Moins optimisé pour Landsat, courbe d'apprentissage pour les traitements thermiques.	Adapté pour l'analyse conjointe Landsat/Sentinel-2 (indices, occupation du sol).
ENVI	Graphique (GUI) + Modélisateur	Correction atmosphérique FLAASH/MODTRAN intégrée, outils thermiques, robuste et éprouvé.	Coût de licence élevé, nécessite une machine performante pour gros volumes.	Très adapté pour les étapes de correction et l'extraction TST précise.

1.6 Analyse de la TST et de la TSM

1.6.1 Analyse descriptive et cartographique

Les fichiers méthodologiques recommandent d'associer aux cartes TST/TSM des indicateurs statistiques (biais, dispersion, erreurs) et des classifications spatiales permettant d'identifier des zones relatives de chaleur et de fraîcheur (Marchal et al., 2022 ; Galve et al., 2022). Dans la démarche méthodologique du CERFO (Centre d'Enseignement et de Recherche en Foresterie), organisme québécois spécialisé dans la cartographie thermique par télédétection, la cartographie s'appuie sur un écart de température relatif et sur une classification en classes à l'échelle du territoire étudié, en rappelant que l'amplitude des classes varie selon les régions et impose une interprétation contextualisée (Marchal et al., 2022).

1.6.2 Analyse de l'îlot de chaleur

Sakhy et al. (2011) définissent l'îlot de chaleur urbain (ICU) comme un écart de température ΔT entre le centre urbain et la campagne environnante (définition attribuée à Oke), et indiquent que sa formation est favorisée par des conditions synoptiques particulières (temps anticyclonique, nébulosité et vent faibles) (Sakhy et al., 2011). Ils relient l'intensité de l'ICU aux différences de surfaces (végétation/humidité plus faibles en ville, imperméabilisation), aux flux d'énergie (réduction du flux latent et augmentation relative du flux sensible), et à des variables urbanistiques et radiatives (géométrie urbaine, albédo) (Sakhy et al., 2011).

1.6.3 Analyse des tendances temporelles

La logique diachronique consiste à comparer des cartes TST sur une longue période, dans des conditions saisonnières comparables, pour isoler les tendances structurelles de l'urbanisation et de l'artificialisation (Hassani et al., 2020). Hassani et al. (2020) suggéraient un lien étroit entre la distribution spatio-temporelle des TST et l'artificialisation.

1.6.4 Relations avec NDVI, albédo et MNT

Sakhy et al. (2011) rapportent une relation entre végétation NDVI et températures de surface, et montrent que les zones à forte végétation correspondent à des endroits relativement frais, avec des résultats statistiques significatifs. Ils discutent également l'effet de la géométrie urbaine, notamment le SVF (*Sky View Factor* ou Facteur de Vue du Ciel), qui quantifie la proportion de ciel visible depuis la surface et conditionne le refroidissement radiatif nocturne en milieu urbain et du bâti (emprise au sol), dont les relations avec la température de surface sont testées statistiquement, ce qui renforce l'approche « TST + variables explicatives ».

La correction topographique et l'influence du rayonnement solaire incident sont documentées par Malbêteau et al. (2017) qui montrent que l'illumination (pente/orientation) et l'altitude structurent la TST et justifient l'usage couplé pour corriger les effets topographiques.

$$\frac{DEM + \text{modèle radiative}}{\text{énergétique}}$$

1.6.5 Modélisation de la TST et de la TSM

1.6.5.1 Analyse spatio-temporelle

La modélisation spatio-temporelle peut être appréhendée de deux façons dans les fichiers : (i) comme une analyse diachronique structurée (cartes multi-dates, tendances et attribution à

l'occupation du sol), et (ii) comme une estimation prédictive d'un indicateur thermique à partir d'un ensemble de variables explicatives (Hassani et *al.*, 2020, p. 2–3 ; Marchal et *al.*, 2022).

Modélisation physiquement fondée et corrections énergétiques/topographiques

Malbêteau et al. (2017) proposent une correction topographique de TST reposant sur un modèle de bilan d'énergie (*EB*) et sur deux variables structurantes : rayonnement solaire R_g simulé) et élévation E (MNT), avec une correction écrite comme suit :

$$T_{\text{corr,EB}} = T_{\text{ASTER}} + T_{\text{EB}}(E, R_g) - T_{\text{EB}}(\langle E \rangle, \langle R_g \rangle) \text{ dans des espaces TST-E et TST-}R_g.$$

Même si la zone n'est pas un massif montagneux, ces références justifient méthodologiquement l'intégration d'un MNT dans une modélisation littorale lorsque des gradients d'illumination, des falaises, des reliefs côtiers ou des gradients microclimatiques existent (reliefs locaux non spécifiés dans les fichiers fournis) (Malbêteau et *al.*, 2017).

1.6.6 Limites de la télédétection

Malgré ses nombreux avantages, la télédétection de la TST et de la TSM présente certaines limites. L'estimation de la TST reste sensible à la correction des effets atmosphériques et à la variabilité de l'émissivité de surface, particulièrement en milieux hétérogènes (Becker & Li, 1990 ; Benmecheta, 2016). Pour la TSM, la couverture nuageuse et la différence entre la température de la « peau » de l'océan et celle des couches sous-jacentes constituent des sources d'incertitudes (Minnett et *al.*, 2019). Néanmoins, les avancées méthodologiques, l'amélioration de la calibration radiométrique des capteurs et l'intégration multi-capteurs ont permis de réduire ces incertitudes, renforçant ainsi l'intérêt du recours à la télédétection. En définitive, la télédétection thermique constitue un outil essentiel pour l'étude de la TST et de la TSM. Elle offre une couverture spatiale étendue, une répétitivité temporelle élevée et une capacité d'analyse multi-échelles qui complètent efficacement les mesures in situ. Les nombreux travaux internationaux démontrent que la télédétection permet aujourd'hui une compréhension approfondie des dynamiques thermiques de la surface terrestre et marine, faisant de la TST et de la TSM des variables clés dans les études environnementales et climatiques contemporaines.

Malgré ces avancées, plusieurs limites subsistent dans l'estimation de la TST et TSM. Pour la TST, la variabilité spatiale de l'émissivité, l'hétérogénéité des surfaces et la complexité des milieux urbains constituent encore des sources majeures d'incertitude (Li et *al.*, 2017). Les effets atmosphériques, notamment la vapeur d'eau et les aérosols, compliquent également les corrections nécessaires à l'extraction du signal thermique (Guillevic et *al.*, 2019). Concernant la TSM, des difficultés persistent liées à la couverture nuageuse, à l'effet de peau thermique et aux écarts entre

les mesures satellitaires et les observations in situ, ce qui nécessite des procédures de validation rigoureuses (Donlon et *al.*, 2018 ; Merchant et *al.*, 2019).

Les travaux déjà réalisés à l'échelle mondiale montrent que la télédétection constitue un outil essentiel pour l'étude de la TST et TSM. Les avancées récentes ont permis d'améliorer significativement la précision des estimations, mais les limites persistantes soulignent la nécessité de poursuivre les recherches, notamment en matière de correction atmosphérique, de caractérisation de l'émissivité et de validation des produits satellitaires (Zhang et *al.*, 2020).

1.7 Conclusion

La synthèse bibliographique présentée dans ce chapitre met en évidence l'importance croissante de la télédétection thermique comme outil privilégié pour l'estimation et l'analyse de la TST et SST. Les avancées technologiques réalisées dans le domaine des capteurs satellitaires, notamment Sentinel-3 et Landsat, ont considérablement amélioré la précision et la résolution des mesures thermiques, offrant ainsi des possibilités d'analyse à différentes échelles spatiales et temporelles.

En milieu marin, la *SST* représente une variable fondamentale pour la compréhension des échanges thermiques entre l'océan et l'atmosphère, la surveillance des phénomènes climatiques globaux tels qu'*El Niño* et *La Niña*, ainsi que pour le suivi des courants océaniques et des anomalies thermiques marines. La relative homogénéité de l'émissivité de l'eau de mer facilite l'estimation de la *SST* par télédétection, avec une précision généralement inférieure à $\pm 1^\circ\text{K}$ dans des conditions atmosphériques favorables (McClain et *al.*, 1985 ; Donlon et *al.*, 2007).

En milieu terrestre, la *LST* constitue un indicateur essentiel pour la détection et l'analyse des îlots de chaleur et de fraîcheur, phénomène directement lié à l'artificialisation des surfaces et à la réduction de la couverture végétale. Les études recensées montrent que la télédétection thermique permet de cartographier avec précision les contrastes thermiques entre zones urbaines, agricoles et naturelles, et d'identifier les îlots de fraîcheur associés aux espaces végétalisés et aux plans d'eau. La corrélation négative entre la *LST* et le *NDVI*, largement documentée dans la littérature, confirme le rôle modérateur de la végétation sur les températures de surface et souligne l'intérêt d'intégrer les indices spectraux dans l'analyse thermique (Sakhy et *al.*, 2011 ; Weng et *al.*, 2004).

Dans les zones littorales, l'analyse conjointe de la *LST* et de la *SST* revêt un intérêt particulier, car elle permet d'étudier les gradients thermiques terre-mer, les interactions entre les surfaces continentales et marines, et leurs implications sur les dynamiques climatiques locales. Cependant, cette analyse impose des contraintes méthodologiques spécifiques, notamment en matière de

correction atmosphérique, de gestion des pixels mixtes à l'interface terre-mer et de caractérisation de l'émissivité des différentes surfaces.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre présente étude, qui vise à cartographier et analyser les îlots de chaleur et de fraîcheur de la zone côtière (marine et littorale) de Mostaganem, en combinant les données thermiques du Sentinel-3 et Landsat-8/9 et, et en appliquant les méthodes de correction et d'extraction de la *SST* et *LST*.

2 Chapitre 2. Matériels et méthodes

2.1 Présentation de la zone d'étude

2.1.1 Localisation géographique

La zone d'étude concerne la zone côtière (marine et littorale) ouest de Mostaganem, située au nord-ouest de l'Algérie (figure 5). Elle s'étend le long du littoral méditerranéen sur une frange côtière ouverte sur le Golfe d'Arzew, l'une des baies les plus importantes du bassin méditerranéen occidental algérien. Cette zone présente une configuration géographique particulièrement favorable à l'étude des contrastes thermiques terre-mer, en raison de la juxtaposition de surfaces continentales hétérogènes et d'une étendue marine significative.

La zone d'étude englobe quatre communes littorales : Mostaganem (chef-lieu de wilaya), Mazaghrane, Stidia et Fornaka. Elle est délimitée approximativement par les coordonnées géographiques suivantes :

- ✓ Latitude : 35°45'N – 36°05'N
- ✓ Longitude : 0°00'E – 0°20'E

La zone couvre le littoral ouest et son environnement marin s'étendant jusqu'à une distance de 15 km des côtes dans le Golfe d'Arzew. Les communes côtières de la zone d'étude sont caractérisées comme suit :

1. Mostaganem est le principal pôle urbain de la zone d'étude et le chef-lieu de la wilaya du même nom. Située à environ 360 km à l'ouest d'Alger, la ville occupe une position stratégique en promontoire sur la mer Méditerranée, entre l'embouchure du Cheliff à l'ouest et la baie de Mostaganem à l'est. Sa superficie communale est d'environ 50 km². La ville est caractérisée par une forte densité du bâti, une activité portuaire et industrielle importante, ainsi qu'une urbanisation croissante qui contribue significativement à l'amplification des îlots de chaleur et de fraîcheur,
2. Mazaghran est une commune à vocation mixte agricole et résidentielle, située à environ 12 km au sud-ouest de Mostaganem. Elle est caractérisée par une couverture végétale relativement importante, notamment des cultures maraîchères et des vergers irrigués, qui jouent un rôle modérateur sur les températures de surface. Sa position en retrait partiel du littoral lui confère des caractéristiques thermiques différentes de celles des communes directement exposées à la mer,

3. Stidia est une commune littorale à vocation touristique et balnéaire, située à environ 15 km à l'ouest de Mostaganem. Elle est caractérisée par la présence d'une plage de sable fin, d'un port de plaisance et d'une zone humide côtière. Cette configuration particulière génère des gradients thermiques complexes entre les surfaces sableuses, les zones végétalisées et la surface marine adjacente,
4. Fornaka est une commune rurale située à l'extrémité ouest de la zone d'étude, à proximité immédiate de l'embouchure de la Macta, l'une des zones humides Ramsar les plus importantes d'Algérie. Cette interface entre les eaux douces continentales et les eaux marines du Golfe d'Arzew constitue un gradient thermique remarquable pour l'analyse conjointe de la TST et de la TSM. La commune est dominée par des espaces naturels, des zones humides et des surfaces agricoles extensives.

2.1.2 Géomorphologie de la zone d'étude

La zone d'étude présente une géomorphologie côtière diversifiée, caractéristique des littoraux méditerranéens algériens du nord-ouest, combinant des formes de relief variées tant sur le plan terrestre que marin.

2.1.2.1 Zone marine

La zone marine adjacente présente un plateau continental relativement étroit, caractéristique du flanc oriental du Golfe d'Arzew. Les fonds marins s'approfondissent progressivement depuis le rivage vers le large, avec des profondeurs importantes. La faible profondeur au rivage favorise le réchauffement des eaux superficielles en période estivale et accentue les contrastes thermiques entre les eaux côtières et les eaux du large.

2.1.2.2 Géologie

La zone d'étude s'inscrit dans un contexte géologique complexe, caractéristique de la région nord-occidentale de l'Algérie, marquée par l'histoire tectonique de la chaîne alpine maghrébine et de la marge continentale méditerranéenne (Wildi, 1983 ; Vila, 1980).

La zone marine adjacente appartient à la marge continentale algérienne, caractérisée par un plateau continental étroit et une pente continentale relativement abrupte. Les fonds marins de la zone d'intérêt sont principalement constitués de :

- a. Sédiments détritiques côtiers : sables et graviers d'origine continentale, transportés par les oueds et redistribués par les courants littoraux le long de la côte. Ces sédiments grossiers dominent dans la zone de déferlement et le proche littoral,

- b. Sédiments fins : vases et argiles se déposent dans les zones plus profondes et abritées du Golfe d'Arzew, notamment dans les secteurs à faible énergie hydrodynamique. Ces sédiments fins, riches en matière organique, influencent la turbidité des eaux côtières et peuvent affecter indirectement l'estimation de la TSM par télédétection en modifiant les propriétés optiques et thermiques des eaux superficielles,
- c. Apports de l'oued Macta : l'embouchure de la Macta constitue une source importante d'apports terrigènes dans le Golfe d'Arzew, générant un panache sédimentaire détectable sur les images satellitaires et susceptible d'influencer localement les valeurs de TSM mesurées dans cette zone marine.

2.1.2.3 Zone continentale

Sur le plan topographique, la zone d'étude est caractérisée par un relief modéré, organisé en trois entités morphologiques distinctes orientées globalement du sud vers le nord :

- a. Les plateaux intérieurs : la partie méridionale de la zone d'étude est dominée par des plateaux ondulés d'altitude moyenne comprise entre 100 et 200 m, correspondant aux extensions septentrionales des hautes plaines oranaises. Ces plateaux sont incisés par un réseau hydrographique relativement dense dont les principaux oueds s'écoulent en direction de la mer,
- b. Les collines littorales : une frange de collines d'altitude comprise entre 50 et 150 m marque la transition entre les plateaux intérieurs et la côte. Ces collines présentent des pentes modérées à fortes (5 à 25%) et sont localement entaillées par des vallées encaissées. La ville de Mostaganem est précisément implantée sur l'une de ces collines en promontoire dominant directement la mer,
- c. La plaine littorale : une étroite bande de plaine côtière, d'altitude inférieure à 20 m, s'étend de part et d'autre du littoral, particulièrement développée au niveau de Stidia et de l'embouchure de la Macta à l'ouest de Fornaka. Cette plaine littorale est le siège des principales activités agricoles irriguées et constitue une zone de transition thermique importante entre les surfaces continentales et marines.

2.1.2.4 Géologie

Sur le plan structural, la zone d'étude appartient à la domaine tellien, correspondant aux zones externes de la chaîne alpine nord-africaine. Les formations géologiques affleurantes sont organisées en plusieurs unités lithostratigraphiques, du plus ancien au plus récent :

- a. Les formations mésozoïques : des affleurements de calcaires et de marnes du Crétacé constituent le substrat géologique de base dans la partie méridionale de la zone d'étude. Ces formations, généralement compactes et perméables, jouent un rôle important dans la recharge des nappes phréatiques locales et conditionnent indirectement les propriétés thermiques des sols sus-jacents,
- b. Les formations tertiaires : des dépôts de marnes, d'argiles et de grès d'âge Miocène et Pliocène occupent une large part de la zone d'étude, notamment au niveau des plateaux et des collines littorales. Ces formations, à dominante argileuse, présentent une forte capacité de rétention hydrique et une inertie thermique élevée, ce qui influence directement les valeurs de TST mesurées par télédétection,
- c. Les formations quaternaires : des dépôts alluviaux récents (sables, graviers, limons) comblent les fonds de vallées et la plaine littorale, notamment au niveau de l'embouchure de la Macta et des plages de Stidia. Ces formations meubles, souvent riches en matière organique dans les zones humides, présentent des propriétés thermiques et radiatives spécifiques qui se traduisent par des signatures thermiques distinctives sur les images satellitaires. Les dunes côtières sableuses, présentes localement entre Stidia et Fornaka, constituent quant à elles des surfaces à très forte variabilité thermique diurne en raison de leur faible capacité calorifique.

2.1.2.5 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique dans la zone littorale est organisé autour de plusieurs oueds à régime torrentiel méditerranéen, caractérisés par des écoulements irréguliers et des crues saisonnières. Les principaux cours d'eau sont :

- a. L'oued Ain Sefra et ses affluents, qui drainent la partie centrale de la zone littorale en direction de la mer,
- b. L'oued Macta, dont l'embouchure constitue la limite occidentale de la zone littorale et alimente la zone humide côtière de la Macta,
- c. Autres petits oueds côtiers intermittents qui se jettent directement dans la mer entre Mostaganem et Stidia.

2.1.2.6 Implications pour l'étude thermique

La diversité des formations géologiques de la zone d'étude se traduit par une hétérogénéité des propriétés thermiques et radiatives des surfaces, notamment en termes d'émissivité, de capacité calorifique et de conductivité thermique. Ces propriétés conditionnent directement les valeurs de

TST mesurées par les capteurs thermiques satellitaires et doivent être prises en compte dans l'interprétation des cartes thermiques produites dans cette étude.

2.1.3 Climat

Pour caractériser le climat de la zone d'étude, nous avons étudié les données climatiques de la région de Mostaganem enregistrées entre 2025 et 2026 par la plateforme *Climate-Data.org*, qui fournit des informations relatives aux températures moyennes, aux précipitations, aux diagrammes climatiques et à la température de l'eau. L'analyse s'est focalisée sur deux paramètres climatiques majeurs : la température de l'air et les précipitations. Ces variables constituent des facteurs essentiels dans l'interprétation de la dynamique thermique des surfaces, dans la mesure où elles contrôlent en partie l'humidité du sol, l'état de la végétation, les flux d'énergie surface-atmosphère et, par conséquent, les variations spatio-temporelles de la TST et TSM (Benmecheta, 2016 ; Teteka Mutondo et *al.*, 2020).

2.1.3.1 Données thermiques

L'analyse des données thermiques montre que la température moyenne annuelle de l'année écoulée (2025) est de 18,3 °C, avec une amplitude thermique annuelle d'environ 16 °C. La température maximale est observée en mois d'août avec 26,9 °C, tandis que la température minimale est enregistrée en mois de janvier avec 10,9 °C. Ces valeurs confirment un climat relativement modéré, typique des régions littorales méditerranéennes, influencé par l'inertie thermique de la mer Méditerranée. La période estivale (de juin à septembre) est marquée par des températures supérieures à 24 °C, avec un pic en mois d'août. Ce mois est particulièrement chaud, avec des températures maximales avoisinant les 27 °C. À l'opposé, la période hivernale (de décembre à février) présente des températures plus fraîches, avec des valeurs minimales souvent proches de 10 °C, mais jamais inférieures à 7 °C. Cette faible amplitude thermique s'explique principalement par l'effet régulateur de la mer, qui modère les températures extrêmes pendant l'été et l'hiver (McClain et *al.*, 1985 ; Donlon et *al.*, 2007). Les mois de mars à mai et d'octobre à novembre sont des périodes de transition, où la température commence à augmenter après l'hiver ou à baisser avant l'été. Cependant, les températures restent globalement modérées et ne varient pas de manière significative. L'analyse montre la répartition saisonnière de la température est typique des régions méditerranéennes, qui est caractérisée par un été chaud et un hiver modéré.

Les caractéristiques climatiques de Mostaganem ont une influence directe sur la dynamique de la TST. En période estivale, la forte chaleur combinée à la sécheresse réduit l'humidité du sol et la couverture végétale, entraînant une augmentation de la TST. À l'inverse, durant l'hiver, les précipitations abondantes et la réduction des températures provoquent une baisse de la TST. Cette

dynamique saisonnière de la température de surface est donc en grande partie contrôlée par l'humidité du sol, la végétation, ainsi que par l'interaction complexe entre l'atmosphère et la surface terrestre. En outre, la variabilité des précipitations joue également un rôle clé dans la gestion de l'eau et la vulnérabilité des écosystèmes locaux. En période de sécheresse, la TST augmente, ce qui peut avoir des conséquences sur l'agriculture et la gestion des ressources en eau, tandis que la période humide permet de réduire les TST et de recharger les nappes phréatiques, créant ainsi des conditions favorables à la croissance végétale.

2.1.3.2 Données hydriques

L'analyse des précipitations de l'année (2025) révèle une grande variabilité mensuelle, avec des fluctuations marquées entre la saison humide et la saison sèche. La moyenne mensuelle des précipitations est de 32,25 mm, mais avec des différences importantes d'un mois à l'autre. Le maximum observé est de 74 mm, enregistré en janvier (2026), tandis que le minimum est de 1 mm en août (2025). Cette forte variabilité s'explique par le caractère méditerranéen et semi-aride de la région. Les précipitations sont concentrées sur la saison froide, principalement entre novembre et mars, ce qui correspond à la période humide du climat méditerranéen. En décembre et janvier, les apports pluvieux sont les plus élevés, avec des pics de 74 mm (janvier 2026) et 46 mm (décembre 2025), ce qui permet une recharge en eau des sols et des nappes phréatiques. En revanche, pendant la période estivale, les précipitations sont quasi inexistantes, avec des valeurs proches de 1 mm en août 2025. Ce phénomène est typique des climats méditerranéens où l'été est sec et chaud, et l'hiver est plus humide. Les mois de septembre et octobre (2025) marquent également une transition, où les précipitations commencent à augmenter légèrement après la sécheresse estivale. Cependant, la pluviométrie reste globalement faible, et les mois secs peuvent parfois s'étirer jusqu'à la fin de l'automne.

2.1.3.3 Relation entre les données climatiques

L'analyse croisée des données thermiques et hydriques montre une relation inverse claire entre les deux paramètres. En effet, les périodes de températures élevées sont généralement associées à de faibles précipitations, comme c'est le cas pendant la saison estivale, de juin à septembre. Durant ces mois, l'absence de pluie et la chaleur intense créent des conditions de sécheresse qui affectent la végétation et l'humidité du sol. En revanche, durant la période hivernale, les températures plus basses sont accompagnées d'une augmentation des précipitations, notamment entre novembre et février. Ce phénomène renforce l'idée que les précipitations jouent un rôle important dans la régulation de la température de surface, particulièrement en hiver, où l'humidité du sol et la couverture végétale jouent un rôle crucial dans l'atténuation des variations de température. Cette

relation inverse entre température et précipitations est caractéristique des climats méditerranéens et influence directement les processus climatiques locaux. Elle est particulièrement visible dans les périodes de transition, lorsque des périodes de pluie entraînent une baisse rapide des températures, comme observé en octobre et mars 2025.

2.1.3.4 Conclusion sur le climat

L'analyse permet de qualifier le climat de la zone de climat méditerranéen semi-aride. Ce type de climat se caractérise par des étés chauds et secs, avec des températures maximales pouvant atteindre 26-27 °C en plein été, et des hivers doux et modérément pluvieux. La mer Méditerranée joue un rôle modérateur sur les températures, ce qui atténue les températures extrêmes pendant l'été et l'hiver. La forte saisonnalité des températures et des précipitations est typique des régions méditerranéennes, où les périodes sèches estivales sont séparées des périodes plus humides et fraîches de l'hiver. Le rôle de la mer dans l'atténuation des extrêmes thermiques est particulièrement important dans cette zone littorale, où les températures sont plus modérées que dans les zones continentales plus éloignées de la mer. L'humidité atmosphérique, quant à elle, joue un rôle essentiel dans la régulation des températures de surface et des conditions climatiques locales.

2.2 Approche méthodologique utilisée

Pour cartographier la température de surface de la zone d'étude, nous avons utilisé une approche géomatique basée sur l'emploi des logiciels SIG, documents cartographiques et d'images satellitaires.

2.2.1 Levé topographique

Nous avons utilisé le logiciel *ArcGis* 10.8, les cartes topographiques au 1/25.000^e, le modèle numérique de terrain (MNT) généré à partir de l'image *DEM* (*digital elevation model*) acquis en date 11/02/2000 par le satellite *SRTM* (*Shuttle Radar Topography Mission*) (disponible sur : <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) et l'image bathymétrique *GEBCO* (*General Bathymetric Chart of the Oceans*) acquise en date 13/07/2025 (disponible sur : <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry>).

A l'aide des outils *arctoolbox* du logiciel *ArcGis* (*georeferencing, extraction by mask, focal statistic, aspect, slope, raster to polygon, reclassify et reproject*), nous avons géoréférencé les cartes topographiques dans le système de géodésie mondiale (*World Geodetic system* : *WGS1984*), projection *Universal Transverse de Mercator* (*UTM*) et zone 31Nord. Puis, nous avons découpé les cartes géoréférencées et les images selon l'emprise de la zone d'étude (zone marine et littorale). Ensuite nous avons calculé, reclassifier et reprojeter les classes bathymétriques et d'altitudes de

terrain pour quantifier les surfaces des classes d'indices topographiques. Les méthodes ont permis de réaliser une carte hypsométrique (marine et continentale) et géomorphologique terrestre (pentes et expositions) comme montre les figures 7, 8 et 9.

2.2.2 Occupation du sol

La carte de l'occupation du sol littoral a été réalisée à l'aide des méthodes SIG et de traitement d'images Sentinel-2. Pour ce faire, nous avons traité quatre (4) images Sentinel-2 acquises entre le mois de janvier et avril 2025. Les images Sentinel-2 ont été téléchargées à partir du site de l'*European Space Agency (ESA)* (<https://dataspace.copernicus.eu/>). Nous avons choisi le niveau de correction *L2A* car ces images corrigées bénéficient de corrections géométriques et atmosphériques préalables permettant leur exploitation directe dans les analyses thématiques portant sur la couverture du sol (Dupuy & Gaetano, 2019 ; Béchet et *al.*, 2017). Les images Sentinel-2 ont été traitées à l'aide du logiciel *ArcGis 10.8*.

Plusieurs méthodes de traitements d'images (géométrique, radiométrique, segmentation, classification et de calcul d'indices spectraux) ont été appliquées à l'aide de l'outil *GEOclassifier-1.2.3-win32* implémenté sur le logiciel *ArcGis*. Les fonctionnalités de cet outil ont démontré leur efficacité pour la cartographie précise de l'occupation du sol (Achbun et *al.*, 2011). L'outil implémente une classification automatique orientée-objet (ou dirigée), basée sur des méthodes d'apprentissage supervisé, notamment l'algorithme du maximum de vraisemblance. Pour optimiser la précision cartographique, des données complémentaires issues des interfaces d'images satellites Google Earth et Bing Microsoft ont été intégrées au SIG, apportant une valeur ajoutée significative à l'analyse (Sitayeb & Benabdeli, 2008). Pour préparer la classification et l'interprétation des images satellitaires, quatre indices spectraux ont été calculés à savoir *NDVI* pour la végétation, *NDWI* pour l'eau, *SAVI* pour le sol et *NDBI* pour l'urbain. Ces indices fournissent des informations discriminantes supplémentaires (Ducrot, 2005) facilitant l'observation, l'interprétation et la classification des images en classes thématiques. La carte d'occupation du sol littoral a été réalisée selon la typologie *Corine Land Cover (CLC)*, adaptée aux catégories thématiques du bassin méditerranéen (Beltrame et *al.*, 2015). Cette base européenne d'occupation biophysique des sols, issue de l'interprétation visuelle d'images satellitaires (Oncea, 2014), intègre les composantes géométriques et attributives pour caractériser les classes d'occupation du sol (Sparfel, 2010).

2.2.3 Etude du climat

Nous avons utilisé trois logiciels à savoir le logiciel *SNAP*, *ENVI 5.3* et *ArcGis 10.8*. Le logiciel *SNAP* traite les images Sentinel-3 utilisées dans l'étude. Il permet d'enchaîner les opérations de ré échantillonnage, de calcul d'indices spectraux et d'extraction de paramètres biophysiques (ESA,

2021). Le logiciel *ENVI* permet la réalisation d'opérations de traitement d'images Landsat-8 utilisées dans l'étude telles que la correction radiométrique et atmosphérique (ESA, 2020). Le logiciel *ArcGIS* permet notamment la superposition de couches d'information, le calcul de surfaces, l'extraction de statistiques spatiales et la modélisation territoriale (Longley et al., 2015).

Pour suivre l'évolution spatiotemporelle de la température de surface durant la période d'étude, nous avons utilisés les images acquises en mois de janvier, mars, avril et mai 2026 par le capteur optique infrarouge *SLSTR* (*Sea and Land Surface Temperature Radiometer*) du Sentinel-3. Le radiomètre *SLSTR* est destiné à la mesure de la température de surface des océans et des terres émergées. Les produits de températures de surfaces issus du *SLSTR* sont caractérisés par une excellente stabilité radiométrique et une précision de l'ordre du demi-degré en moyenne (Ghent et al., 2024). Les bandes thermiques du Sentinel-3 (3,74 μm , 10,8 μm et 12 μm) de 1 km de résolution sont dédiées aux températures de surfaces (Donlon et al., 2012). Lors du téléchargement des images satellites, nous avons constaté que les images Sentinel-3 acquises en mois de février 2026 ont été bruitées par l'atmosphère. Pour estimer la température de ce mois, nous avons utilisé une image Landsat-8 acquise en date du 22 février 2026 par le capteur *TIRS* (*Thermal Infrared Sensor*). Les images ont été téléchargées à partir du site de l'ESA (*European Space Agency* : <https://dataspace.copernicus.eu/>) et de la Nasa (*United States Geological Survey* (USGS) : <http://earthexplorer.usgs.gov/>). Parmi les niveaux de correction d'images téléchargées, nous avons choisi le niveau 1 *TOA* (*Top of the Atmosphere*) car les valeurs des bandes utilisées représentent la réflectance enregistrée au niveau du capteur (USGS, 2020). Les images utilisées sont listées dans le tableau 6.

Tableau 6 : Liste des images satellites utilisées dans l'étude.

Image Sentinel-3 / Landsat-8	Année	Mois	Jour	Heure
S3A_SL_2_LST_2026_01_30.SEN3_reprojected.data	2026	janvier	30	10 ^h 34GMT
LC08_L1TP_198035_2026_02_22_T1_MTL.txt	2026	février	22	10 ^h 38GMT
S3A_SL_2_LST_2026_03_29_SEN3_reprojected.data	2026	mars	29	10 ^h 27GMT
S3A_SL_2_LST_2026_04_29_SEN3_reprojected.data	2026	avril	29	10 ^h 23
S3A_SL_2_LST_2026_05_22_SEN3_reprojected.data	2026	mai	25	10 ^h 27

La lecture des fichiers des données d'images montre que l'heure de passage des satellites sur la zone d'intérêt est vers 10^h34GMT.

Nous avons déterminé la température de surface marine (*SST*) et terrestre (*LST*) de la zone d'étude à partir des images thermiques du Sentinel-3 et Landsat-8. Les méthodes de télédétection appliquées

sur les images permettent de dériver d'abord les variables prédictives et ensuite la donnée de température (Bustinza et *al.*, 2022) et elles peuvent constituer une base crédible pour estimer la température de surface (Essalek et *al.*, 2019). Pour notre étude, nous avons utilisé la bande thermique B10 du capteur *TIRS* du Landsat-8 car la deuxième bande B11 présente des erreurs dues à des anomalies de la lumière parasite (Renard et *al.*, 2019). Cette bande thermique (B10) permet d'estimer la température de luminosité (Essalek et *al.*, 2019). Lors de notre interprétation, nous avons constaté que les images utilisées sont projetées en système *Universel Transverse de Mercator (UTM)* ce qui permet de les superposer à des cartes vectorielles exemple cartes topographiques et thématiques. Pour extraire les valeurs de température de surface, nous avons traité les images thermiques à l'aide du logiciel *SNAP* et *ENVI*. Le logiciel *ENVI* permet d'effectuer des traitements radiométriques et des corrections de base (Home, 2022). Il est riche en outils, tels que la calibration radiométrique, la correction atmosphérique et la normalisation de l'émissivité des bandes thermiques. Les traitements réalisés ont permis la visualisation, l'affichage multi-bandes des images Landsat-8 et Sentinel-3, la réalisation de compositions colorées (trichromie) et le calcul de l'indice de température de surface. Les méthodes de transformation des valeurs spectrales en températures de surface ont consisté d'utiliser d'algorithmes (ex. *Band Maths*) à partir desquels les valeurs d'émissivité de surface dans l'intervalle du thermique sont transformées en températures de surface exprimées en degré Celsius (Rubio, 1998 cité par Colin, 2006). Les valeurs d'émissivités radiométriques ont été traitées tel que décrit par Yu et *al.* (2014) afin d'obtenir une température du surface en degrés Celsius. Les images de températures de surfaces générées par le logiciel *SNAP* et *ENVI* ont été exportés sous format (.tif) compatible avec le logiciel *ArcGis* 10.8 pour qu'il soit finalisé en cartes de températures de surfaces, en tableaux statistiques et histogrammes de représentation des ilots de chaleurs et de fraîcheurs au sein de la zone d'étude.

2.2.3.1 Correction radiométrique

Le capteur *SLSTR* du Sentinel-3 dispose d'une visée double (nadir + arrière) ce qui a permis d'améliorer la correction atmosphérique et la calibration radiométrique des images Sentinel-3. Nous avons traité les images Sentinel-3 à l'aide du logiciel *SNAP*. Parmi les 21 bandes, nous avons utilisé les images *sea_surface_temperature_tx* et *LST* de 1 km de résolution, traitées à l'aide de l'approche *split windows* en fournissant des températures exprimées en degrés Kelvin (°K). Pour convertir, les températures en degrés Celsius, nous avons utilisé l'outil *Band Maths* du logiciel *SNAP* et *ENVI*. Dans la *Band Maths*, nous avons appliqué la formule de conversion sur les images traitées comme suit :

$$\checkmark \text{ sea_surface_temperature_tx} - 273.15 \text{ (image Sentinel-3),}$$

- ✓ LST -273.15(image Sentinel-3),
- ✓ B10-273.15 (image Landsat-8).

Ces méthodes ont permis de générer pour chaque mois une image de température de surface exprimée en °C comme montre les figures 1 et 2.

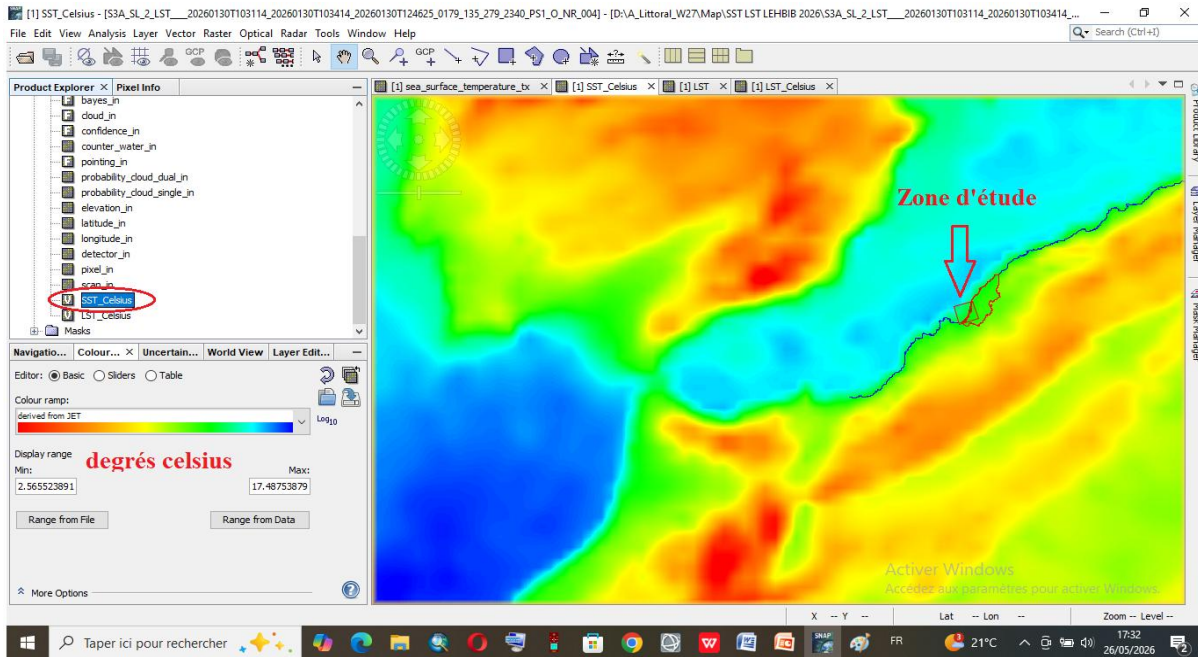


Figure 1: Image de SST en °C acquise en date du 30/01/2026 par le capteur STSTR du Sentinel-3.

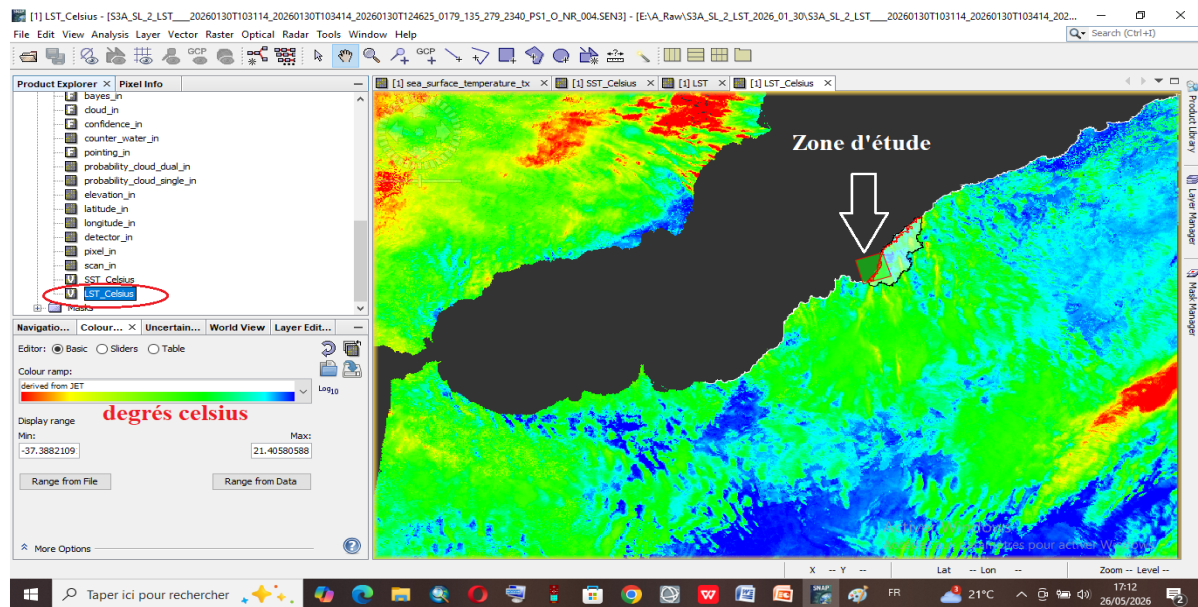


Figure 2: Image de LST en °C acquise en date du 30/01/2026 par le capteur STSTR du Sentinel-3.

Pour estimer la température de surfaces pour le mois de février 2026, nous avons traité l'image Landsat-8 à l'aide du logiciel ENVI. A l'aide des outils du ce logiciel (*Region of Interest "ROI"*, *Radiometric calibration* (ou calibration radiométrique), *Thermal Atmospheric correction*, *Emissivity Normalization* et *Band Maths*) nous avons découpé l'image selon l'emprise de la zone d'étude et la corriger sur le plan radiométrique et atmosphérique. Ces méthodes ont permis de générer pour le mois de février 2026 une carte de température de surface exprimée en degrés Celsius comme montre les figures 3 et 4.

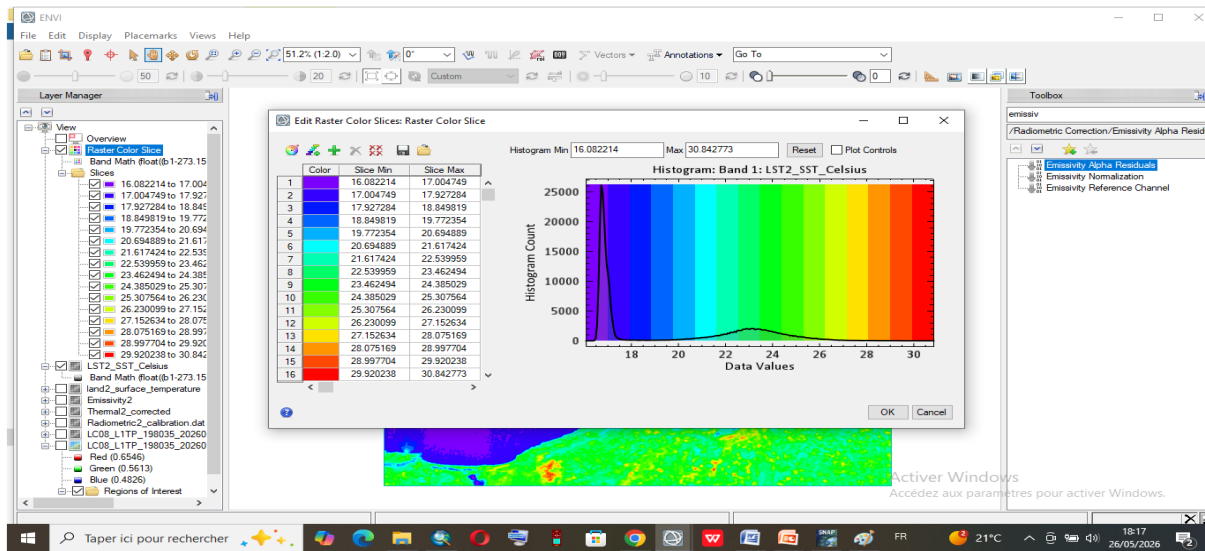


Figure 3 : Image de SST et LST en °C acquise en date du 22/02/2026 par le capteur thermique TIRS du Landsat-8.

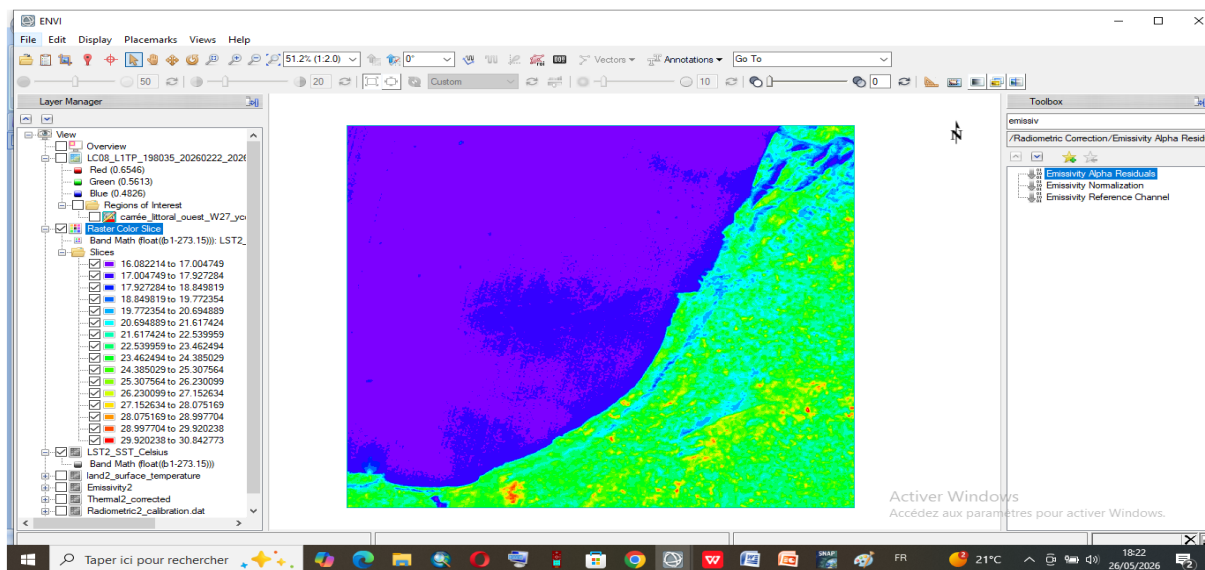


Figure 4: Image de SST et LST en °C acquise en date du 22/02/2026 par le capteur thermique TIRS du Landsat-8.

A l'aide de l'outil *Reclassify* du logiciel *ArcGis* 10.8, nous avons reclassifié les valeurs de températures en plusieurs catégories de températures d'intervalles moyens de 0,5°C.

3 Chapitre 3. Résultats et discussions

3.1 Analyse des résultats topographiques

L'approche géomatique utilisée dans notre étude a permis de réaliser une carte de localisation géographique de la zone d'étude (figure 5) et trois cartes d'indices topographiques comme montre les figures 6 et 7.

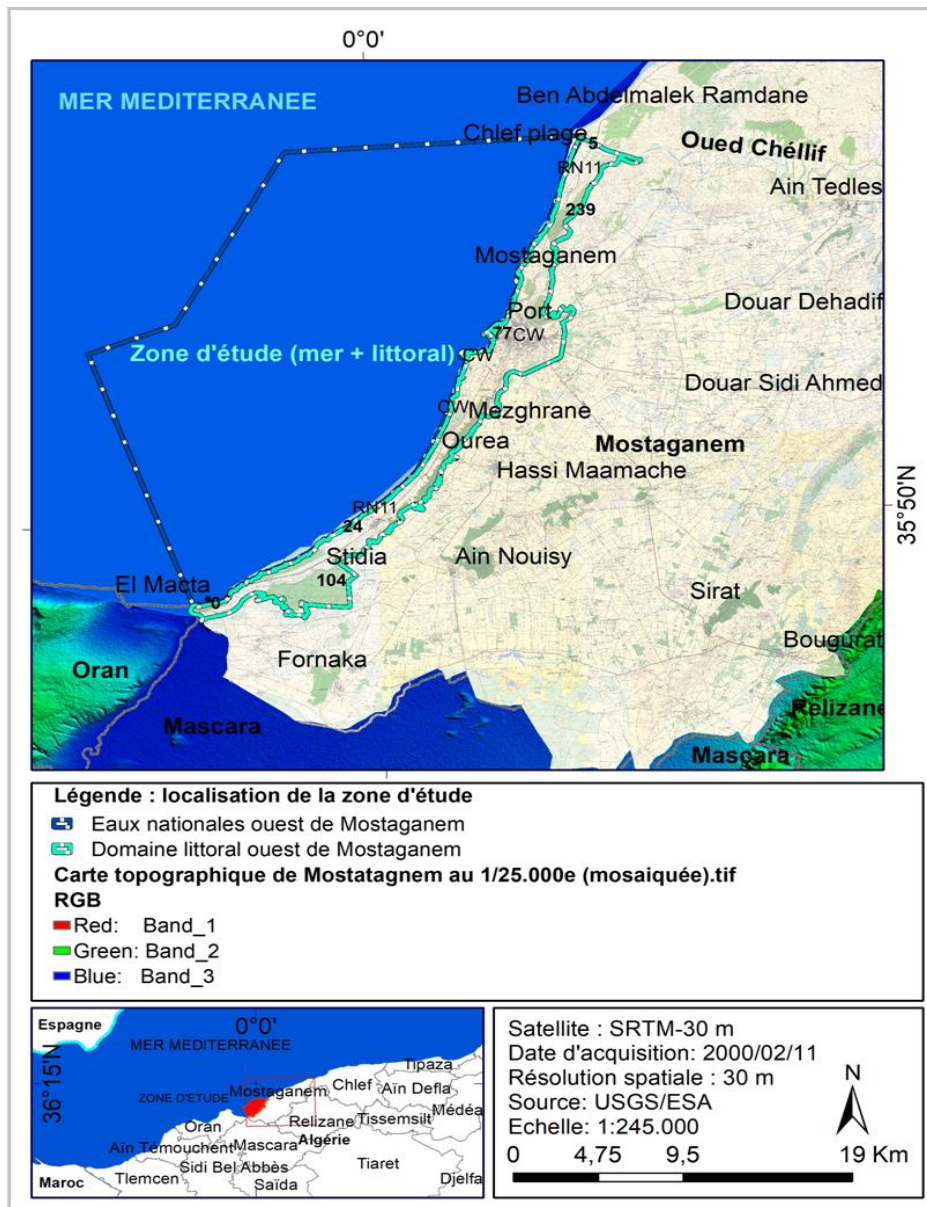


Figure 5 : Localisation géographique de la zone d'étude. Conception : (Farah & Lehibib©2026).

La figure 5 montre que la zone d'étude couvre une zone marine qui fait partie du sud de la méditerranée. Administrativement, cette zone marine appartenant aux eaux nationales placées sous

la juridiction nationale de l'Algérie. La zone marine s'étend sur une largeur de 12 Mille marin ce qui correspond 22 224 km et elle couvre une surface totale de 42 890 ha. Cette zone marine est protégée par la zone littorale ouest de la wilaya de Mostaganem.

La zone littorale ouest de Mostaganem, s'étend de la zone humide des Marais de la Macta à l'ouest vers la commune de Ben Abdelmalek Ramdane à l'Est, en traversant quatre (4) communes littorales de l'ouest à l'Est à savoir Fornaka, Stidia, Mazaghran et Mostaganem. La zone est délimitée au nord par la mer Méditerranée, à l'ouest par la wilaya d'Oran, au sud par le reste du territoire de la wilaya de Mostaganem et à l'Est par la commune de Abdel Malek Ramdane. La zone littorale couvre une superficie totale d'environ 7.262 ha, soit 34 % du total du littoral de la wilaya.

3.1.1 Relief

Les méthodes SIG appliquées à l'aide du logiciel ArcGis sur les images *DEM* et *GEBCO* ont permis de générer une carte bathymétrique pour la zone marine et un modèle numérique de terrain (MNT) pour la zone littorale (continentale) ouest de Mostaganem comme montre la figure 6.

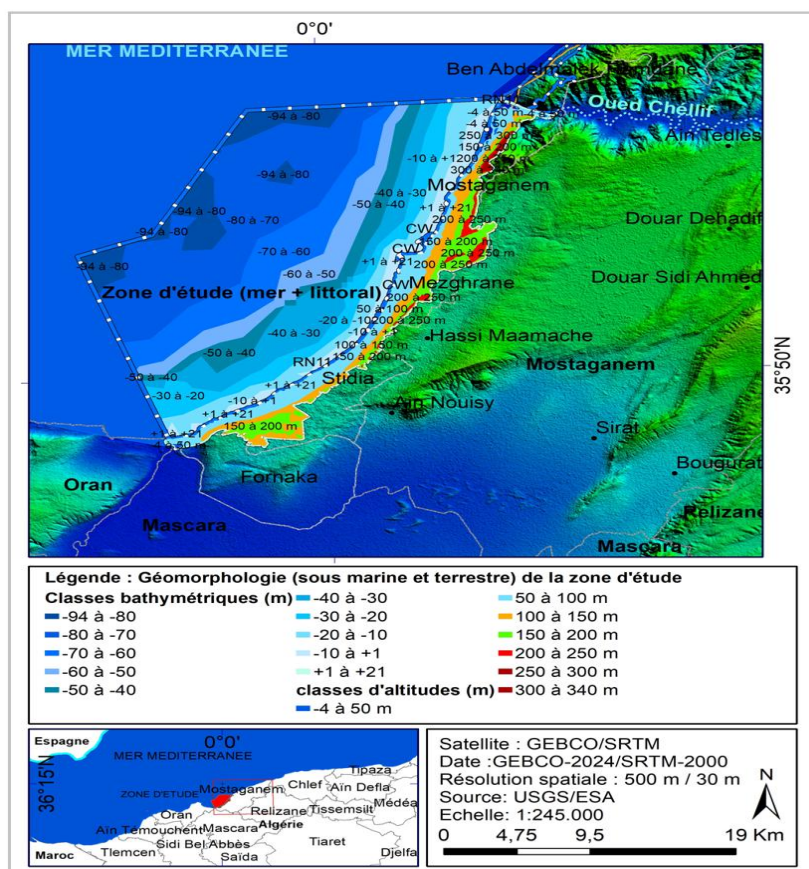


Figure 6: Carte hypsométrique (sous marine et terrestre) de la zone d'étude. Conception : (Farah & Lehibib©2026).

3.1.1.1 Zone marine

La figure 6 montre que la bathymétrie dans la zone marine varie entre 0 et – 94 mètres.

L'analyse statistique montre que la classe des fonds bathymétriques basses comprises entre 0 et -10 m est située au rivage c'est-à-dire au voisinage du littoral. Cette classe bathymétrique occupe une surface totale de 2 363 ha ce qui correspond à 5% du total de la zone marine. La classe bathymétrique supérieure comprise entre -80 et -94 m couvre une surface totale de 3 745 ha ce qui correspond à 85% du total de la zone marine. Les classes bathymétriques intermédiaires comprises entre -10 et -80 m occupent une surface totale de 36 579 ha ce qui correspond à 10% du total de la zone marine. L'analyse montre que la classe comprise entre -30 et -40 m couvre la plus grande surface, soit 4 695 ha ce qui correspond à 11% du total de la zone marine.

3.1.1.2 Zone continentale (littoral)

La figure 6 montre que l'altitude du terrain dans la zone littorale varie entre 0 et 340 m.

L'analyse statistique montre que la classe d'altitudes basses comprises entre 0 et 50 m est située au voisinage de la zone marine. Cette classe (0-50 m) occupe une surface totale de 50 ha ce qui correspond à 1% du total littoral. La classe d'altitudes supérieures comprise entre 300 et 340 m couvre une surface totale de 44 ha ce qui correspond à 1% du total littoral. Les classes d'altitudes intermédiaires comprises entre 50 et 300 m occupent une surface totale de 7 038 ha ce qui correspond à 98% du total littoral. L'analyse montre que la classe comprise entre 50 et 100 m couvre la plus grande surface, soit 2 789 ha ce qui correspond à 39% du total littoral.

Les méthodes SIG appliquées à l'aide du logiciel *ArcGis* sur les images MNT ont permis de générer une carte de pentes et d'expositions comme montre les figures 7 et 8.

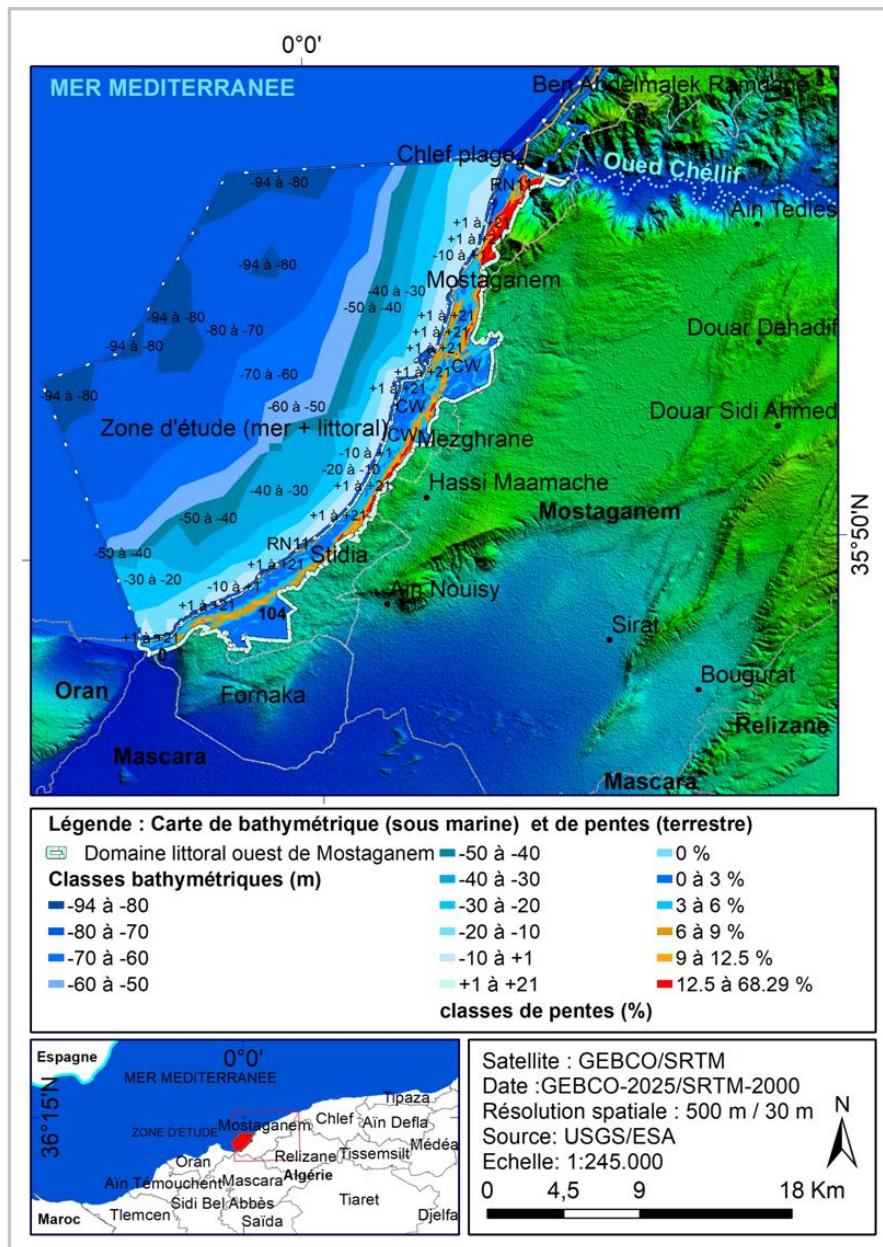


Figure 7 : Carte des pentes du terrain (continentale). Conception : (Farah & Lehbib©2026).

La figure 7 montre que la pente du terrain de la zone littorale varie entre 0 et 68,29 %.

L'analyse statistique montre que la classe de pentes basses comprises entre 0 et 3% occupent une surface totale de 2 767 ha ce qui correspond à 38 % du total de la zone littorale. La classe des pentes supérieures comprises entre 12.5 et 68.29 % couvre une surface totale de 988 ha ce qui correspond à 14 % du total de la zone littorale. Les classes des pentes intermédiaires comprises entre 3 et 9 % occupent une surface totale de 3 460 ha ce qui correspond à 48% du total de la zone littorale.

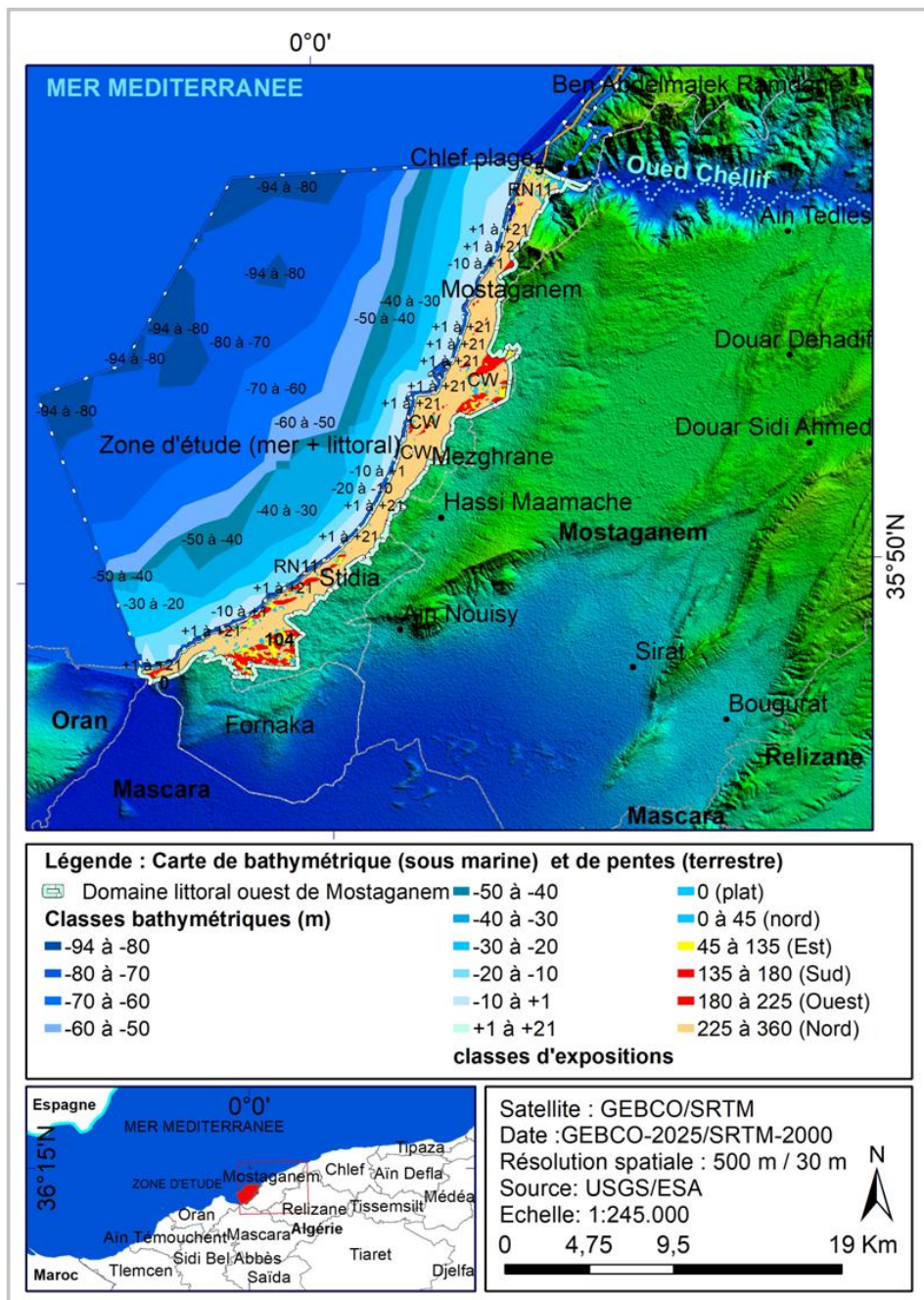


Figure 8: Carte d'expositions du terrain (continentale). Conception : (Farah & Lehbib©2026).

La figure 8 montre que la majorité du terrain est exposée au nord.

L'analyse statistique montre que la toute exposition ou les terrains plats occupent une surface totale de 3 ha. Les terrains exposés au nord couvrent une surface totale de 5 525 ha ce qui correspond à 76 % du total de la zone littorale. Les autres expositions (Est, sud et ouest) occupent une surface totale de 1 686 ha ce qui correspond à environ 24 % du total de la zone littorale.

3.1.2 Conclusion sur le milieu physique

Nos résultats montrent que la zone marine occupe une surface totale de 42 890 ha. Son fond marin varie entre 0 et -94 m dont 85% du total de l'eau sous marine sont situées sur des profondeurs comprises entre -80 et -94 m. Le reste soit 15% du total de l'eau est situé sur des profondeurs comprises entre -10 et -80 m.

La zone continentale couvre une surface totale de 7 262 ha. Son altitude varie entre 0 et 340 m dont les altitudes comprises entre 50 et 300 m couvrent 98% du total littoral. Plus de 85% du total littoral sont situés sur des pentes comprises entre 0 et 9% et plus de 75% du total littoral sont exposés au nord. Cela montre que la zone littorale est accessible aux humains et à leurs activités anthropiques (agricoles, urbaines, industrielles et touristiques).

3.2 Analyse des résultats thématiques

3.2.1 Occupation du sol

L'approche géomatique a permis de réaliser pour la zone continentale une carte d'occupation du sol selon le modèle *Corine Land Cover* « *CLC* ». C'est une carte moderne à la date (2025) comme le montre la figure 9.

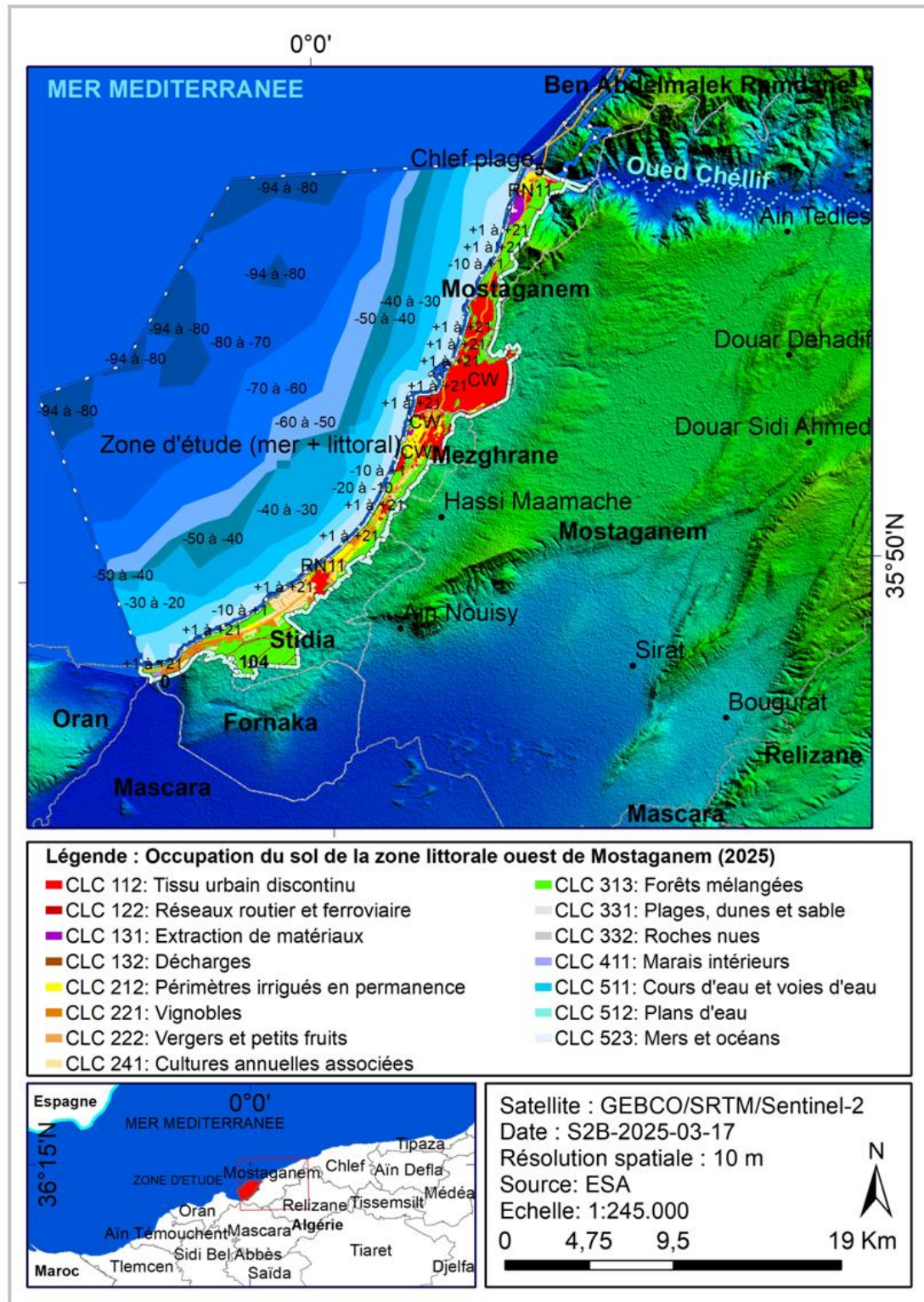


Figure 9 : Occupation du sol de la zone d'étude. Conception : (Farah & Lehbib©2026).

La figure 9 montre que la zone continentale est couverte par quinze (15) classes *CLC* thématiques regroupées en cinq (5) niveaux de territoires. Le niveau 1 regroupe les sols artificialisés (zones

urbaines, périurbaines, industrielles, touristiques et équipements associés). Le niveau 2 regroupe les terres agricoles (irriguées et en sec). Le niveau 3 représente les forêts, milieux semi-naturels et la végétation halophile. Le niveau 4 et 5 représentent respectivement les zones humides et les surfaces en eau libre permanente et saisonnière (plans d'eau, cours d'eau, mer,...etc.). La carte montre que les forêts occupent la plus grande surface, soit 2 900 ha ce qui correspond à 40% du total littoral. Les zones artificialisées couvrent une surface totale de 2 670 ha (37% du total littoral). Les terres agricoles occupent une surface totale de 1 584 ha (22% du total littoral). Les zones humides et les surfaces en eau libre occupent respectivement 84 ha et 24 ha. Ces terres humides représentent 1% du total de la zone littorale.

3.2.1.1 Milieu végétal (naturel)

Les méthodes de calcul de l'indice de végétation (IV, *NDVI*) appliquées sur l'image Sentinel-2 acquise en date du 17 mars 2026 ont permis de réaliser une carte d'indice de végétation comme montre la figure 10.

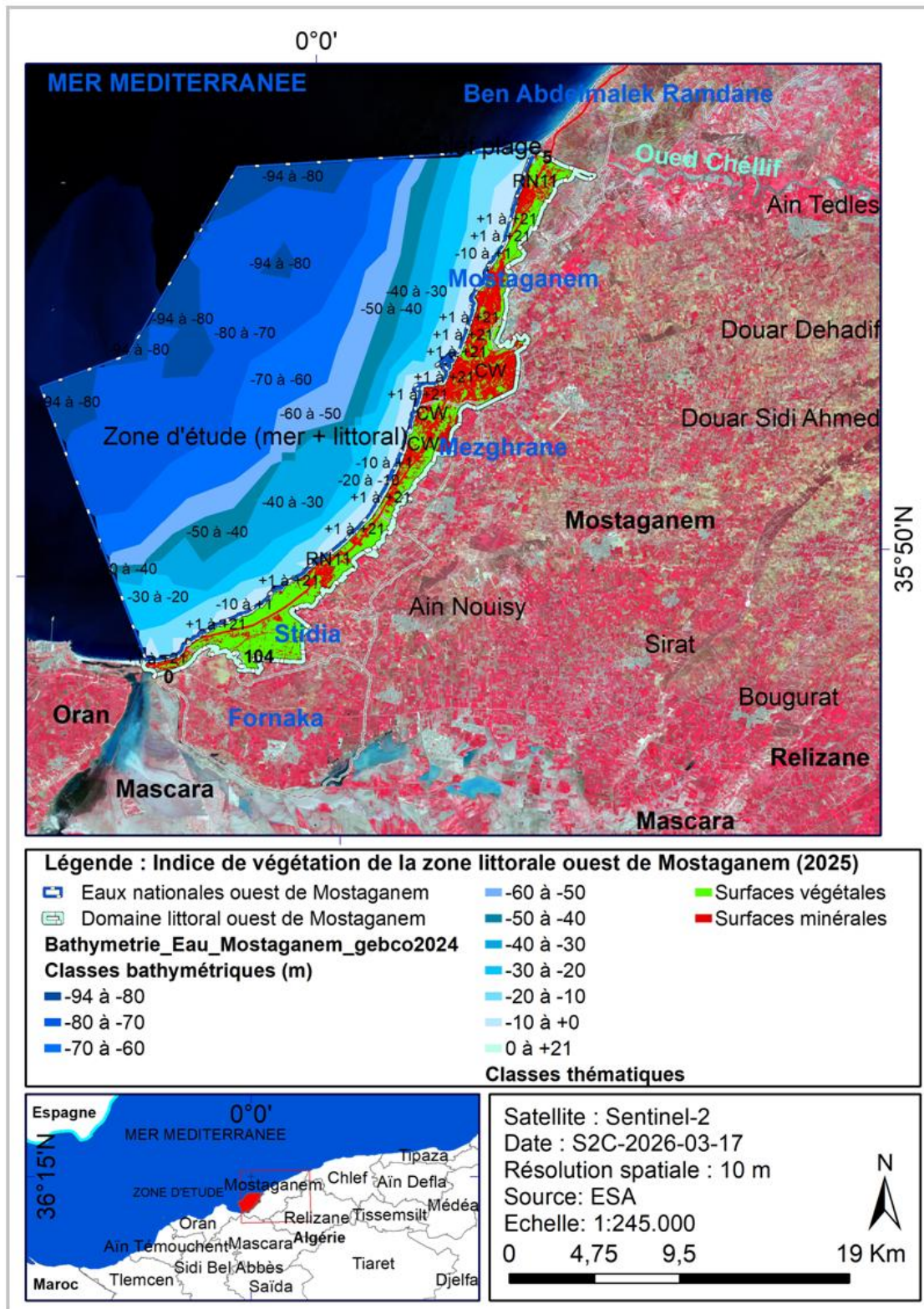


Figure 10: Indice de végétation (IV) de la zone d'étude. Conception : (Farah & Lehib©2026).

La figure 10 montre qu'en mois de mars 2026 la zone continentale couvre 4 086 ha de surfaces végétales et 3 176 ha de surfaces minérales, ce qui correspond respectivement à 56% et 44% du total continental. Cela montre que plus de la moitié (56%) de la zone littorale est couverte par la surface végétale (agriculture, forêt et zone humide). Le reste (44%) est occupé par les sols artificialisés (espaces urbains, zones industrielles, équipements récréatifs et touristiques et voies de communications). L'analyse statistique montre que les plus grandes surfaces végétales sont situées respectivement dans la commune côtière de Stidia (29% du total littoral) et de Mostaganem (26%). Alors que les plus grandes surfaces minérales sont situées respectivement dans la commune côtière de Mostaganem (17% du total littoral) et de Mazaghrane (8%).

3.2.2 Climat

Parmi les paramètres climatiques, nous avons étudié et cartographier à l'aide des méthodes de la télédétection, la température de surface marine (*SST*) et terrestre (*LST*) de la zone d'étude pour le mois de janvier à mai 2026. Les méthodes ont permis de réaliser pour chaque mois, une carte de *SST* et *LST* comme montre les figures 11, 12, 13, 14 et 15.

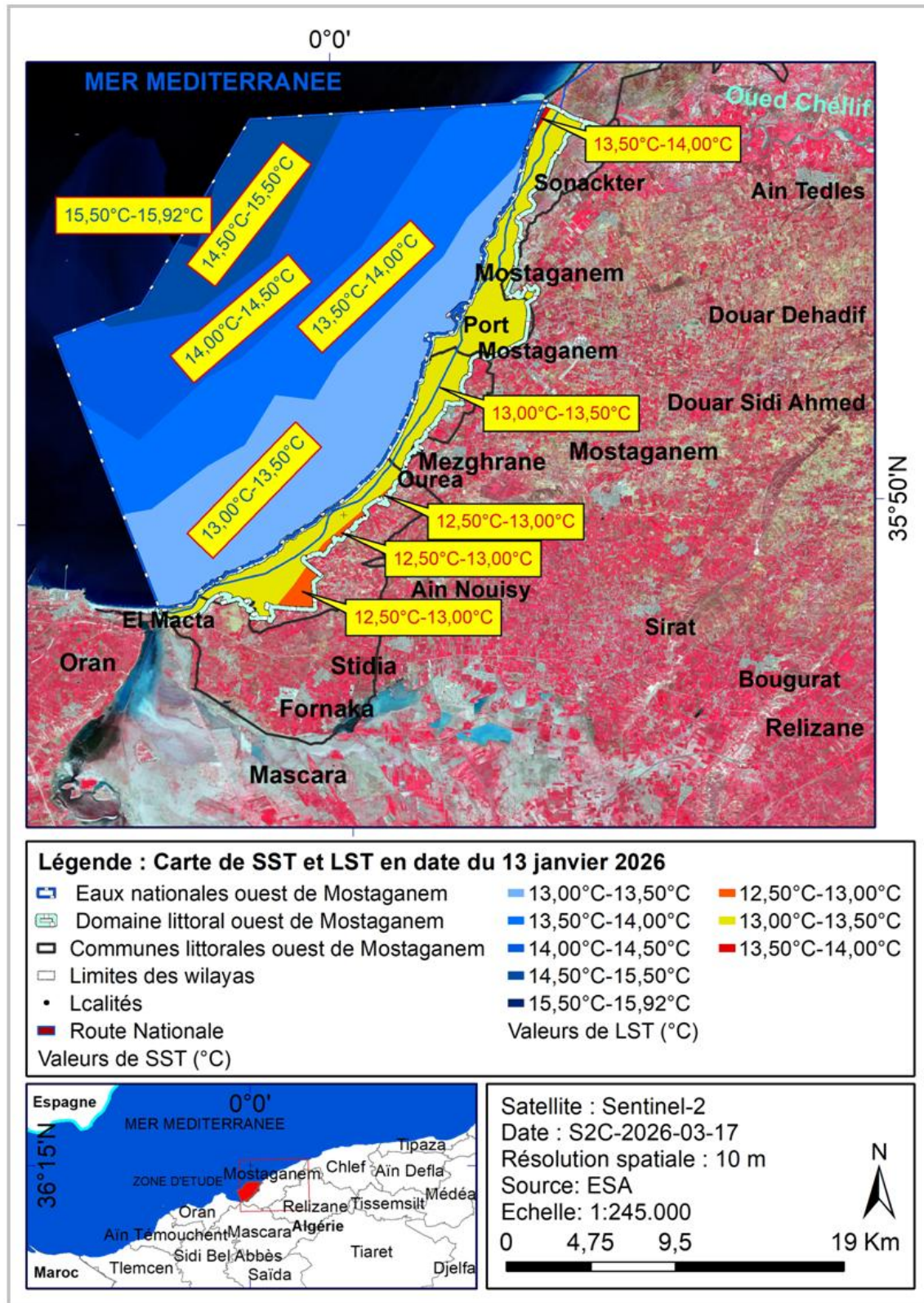


Figure 11 : Carte de SST et LST (13/01/2026) de la zone. Conception : (Farah & Lehibib©2026).

NB :

✓ *SST* : Température de surface marine (*Sea Surface temperature*)

✓ *LST* : Température de surface terrestre (*Land Surface temperature*)

La figure 11 montre qu'en date du 30 janvier 2026, la *SST* varie entre 13°C et 15,92°C alors que la *LST* est comprise entre 12,50°C et 14°C.

En mer, la *SST* est estimée à 13°C au rivage (jusqu'au -10 m de profondeur) et à 15,92°C au large (jusqu'au - 94 m de profondeur). Entre le rivage et le large, la *SST* est passé de 13 °C à 15,92°C ce qui correspond à une augmentation d'environ de 3°C.

Dans la zone terrestre, la *LST* est estimée à 14°C au niveau de la côte de Sonacther jusqu'à la plage de Oued Chlef (Mostaganem) et à 12,50°C au niveau des hauteurs de Stidia.

La *SST* et *LST* ont occupées les surfaces marines et terrestres estimées en hectares (ha) et pourcentages (%) dans le tableau 7.

Tableau 7 : Répartition spatiotemporelle des surfaces de *SST* et *LST*.

Dates	SST	Superficies (ha)	Taux (%)	LST	Superficies (ha)	Taux (%)
13/01/2026	15,50°C-15,92°C	236,72	0,01	13,50°C-14,00°C	61,87	0,01
	14,50°C-15,50°C	5 665,02	0,13	13,00°C-13,50°C	6 677,42	0,92
	14,00°C-14,50°C	11 097,40	0,26	12,50°C-13,00°C	523,63	0,07
	13,50°C-14,00°C	12 703,90	0,29	/	/	/
	13,00°C-13,50°C	13 382,80	0,31	/	/	/

Le tableau 7 montre que la température comprise entre 13 et 13,50 °C occupe 92% du total terrestre et 31% de la zone marine.

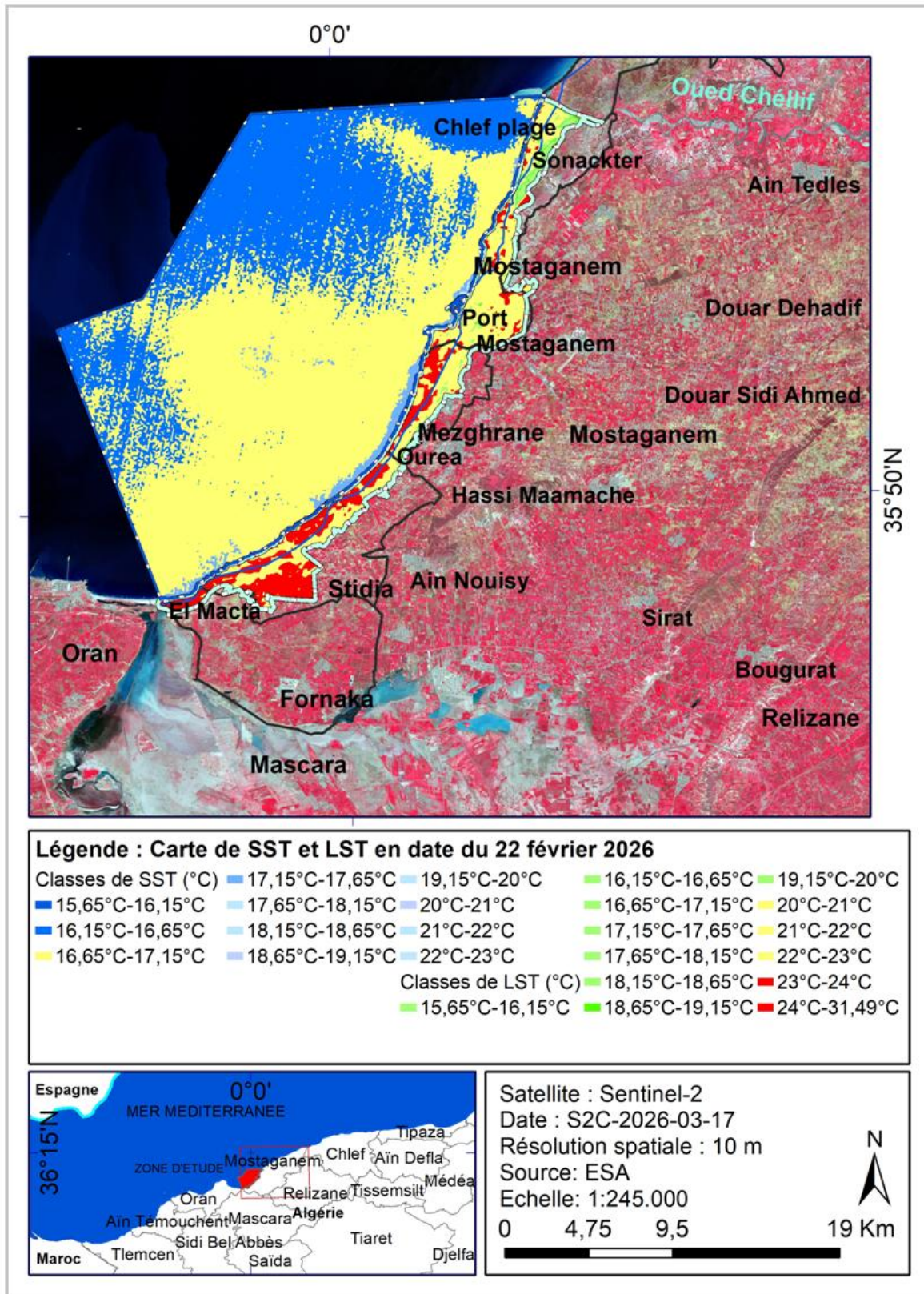


Figure 12: Carte de SST et LST (22/02/2026) de la zone. Conception : (Farah & Lehib©2026).

La figure 12 montre qu'en date du 22 février 2026, la SST varie entre 15,65°C et 23°C par contre la LST est comprise entre 15,65°C et 31,49°C.

En mer, la SST varie entre 17°C et 23°C au niveau du rivage jusqu'au -70 m de profondeur. Au-delà de ce fond marin jusqu'au -94 m de profondeur, la SST varie entre 15,65°C et 17°C. La SST est passé de 15,65°C au large à 23 °C au rivage ce qui correspond à une augmentation de température d'environ de 7,35°C sur les côtes.

Dans la zone terrestre, la LST varie entre 15,65 °C (au voisinage de la mer) et 24 °C (au niveau des périmètres périurbains des villes de Mostaganem, Mazaghrane, Ourea et Stidia). La SST et LST ont occupées les surfaces marines et terrestres estimées en hectares (ha) et pourcentages (%) dans le tableau 8.

Tableau 8 : Répartition spatiotemporelle des surfaces de SST et LST.

Dates	SST	Superficies (ha)	Taux (%)	LST	Superficies (ha)	Taux (%)
22/02/2026	15,65°C-16,15°C	1,45	0,00	15,65°C-16,15°C	0,12	0,00
	16,15°C-16,65°C	15 893,40	0,37	16,15°C-16,65°C	10,92	0,00
	18,65°C-19,15°C	30,88	0,00	18,65°C-19,15°C	85,18	0,01
	16,65°C-17,15°C	26 049,70	0,60	16,65°C-17,15°C	38,72	0,01
	17,15°C-17,65°C	901,77	0,02	17,15°C-17,65°C	57,15	0,01
	17,65°C-18,15°C	118,61	0,00	17,65°C-18,15°C	49,93	0,01
	18,15°C-18,65°C	61,75	0,00	18,15°C-18,65°C	55,55	0,01
	19,15°C-20°C	23,05	0,00	19,15°C-20°C	330,32	0,05
	20°C-21°C	4,58	0,00	20°C-21°C	1 068,17	0,15
	21°C-22°C	0,71	0,00	24°C-31,49°C	889,00	0,12
	22°C-23°C	0,01	0,00	21°C-22°C	1 558,89	0,21
	/	/	/	22°C-23°C	1 656,35	0,23
	/	/	/	23°C-24°C	1 462,63	0,20

Le tableau 8 montre que la température comprise entre 16,65 et 17,15 °C occupe 60% du total de la surface marine. La température comprise entre 22 et 23°C couvre 23% du total continental (littoral).

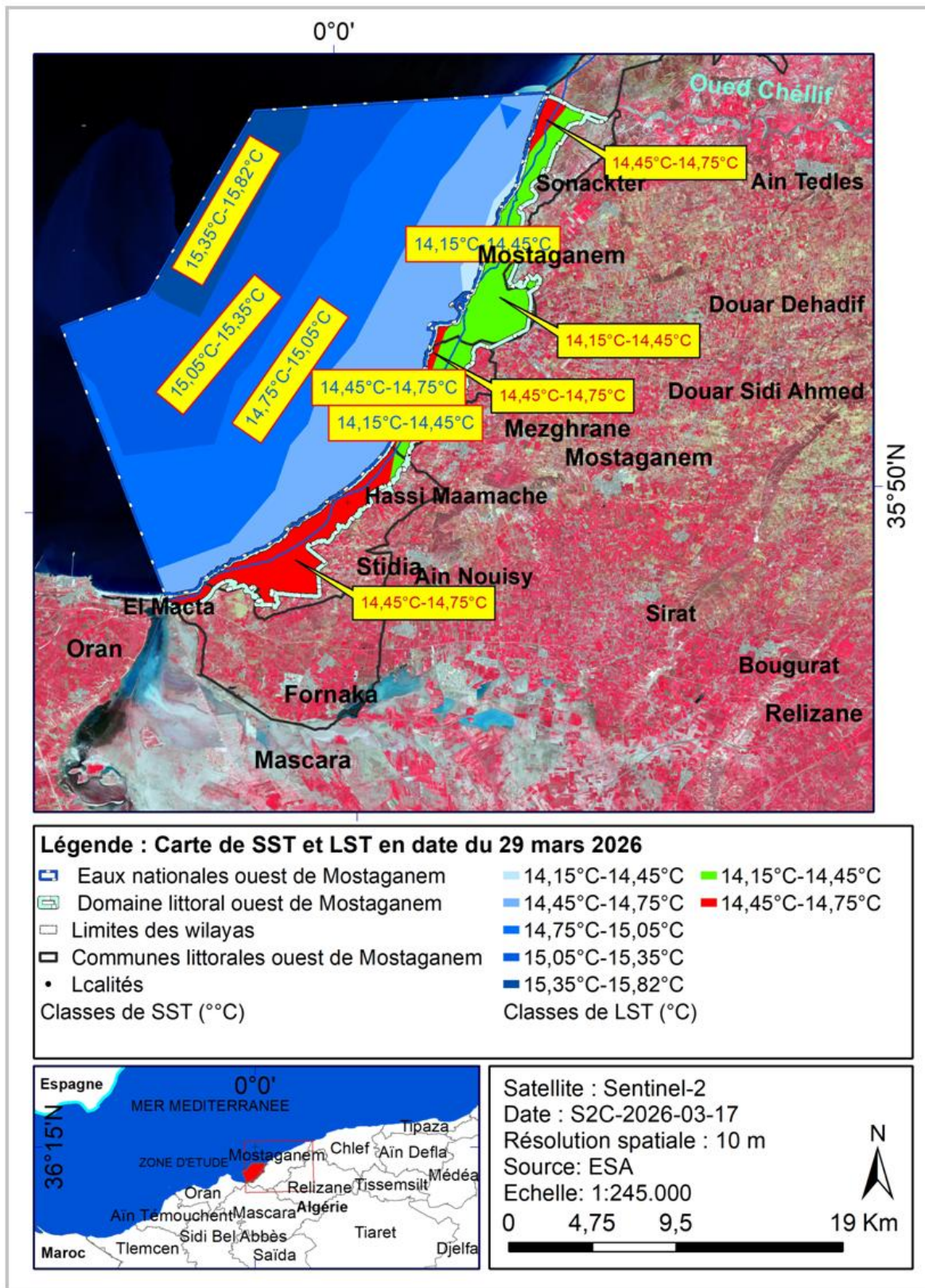


Figure 13 : Carte de SST et LST (29/03/2026) de la zone. Conception : (Farah & Lehbib©2026).

La figure 13 montre qu'en date du 29 mars 2026, la *SST* varie entre 14,15°C et 15,82 °C par contre la *LST* est comprise entre 14,15°C et 14,75°C.

En mer, la *SST* varie entre 14,15 °C au niveau du rivage jusqu'au -10 m de profondeur. Au-delà de ce fond marin jusqu'au – 94 m de profondeur, la *SST* varie entre 14,15°C et 15,82 °C. La *SST* est passé de 14,15°C au rivage à 15,82 °C au large ce qui correspond à une augmentation de température de 1,67 °C au large.

Dans la zone continentale (terrestre), la *LST* varie entre 14,15 °C à l'Est de la zone (Mostaganem et Mazaghrane) et 14,75 °C à l'ouest (Stidia et Fornaka). La *SST* et *LST* ont occupées les surfaces marines et terrestres estimées en hectares (ha) et pourcentages (%) dans le tableau 9.

Tableau 9 : Répartition spatiotemporelle des surfaces de *SST* et *LST*.

Dates	SST	Superficies (ha)	Taux (%)	LST	Superficies (ha)	Taux (%)
29/03/2026	15,35°C-15,82°C	3 841,54	0,09	14,45°C-14,75°C	3 244,84	0,45
	15,05°C-15,35°C	12 829,80	0,30	14,15°C-14,45°C	4 018,08	0,55
	14,75°C-15,05°C	14 624,30	0,34	/	/	/
	14,45°C-14,75°C	11 333,00	0,26	/	/	/
	14,15°C-14,45°C	457,22	0,01	/	/	/

Le tableau 9 montre que la température comprise entre 14,75 et 15,05 °C occupe 34% du total de la surface marine. La température comprise entre 14,15 et 14,45 °C couvre plus de la moitié (55%) du total continental.

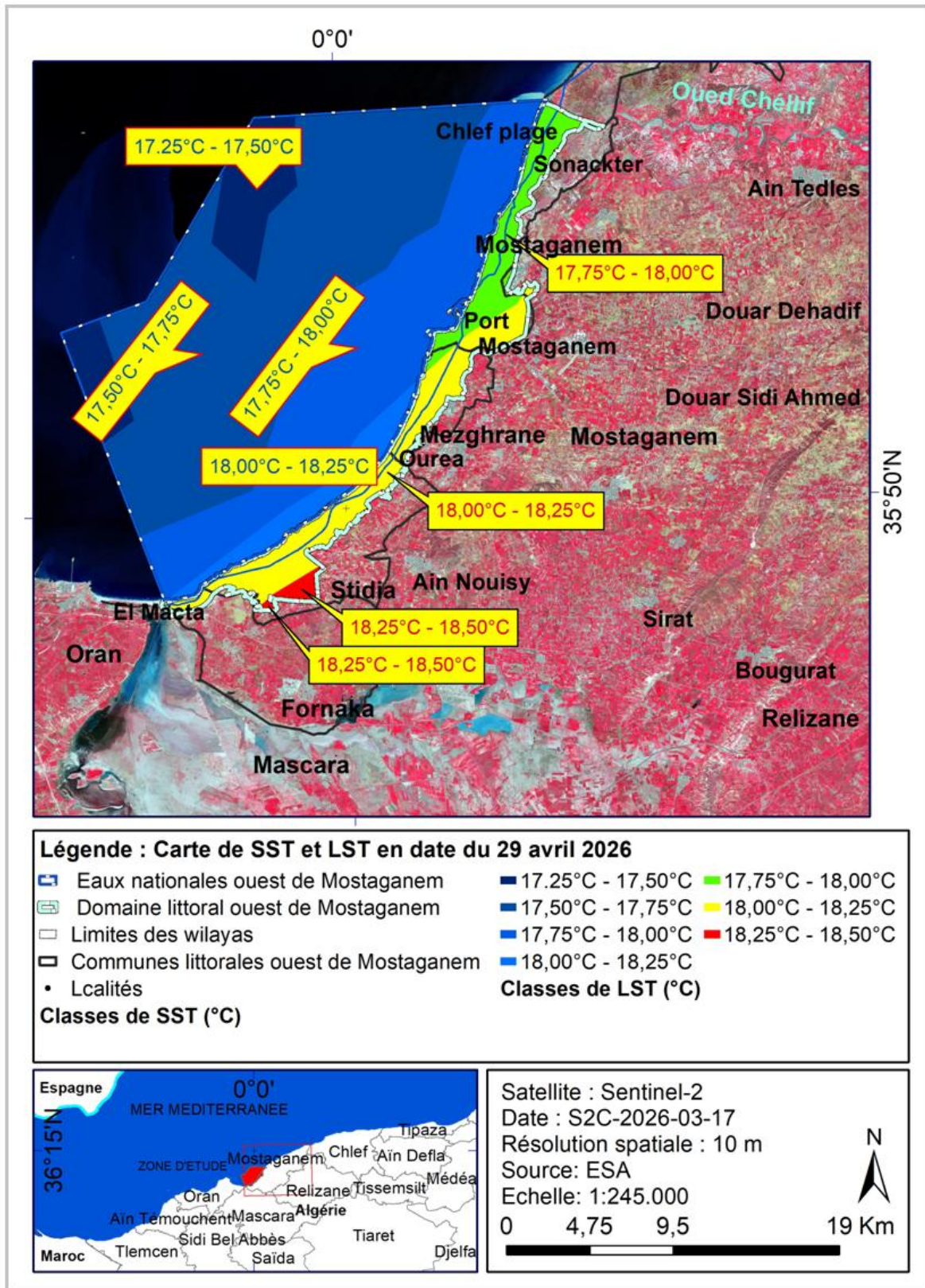


Figure 14: Carte de SST et LST (29/04/2026) de la zone. Conception : (Farah & Lehbib©2026).

La figure 14 montre qu'en date du 29 avril 2026, la SST varie entre 17,25°C et 18,25 °C par contre la LST est comprise entre 17,75°C et 18, 50 °C.

En mer, la SST varie entre 17,25 °C au large (- 94 m) et 18,25 °C au rivage ouest (-10 m de profondeur) de Mostaganem. La SST est passé de 17,25°C au large à 18,25 °C au rivage ce qui correspond à une augmentation de température de 1 °C au voisinage du rivage.

Dans la zone continentale, la LST varie entre 17,75 °C à l'Est (Mostaganem), 18,25 °C à l'ouest (Mazaghrane et Stidia) et 18,50 °C sur les hauteurs de Stidia. La SST et LST ont occupées les surfaces marines et terrestres estimées en hectares (ha) et pourcentages (%) dans le tableau 10.

Tableau 10 : Répartition spatiotemporelle des surfaces de SST et LST.

Dates	SST	Superficies (ha)	Taux (%)	LST	Superficies (ha)	Taux (%)
29/04/2026	17,75°C-18,00°C	13 636,40	0,32	17,75°C-18,00°C	2 590,05	0,36
	17.25°C-17,50°C	4 204,58	0,10	18,25°C-18,50°C	348,70	0,05
	17,50°C-17,75°C	23 154,70	0,54	18,00°C-18,25°C	4 324,17	0,60
	18,00°C-18,25°C	2 090,20	0,05	/	/	

Le tableau 10 montre que la température comprise entre 17,50 et 17,75 °C occupe plus de la moitié (54%) du total de la surface marine. La température comprise entre 18 et 18,25 °C couvre plus de la moitié (60%) du total continental.

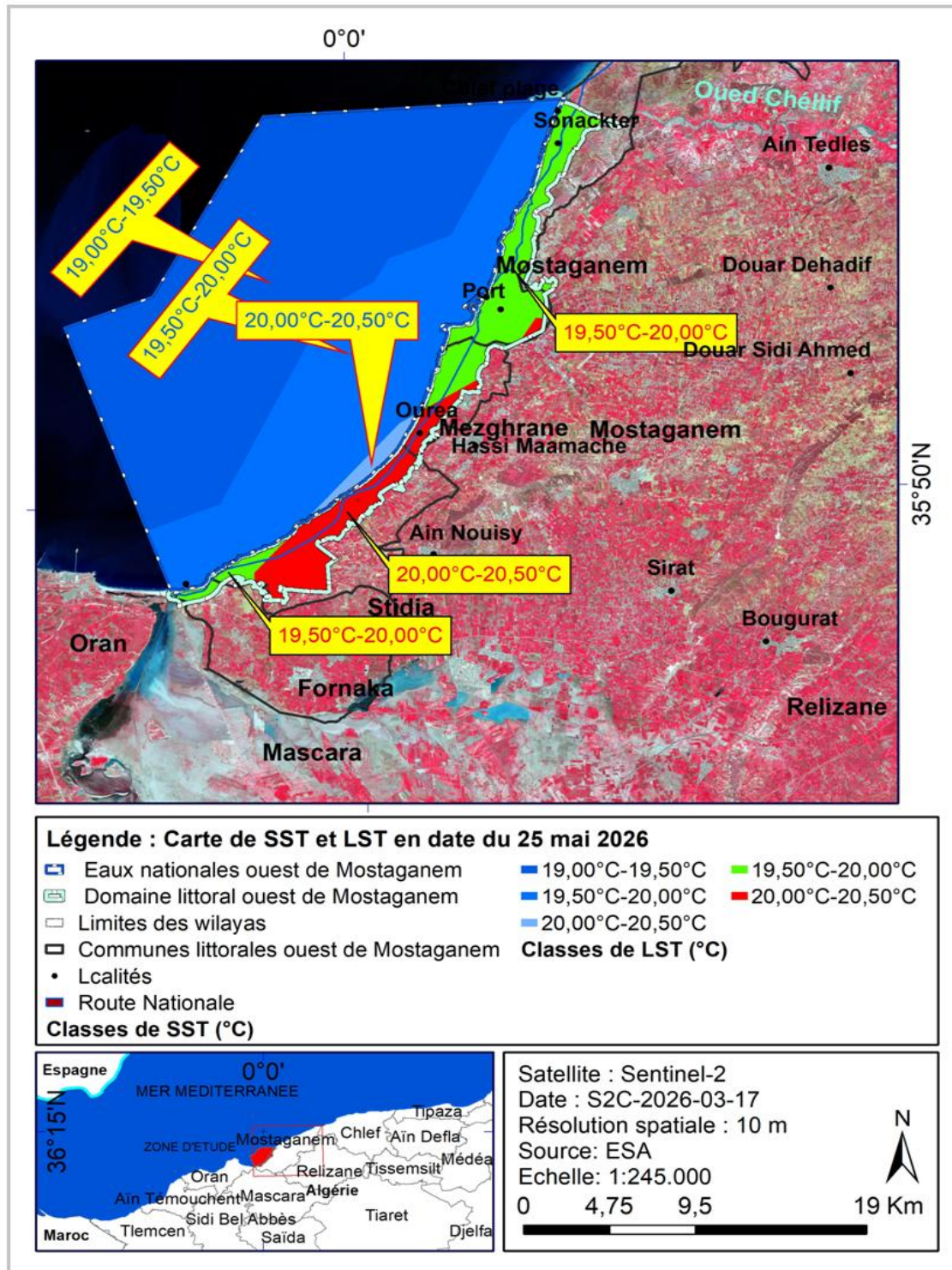


Figure 15: Carte de SST et LST (25/05/2026) de la zone. Conception : (Farah & Lehibib©2026).

La figure 15 montre qu'en date du 25 mai 2026, la SST varie entre 19 °C et 20,50 °C par contre la LST est comprise entre 19,50 °C et 20, 50 °C.

En mer, la *SST* varie entre 19,00 °C au large (- 94 m) et 20,50 °C au rivage ouest (-10 m de profondeur) à Ourea (Mazaghrane). La *SST* est passé de 19 °C au large à 20,50 °C au rivage ce qui correspond à une augmentation de température de 1,50 °C au voisinage du rivage.

Dans la zone continentale, la *LST* varie entre 19, 50 °C à Mostaganem et à Fornaka (El Macta) et 20,50 °C à Mazaghrane et Stidia. La *SST* et *LST* ont occupées les surfaces marines et terrestres estimées en hectares (ha) et pourcentages (%) dans le tableau 11.

Tableau 11 : Répartition spatiotemporelle des surfaces de *SST* et *LST*.

Dates	SST	Superficies (ha)	Taux (%)	LST	Superficies (ha)	Taux (%)
26/05/2026	19,00°C-19,50°C	27 051,50	0,63	19,50°C-20,00°C	4 444,81	0,61
	19,50°C-20,00°C	15 489,40	0,36	20,00°C-20,50°C	2 818,11	0,39
	20,00°C-20,50°C	544,88	0,01	/	/	/

Le tableau 11 montre que la température comprise entre 19 et 20 °C occupe plus de 60 % du total de la zone marine et continentale.

3.2.2.1 Variation mensuelle de la *SST* et *LST*

Les valeurs moyennes de *SST* et *LST* enregistrées entre le mois de janvier et mai 2026 sont exprimées en degrés Celsius dans le tableau 12.

Tableau 12 : Variation spatiotemporelle de *SST* et *LST* entre le mois de janvier et mai 2026 (5 mois).

Dates	<i>SST</i> moyenne (°C)	<i>LST</i> moyenne (°C)	Moyenne (°C)
13/01/2026	14,40	13,25	13,82
22/02/2026	18,71	19,78	19,24
29/03/2026	14,92	14,45	14,68
29/04/2026	17,74	18,12	17,93
25/05/2026	19,75	20	19,87
Moyenne	17,10	17,12	17,11

Le tableau 12 montre qu'entre le mois de janvier et mai 2026 (5 mois) la température de surface varie d'un mois à l'autre. La température moyenne de la zone d'étude est de 17,11 °C. La moyenne mensuelle de *SST* et *LST* est respectivement de 17,10 °C et 17,12. La température moyenne la plus élevée (supérieure à 19 °C) a été enregistrée pendant le mois de février et mai 2026.

3.2.2.2 Répartition spatiotemporelle de SST

La carte bathymétrique montre que le relief sous marin varie entre 0 et -94 m. L'analyse montre que 85 % du total marin sont situés sur -80 et -94 m de profondeur et 15 % sur -10 et -80 m. La variation de la SST le long de la bathymétrie est estimée en pourcentage (%) dans le tableau 13.

Tableau 13: Variation spatiotemporelle de SST entre le mois de janvier et mai 2026 (5 mois).

Dates	SST moyenne (°C)	Bathymétrie (m)	Taux (%)
13/01/2026	13,25	0 à -70 m	31 % de la surface totale marine
22/02/2026	16,90	0 à -94 m	60 % de la surface totale marine
29/03/2026	14,9	0 à -94 m	34 % de la surface totale marine
29/04/2026	17,62	-10 à -94 m	53 % de la surface totale marine
25/05/2026	19,25	-10 à -94 m	62 % de la surface totale marine

Le tableau 13 montre que la SST moyenne est passée de 13,25 °C en mois de janvier 2026 à 19,25 °C en mois de mai ce qui correspond à une augmentation de 6 °C en 5 mois, soit 1,2 °C/mois. Le pic de température de 16,90 °C survenu en mois de février 2026, a occupé 60 % du total de la zone marine. En mois de mars, la SST a chuté à 14,9 °C pour occuper 34 % du total de la zone. En mois d'avril et mai, la SST au niveau du rivage (0 à -10 m) a augmenté respectivement à 18 °C et 20 °C, en occupant 5 % du total marin. Par contre la SST au large (-10 m jusqu'au - 94 m) est estimée à 17,62 °C en mois d'avril et 19,25 °C en mois de mai. Cette température a occupé plus de la moitié du total marin. Cela montre que la SST varie en fonction de la saison et du fond des eaux sous marines.

3.2.2.3 Répartition spatiotemporelle de LST

La carte d'occupation du sol montre que la zone rurale et urbaine occupe respectivement trois quart (3/4) et un quart (1/4) du total de la zone continentale. Les surfaces végétales et minérales ont été estimées en superficies (ha) dans le tableau 14.

Tableau 14 : Variation spatiotemporelle de LST entre le mois de janvier et mai 2026 (5 mois).

Dates	LST moyenne (°C)	Surfaces végétales (ha)	Surfaces minérales (ha)
13/01/2026	13.25	04 % du total littoral	96 %
22/02/2026	19.78	20 % du total littoral	80 %
29/03/2026	14.45	56 % du total littoral	44 %
29/04/2026	18.12	44 % du total littoral	56 %
26/05/2026	20	04 % du total littoral	96 %

Le tableau 14 montre que la *LST* moyenne est passée de 13,25 °C en mois de janvier à 20°C en mois de mai 2026 ce qui correspond à une augmentation de 6,75 °C en 5 mois, soit 1,35 °C/mois. Le tableau montre que le pic de température de 19,78 °C survenu en mois de février 2026 a occupé 80% du total continental. La *LST* a augmenté à 18,12 °C en mois d'avril puis à 20°C en mois de mai. L'analyse de la carte d'occupation du sol montre que la zone continentale a subi un changement dans l'affectation des sols. La couverture végétale est passée de 4 % en mois de janvier 2026 à 56 % en mois de mars puis elle a diminué à 4 % en mois de mai. La surface végétale a atteint son maximum en mois de mars. En mois de mai, la surface végétale a chuté à plus de la moitié (52 %) du total végétal. Durant ce dernier mois, la *LST* moyenne a augmenté à 20 °C. Cela montre que la *LST* varie en fonction de la saison et du changement d'affectation des sols dans la zone continentale.

3.3 Discussions

L'approche géomatique appliquée dans notre présente étude, a permis de réaliser cinq (5) cartes de températures de surfaces. Les cartes montrent que la température moyenne dans la zone marine et continentale est passée de 13,82 °C en mois de janvier 2026 à 19,87 °C en mois de mai ce qui correspond à une augmentation de 6,05 °C en 5 mois, soit 1,21 °C/mois. La température moyenne mensuelle est estimée à 17,11 °C. Cette température est répartie entre 17,12 °C de *LST* et 17,10 °C de *SST*. Cela montre que la température de surface continentale est supérieure à celle de la surface marine et ce à cause de la forte variabilité d'émissivité des unités thématiques de l'occupation du sol (surfaces végétales et minérales) par rapport à celle de la surface marine qui demeure faible et spatialement homogène (McClain et al., 1985 ; Sobrino et al., 2004). La *LST* est particulièrement sensible à l'occupation du sol tandis que la *SST* reflète de manière fiable les échanges thermiques entre la mer et l'atmosphère (McClain et al., 1985 ; Reynolds et al., 2002). La *LST* est plus complexe en raison de la grande variabilité de son émissivité et de l'hétérogénéité des surfaces terrestres (Benmecheta, 2016 ; Sobrino et al., 2008). Les surfaces minérales (ex. urbanisées) sont caractérisées par une faible humidité et une forte inertie thermique ce qui rendent les températures plus élevées dans la zone continentale (Essalek & Bouchaiba, 2019). Ceci est due à l'influence des matériaux et des minéraux qui constituent la surface artificialisée (Cui et Foy, 2012 ; Good et al., 2017 ; Soltani et Sharifi, 2017) car les surfaces minérales modifient les transferts de chaleur (Ringebach, 2004) dont une importante quantité de chaleur est stockée dans les constructions urbaines qui sont sujettes à une inertie thermique plus forte et plus lente. Le changement des conditions atmosphériques pendant la saison sèche entraîne la diminution de la masse végétale et l'augmentation des surfaces en sols nus, modifiant ainsi le bilan énergétique et entraînant des

températures de surfaces proches entre les régions rurales et les zones urbaines (Margarete et *al.*, 2016). Les surfaces d'eau comme, les mers sont caractérisées par une inertie thermique élevée et une émissivité élevée. Cela signifie que la variation de température de surface est relativement modérée et que la *SST* est, en général, plus stable que la *LST* terrestre, à la fois dans l'espace et dans le temps (Benmecheta, 2016).

4 Conclusion générale

Le but du présent travail était de réaliser une carte de température de surface marine (*SST*) et terrestre (*LST*) pour la zone côtière ouest de Mostaganem. L'objectif, était de détecter, localiser et évaluer la variation spatio-temporelle de la température de surface. Les cartes de la *SST* et *LST* montrent que la température moyenne dans la zone marine et continentale est passée de 13,82 °C en mois de janvier 2026 à 19,87 °C en mois de mai ce qui correspond à une augmentation de 6,05 °C en 5 mois, soit 1,21 °C/mois. La température moyenne mensuelle est estimée à 17,11 °C. Cette température est répartie entre 17,12 °C de *LST* et 17,10 °C de *SST* ce qui montre que la *LST* est supérieure à la *SST* et ce à cause de la sensibilité et la forte variabilité de l'émissivité de l'occupation du sol par rapport à celle de la surface marine qui demeure faible et spatialement presque homogène. Notre approche a confirmé que la télédétection est capable d'estimer la température de surface avec une précision compatible avec les études climatiques et environnementales. Ces indices de températures demeurent utiles car ils permettent la localisation, le suivi et la surveillance de l'environnement marin et terrestre contre les îlots de chaleur (Dousset et *al.*, 2010). Dans cette perspective, les décideurs et gestionnaires du milieu marin et littoraux peuvent être alertés afin de prendre plus de conscience et de remédier aux problèmes d'îlots de chaleur estivale. Nos résultats contribuent à l'actualisation des données déjà existantes et ont permis a) d'élaborer une cartographie de répartition spatio-temporelle de la température de surfaces ; b) ils ont permis, la localisation, suivi et la surveillance de la température saisonnière dans la zone côtière (marine et littorale) ouest de Mostaganem. En prime, les analyses prospectives sont incontournables pour la prise de décision quant à la lutte durable contre les îlots de chaleur afin de prendre les mesures nécessaires.

4.1 Recommandations

Parmi les recommandations que nous jugeons utiles, nous proposons aux gestionnaires et décideurs de prévoir dans le cadre de la prévention et la lutte contre les îlots de chaleurs estivales les actions suivantes :

Milieu marin :

- ✓ Sensibiliser les investisseurs (élevages et cultures en mer) pour qu'ils prennent conscience aux problèmes de chaleur estivale,
- ✓ Procéder au nettoyage, ramassage et évacuation des lieux tous les objets non conformes aux sites de plages,
- ✓ Installer des bornes-fontaines au profit des usagers de la mer (estivants, pêcheurs et investisseurs),

Aménager et équiper les plages par des abris contre la chaleur estivale.

Milieu littoral

- ✓ Densifier les espaces verts en milieu urbains,
- ✓ Installer des jets d'eau et bornes fontaines dans les espaces fréquentés par le public,
- ✓ Planter les arbres d'alignement le long et de part et d'autre des voiries urbaines,
- ✓ Occuper les terrains nus par la végétation naturelle,
- ✓ Occuper et valoriser les sols nus,
- ✓ Réduire les surfaces des sols nus durant la saison estivale,
- ✓ Encourager les cultures saisonnières pour couvrir les sols nus en pleine saison estivale (ex. les cultures maraichères),
- ✓ Mettre en place des dispositifs de la technologie de détection des stress thermiques et hydriques,
- ✓ Surveiller de très près les stress thermiques et hydriques en milieu agricoles et forestiers,
- ✓ Augmenter la fréquence d'irrigation en milieu agricole,
- ✓ Installer des citernes d'eau en pleine forêts sensibles aux feux,
- ✓ Sensibiliser le public en particulier la catégorie d'enfants et de personnes âgées, sur les conséquences des îlots de chaleurs estivales.

Références bibliographiques

- Achbun, A., Mansour, M., Layelmam, M. & Smiej M.F. (2011). Comparative study of object-oriented classification of a spot5 image for land-use mapping. (Etude comparative de la classification orientée objet d'une image spot5 pour la cartographie de l'occupation du sol) via eCognition®9. Geo Observateur. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00915067>.
- Allen, P. (2007). Sediment en route to oblivion. *Nature*, 450, 490–491. <https://doi.org/10.1038/450490a>.
- Amorim, C. L., Moreira, I. S., Ribeiro, A. R., Santos, L. H. M. L. M., Delerue-Matos, C., Tiritan, M. E., & Castro, P. M. L. (2016). *Treatment of a simulated wastewater amended with a chiral pharmaceuticals mixture by an aerobic granular sludge sequencing batch reactor*. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 115, 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.009>
- Bachir, N., Aiche, M., Maliki, M., Mebarki, I., & Benharrats, F. (2019). La cartographie des îlots de chaleurs urbains par la télédétection à Mostaganem: un outil d'aide à la végétalisation de la ville. *Bulletin des sciences géographiques de l'INCT*, 23(1), 10–14. <https://asjp.cerist.dz/en/article/199464>
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). *Journal of Hydrology*, 212–213, 198–212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
- Béchet, N., Milin, S., Dubois, R., & Reynaud, C. (2017). *Assessment of urban surface water pollution by an integrated chemical and ecological approach*. *Science of the Total Environment*, 586, 982–994. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.046>
- Becker, F., & Li, Z. L. (1990). Towards a local split window method over land surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 11(3), 369–393. <https://doi.org/10.1080/01431169008955028>
- Benmecheta, A. (2016). *Estimation de la température de surface terrestre et de la mer par télédétection thermique*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Alger, Algérie.
- Beltrame, C., Perennou, C., & Guelmami, A. (2015). Évolution de l'occupation du sol dans les zones humides littorales du Bassin méditerranéen de 1975 à 2005. *Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens/Journal of Mediterranean geography*, (125), 97–111. <https://journals.openedition.org/mediterranee/8046>

- Boltzmann, L. (1884). Ableitung des Stefan'schen Gesetzes. *Annalen der Physik*, 258(6), 291–294.
<https://doi.org/10.1002/andp.18842580616>
- Bustinza, O. F., Vendrell-Herrero, F., & Baines, T. (2022). *Digitalization and innovation for sustainable organizational performance: Evidence from firms adopting servitization. Technological Forecasting and Social Change*, 175, 121347.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121347>
- Colin, P. (2006). *Thermal Infrared Remote Sensing Basics* (en référence à Rubio, 1998).
- Coll, C., Pujol, J., & Casassas, E. (1994). *Remote sensing of Mediterranean vegetation phenology with SPOT VEGETATION data. International Journal of Remote Sensing*, 15(2), 372-379.
<https://doi.org/10.1080/01431169408954133>
- Cui, Y., & Foy, R. (2012). *A review of remote sensing methods for mapping surface water dynamics in wetlands. Remote Sensing of Environment*, 124, 689-701.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.06.019>
- Donlon, C. J., Minnett, P. J., Gentemann, C., et al. (2007). Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research. *Journal of Climate*, 15(4), 353–369. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015)
- Donlon, C., Casey, K., Gentemann, C., & LeBorgne, P. (2012). Fifteen years of sea surface temperature from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1665–1669.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Donlon, C., Berruti, B., Mecklenburg, S., Nieke, J., & Rebhan, H. (2018). The Sentinel-3 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 37–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.024>
- Dousset, B., Gourmelon, F., & Viollette, S. (2010). *A review of thermal remote sensing for urban climate applications: Links with urban heat island studies. Urban Climate*, 2(1), 42-59.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2010.03.001>
- Ducrot, D. (2005). *Methods for analyzing and interpreting multi-source remotesensing images Extraction of landscape features. (Méthodes d'analyse et d'interprétation d'images de télédétection multi-sources Extraction de caractéristiques du paysage). Habilitation dirigée des recherches, INP Toulouse, France. http://www.cesbio.ups-tlse.fr/data_all/theses/HDR_Ducrot_2005.pdf.*
- Dupuy, S., & Gaetano, R. (2019). Production of maps of agricultural land use in Réunion from satellite images 2016–2019) - Methodological report (Production des cartes de l'occupation du

sol agricole à la Réunion à partir d'images satellites 2016–2019)-Rapport méthodologique.https://agritrop.cirad.fr/594135/1/Rapport_carto_GABIR_2017-2018_v3.pdf

Essalek, A., & Bouchaiba, F. (2019). Estimation de la température de surface urbaine par télédétection : application à la ville de Tlemcen. *Revue des Sciences et Technologie*, 12(1), 45–58.

ESA (2020). *Sentinel-2 User Handbook*. European Space Agency. Disponible en ligne : https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook (consulté en 2026)

ESA (2021). *SNAP — Sentinel Application Platform User Guide*. European Space Agency. <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>

Galve, J. M., Sánchez, J. M., Coll, C., & Villodre, J. (2022). A new single-band pixel-by-pixel atmospheric correction method for thermal infrared imagery. *Remote Sensing*, 14(3), 654. <https://doi.org/10.3390/rs14030654>

Galve, J. P., Caselles, V., & Sòria, G. (2022). *Atmospheric Correction and Surface Emissivity in Thermal Infrared Remote Sensing*. *Remote Sensing Journal*, 14(9), 1802. <https://doi.org/10.3390/rs14091802>

GeeksforGeeks (2024). *Introduction to Remote Sensing and Its Applications*. GeeksforGeeks. Disponible en ligne : <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-to-remote-sensing-and-its-applications/> (consulté en 2026).

Gentemann, C. L., Wentz, F. J., Mears, C. A., & Smith, D. K. (2004). In situ validation of Tropical Rainfall Measuring Mission microwave sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 109(C4). <https://doi.org/10.1029/2003JC002092>

Ghent, D., Veal, K., Trent, T., et al. (2024). A new approach to defining uncertainties for MODIS land surface temperature. *Remote Sensing*, 11(9), 1021. <https://doi.org/10.3390/rs11091021>

Giglio, L., Schroeder, W., & Justice, C. O. (2016). The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment*, 178, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.054>

Gillespie, A., Rokugawa, S., Matsunaga, T., et al. (1998). A temperature and emissivity separation algorithm for ASTER images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1113–1126. <https://doi.org/10.1109/36.700995>

GeoRezo (2026). *Résolution spatiale et temporelle en télédétection*. <https://georezo.net>

- Good, S. P., Caylor, K. K., & Weil, A. (2017). *Seasonal and ecohydrological regulation of canopy conductance across African tropical savanna trees*. *Ecohydrology*, 10(5), e1843. <https://doi.org/10.1002/eco.1843>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., et al. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Guillevic, P., Clerc, S., Cazenave, A., & Holbecq, M. (2019). *Assessment of vegetation dynamics in Mediterranean ecosystems using multi-sensor time series data*. *Remote Sensing*, 11(3), 285. <https://doi.org/10.3390/rs11030285>
- Hassani, A., Khalek, A. A., & Bounif, A. (2020). Analyse diachronique de la température de surface terrestre en milieu urbain par télédétection thermique. *Revue Télédétection*, 18(2), 112–128.
- Home, E. (2022). *Understanding Remote Sensing Fundamentals*. Publication disponible en ligne : <https://www.home-rs.org/guide-remote-sensing>
- Hulley, G. C., & Hook, S. J. (2017). *Land surface temperature retrieval from Landsat-8 thermal infrared sensor data*. *Remote Sensing of Environment*, 200, 154–169. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.029>
- Imhoff, M. L., Zhang, P., Wolfe, R. E., & Bounoua, L. (2010). Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, 114(3), 504–513. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.008>
- ITT Visual Information Solutions (2007). *FLAASH Module User's Guide*. ITT Industries, Inc.
- Jeevalakshmi, D., & Narayana Reddy, S. (2017). Land surface temperature retrieval from Landsat data. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 9(2), 118–126. <https://doi.org/10.4314/ijest.v9i2.12>
- Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A. (2004). *A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D20). <https://doi.org/10.1029/2004JD004608>
- Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Holben, B. N., & Tucker, C. J. (2002). *Analysis of the phenology of global land surface using normalized difference vegetation index data*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8), 1738–1750. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.802481>

- Kilpatrick, K. A., Podestá, G., Walsh, S., et al. (2015). A decade of sea surface temperature from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 165, 27–41. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.023>
- Kshetri, T., & Dahal, K. (2024). Urban heat island analysis using Landsat and Sentinel data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 33, 101–115. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101115>
- Li, X., Zhou, Y., Chen, J., & Wang, X. (2019). A review of remote sensing applications in urban heat island studies. *Remote Sensing*, 11(7), 1443. <https://doi.org/10.3390/rs11071443>
- Li, X., Zhang, Y., Huang, J., & Wang, Q. (2021). Deep learning in remote sensing image classification: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 175, 108–125. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.07.003>
- Li, Z. L., Tang, B. H., Wu, H., et al. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131, 14–37. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>
- Li, Z. L., Wu, H., Duan, S. B., et al. (2017). Satellite remote sensing of global land surface temperature. *Reviews of Geophysics*, 61(1). <https://doi.org/10.1029/2022RG000777>
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote Sensing and Image Interpretation* (7^e édition). Wiley.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic Information Systems and Science* (4^e édition). Wiley.
- Malbêteau, Y., Merlin, O., Gascoin, S., et al. (2017). Normalizing land surface temperature data for elevation and illumination effects in mountainous areas. *Remote Sensing of Environment*, 189, 25–39. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.010>
- Marchal, R., Claus, M., & Linard, C. (2022). *Cartographie des îlots de chaleur urbains par télédétection thermique*. CERFO, Québec, Canada.
- Margarete, A. A., Silva, S. C. G., & Souza, E. P. (2016). Remote sensing of coastal environments: A review of techniques and challenges. *Applied Geography*, 75, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.07.006>
- McClain, E. P., Pichel, W. G., & Walton, C. C. (1985). Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research*, 90(C6), 11587–11601. <https://doi.org/10.1029/JC090iC06p11587>

- Merchant, C. J., Embury, O., et al. (2013). Sea surface temperature datasets for climate applications from Phase 1 of the ESA Climate Change Initiative. *Geoscience Data Journal*, 1(2), 179–191. <https://doi.org/10.1002/gdj3.20>
- Merchant, C. J., Embury, O., Bulgin, C. E., et al. (2019). Satellite-based time-series of sea-surface temperature since 1981 for climate applications. *Scientific Data*, 6, 223. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0236-x>
- Merchant, J. W. (2014). *Geographic Information Systems: An Introduction* (3^e édition). McGraw-Hill Education
- Minnett, P. J., Alvera-Azcárate, A., Chin, T. M., et al. (2019). Half a century of satellite remote sensing of sea-surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111366. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111366>
- Mostovoy, G., López-Lozano, R., & Pasqualini, V. (2006). Assessment of land cover changes in a Mediterranean coastal zone using multi-temporal Landsat TM and SPOT XS data. *International Journal of Remote Sensing*, 27(7), 1365–1381. <https://doi.org/10.1080/01431160500331137>
- NASA Earthdata (2026). MODIS Land Surface Temperature Products. <https://modis.gsfc.nasa.gov>
- NOAA CoastWatch (2026). AVHRR Sea Surface Temperature Products. <https://coastwatch.noaa.gov>
- NOAA NESDIS (2020). GOES Satellite Products. <https://www.nesdis.noaa.gov>
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates* (2nd ed.). Methuen, London. <https://doi.org/10.4324/9780203407219>
- ONCEA. National Observatory on the Consumption of Agricultural Land (2014). Overview of the quantification of the national evolution of agricultural surfaces (Panorama de la quantification de l'évolution nationale des surfaces agricoles). Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt—France. *Observatoire Nationale de la Consommation des Espaces Agricoles*. Disponible sur : <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/144000288.pdf>
- Peprah, C. O., Fujimoto, M., & Yoshida, T. (2023). Assessment of urban heat island using Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 15(3), 666. <https://doi.org/10.3390/rs15030666>
- Planck, M. (1901). Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum. *Annalen der Physik*, 309(3), 553–563. <https://doi.org/10.1002/andp.19013090310>

- Price, J. C. (1984). Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 AVHRR. *Journal of Geophysical Research*, 89(D5), 7231–7237. <https://doi.org/10.1029/JD089iD05p07231>
- Qin, Z., Karnieli, A., & Berliner, P. (2001). A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), 3719–3746. <https://doi.org/10.1080/01431160010006971>
- Renard, F., Alonso, G., & Mayoraz, M. (2019). *Remote sensing applications in environmental monitoring: Trends and perspectives*. *Environmental Science & Policy*, 98, 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.04.012>
- Remote Sensing (2022). *Landsat 8/9 OLI/TIRS Collection 2 Level-2 Science Product Guide*. USGS. <https://www.usgs.gov/landsat-missions>
- Reynolds, R. W., Rayner, N. A., Smith, T. M., et al. (2002). An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, 15(13), 1609–1625. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015)
- Ringenbach, A. (2004). *La télédétection appliquée à l'étude des milieux naturels : principes et perspectives*. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, (180), 23–35
- Rubio, E. (1998). *Remote sensing and geographic information systems for coastal monitoring*. *International Journal of Remote Sensing*, 19(6), 1113–1124. <https://doi.org/10.1080/014311698215737>
- Sakhy, A., Benmecheta, A., & Hamadouche, M. A. (2011). Analyse des îlots de chaleur urbains par télédétection thermique : cas de la ville d'Alger. *Revue Télédétection*, 10(2), 89–104.
- Schmetz, J., Pili, P., Tjemkes, S., et al. (2002). An introduction to Meteosat Second Generation (MSG). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(7), 977–992. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2002\)083](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2002)083)
- Sentinel-2 Mission Team. (2016).** *Sentinel-2 User Handbook*. European Space Agency. Disponible en ligne : https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook
- Sitayeb, T., Benabdeli K. (2008). Contribution to the study of land-use dynamics in the plains of Macta (Algeria) with the aid of remotesensing and GIS. (Contribution à l'étude de la dynamique de l'occupation des sols de la plaine de la Macta (Algérie) à l'aide de la télédétection et des systèmes d'information géographique). Elsevier, 331(C. R. Biologies 331 (2008).), 466–474. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2008.03.010>.

- Sparfel, L., Gourmelon F., et Le Berre I. (2010). Object-oriented approach to land use in coastal areas. (Approche orientée-objet de l'occupation des sols en zone côtière). *Revue Télédétection*, 2008, 8(4), 237-256. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00559730/>.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434–440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Soria, G., et al. (2008). Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(2), 316–327. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.904834>
- Stefan, J. (1879). Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur. *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, 79, 391–428.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2017). Land surface temperature retrieval from Landsat-8 TIRS and its validation in a semiarid environment. *Remote Sensing of Environment*, 190, 410-428. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.017>
- Soltani, A., & Sharifi, A. (2017). Remote sensing of vegetation and land surface parameters: A review of methodologies and applications. *Journal of Remote Sensing*, 2017, Article ID 6521493. <https://doi.org/10.1155/2017/6521493>
- Teteka Muutondo, J., Mushagalusa, N., & Balthazar, V. (2020). Analyse de la température de surface terrestre et de ses relations avec l'occupation du sol en milieu tropical humide. *Revue Internationale de Géomatique*, 30(1), 45–67. <https://doi.org/10.3166/rig.2020.00087>
- Tereka Muutondo, J., Kunda, M., & Mwila, M. (2020). Land Surface Thermal Dynamics: A TST/TSM Approach. *Journal of African Earth Sciences*, 160, 103579. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103579>
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- USGS (2020). *Landsat 8 Data Users Handbook*. U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-data-users-handbook>
- Vila, J. (1980). Techniques et applications de la télédétection dans les zones littorales méditerranéennes. *Revue Internationale de Géomatique*, 2(1), 45-58
- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-1)

- Walton, C. C. (1987). Nonlinear multichannel algorithms for estimating sea surface temperature with AVHRR satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 27(2), 115–124. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1988\)027](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1988)027)
- Walton, C. C., Peterson, D. L., & Smith, R. B. (1998). *Remote sensing and environmental monitoring of terrestrial ecosystems*. *International Journal of Remote Sensing*, 19(10), 1919-1930. <https://doi.org/10.1080/014311698215644>
- Wan, Z. (1999). *Modis land-surface temperature algorithm theoretical basis document*. NASA, University of California, Santa Barbara. Disponible en ligne : <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod11.php>
- Wan, Z. (2002). *Collection of Land Surface Temperature Algorithms for AVHRR and MODIS*. University of California, Santa Barbara. Disponible en ligne : https://www.researchgate.net/publication/228631817_Collection_of_Land_Surface_Temperature_Algorithms_for_AVHRR_and_MODIS
- Wan, Z. (2008). New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products. *Remote Sensing of Environment*, 112(1), 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.06.026>
- Wan, Z., & Dozier, J. (1996). A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(4), 892–905. <https://doi.org/10.1109/36.508406>
- Wentz, F. J., & Meissner, T. (2000). *Satellite microwave remote sensing of sea surface temperature and salinity*. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C5), 11779-11794. <https://doi.org/10.1029/2000JC900037>
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- Wildi, W. (1983). *Télédétection appliquée à l'étude des environnements naturels et côtiers*. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes
- Wulder, M. A., White, J. C., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., & Coops, N. C. (2021). *Current status of Landsat program science, data, and applications*. *Remote Sensing of Environment*, 242, 111755. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111755>

Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., et al. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225, 127–147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>

Yu, Y., Mas, J.-F., & Wu, J. (2014). A review of remote sensing-based land surface temperature retrieval methods. *Remote Sensing*, 6(9), 8460-8492. <https://doi.org/10.3390/rs6098460>

Sites internet :

<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry>

<https://dataspace.copernicus.eu/>

<https://dataspace.copernicus.eu/>

<http://earthexplorer.usgs.gov/>