



Certificat complémentaire en Géomatique

Analyse spatio-temporelle de la température de surface et de la végétation par télédétection Landsat 8 : Cas d'étude de Sanandaj, Kurdistan, Iran (2015-2025)

Superviseurs :

Dr. Gregory Giuliani, Université de Genève

M. Florian Franziskakis, Université de Genève

Etudiante :

Nadieh Altouni

Résumé :

Dans un contexte de changement climatique global, la compréhension des microclimats urbains est devenue un enjeu prioritaire pour l'aménagement durable des territoires.

Ce mémoire analyse la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface à Sanandaj (province du Kurdistan, Iran) et son lien avec la couverture végétale, à partir d'images Landsat 8 OLI TIRS de niveau Level 1. Nous mobilisons six scènes représentant deux périodes contrastées, avril et juillet, sur trois années de référence (2015, 2020 et 2025), afin de documenter à la fois la saisonnalité et l'évolution interannuelle. La végétation est caractérisée par le NDVI calculé à partir des bandes rouges et proche infrarouge. La température de surface est estimée à partir de la bande thermique selon une chaîne de traitement explicitée avec ArcGIS Pro et Python, incluant les conversions radiométriques, le calcul de la température de brillance, puis une correction d'émissivité dérivée du NDVI via la proportion de végétation.

Les résultats mettent en évidence un contraste saisonnier net, avec une intensification des îlots de chaleur de surface en été, ainsi qu'une hétérogénéité spatiale marquée. Spatialement, les zones les plus chaudes se concentrent dans les secteurs urbains fortement minéralisés, tandis que des zones plus fraîches apparaissent davantage en périphérie, dans les secteurs végétalisés, et dans des espaces pouvant être influencés par le relief et l'exposition. Les comparaisons interannuelles montrent des évolutions non uniformes selon la saison, suggérant une combinaison d'effets liés aux conditions de surface, aux transformations urbaines et aux conditions spécifiques d'acquisition.

L'analyse NDVI température par corrélation sur des points d'échantillonnage ne fait pas ressortir une relation inverse forte de manière globale. En revanche, l'analyse par classes de NDVI met en évidence un motif stable : la température moyenne diminue lorsque le niveau de végétation augmente, ce qui soutient l'existence d'un effet de refroidissement relatif associé à la végétation, malgré des facteurs confondants comme la topographie, la morphologie urbaine et les matériaux. Un exemple marquant est la ceinture périphérique végétalisée observée en juillet 2025, associée à des LST plus basses. Les principales limites concernent l'échantillonnage temporel restreint et l'absence de données météorologiques locales, liée à une coupure d'Internet. Des travaux futurs pourraient intégrer davantage de dates par saison, des données climatiques in situ et une cartographie plus fine des surfaces afin de mieux expliquer les contrastes thermiques et d'évaluer le potentiel rafraîchissant des espaces végétalisés périphériques.

Mots-clés : Télédétection, Landsat 8, Température de surface (LST), NDVI, Sanandaj, Chaleur urbaine.

Remerciements

La réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible sans le soutien de nombreuses personnes, auxquelles j'adresse ma profonde gratitude.

Je remercie le Dr Gregory Giuliani, directeur de mémoire, ainsi que M. Florian Franziskakis, pour leur accompagnement, leurs conseils et leur disponibilité tout au long de ce travail.

Je remercie également l'ensemble de mes professeurs et assistants de la Faculté des Sciences de la Société, ainsi que du Certificat Complémentaire en Géomatique, pour la qualité de leurs enseignements et leur soutien.

Enfin, j'adresse un immense merci à mon mari, Jiro, pour son soutien constant, sa patience et ses encouragements durant toute cette expérience.

Table des matières

1. Introduction.....	6
1.1 Contexte général et enjeux	6
1.2 Problématique.....	6
1.3 Objectifs du travail.....	7
1.4 Questions de recherche	8
1.4.1 Question principale.....	8
1.4.2 Questions de recherche spécifiques	8
1.5 Périmètre de l'étude et choix de la zone d'étude (Sanandaj).....	8
1.6 Organisation du rapport	9
2. Cadre conceptuel et bases théoriques	10
2.1 Télédétection urbaine et analyse environnementale	10
2.2 Landsat 8, capteurs OLI et TIRS, niveaux de produits (L1, L2)	10
2.3 Indice NDVI et interprétation thématique	12
2.4 Température de brillance (BT) et radiance au sommet de l'atmosphère (TOA)	13
2.5 Émissivité de surface (LSE) et lien avec la végétation	13
2.6 Température de surface (LST), sens physique et limites d'interprétation	14
2.7 Relation NDVI et LST et principales tendances attendues.....	14
3. Données, zone d'étude et méthodologie	16
3.1 Présentation de la zone d'étude (Sanandaj, Kurdistan, Iran).....	16
3.2 Données satellitaires utilisées	17
3.2.1 Images Landsat 8 OLI TIRS L1	17
3.2.2 Dates d'acquisition et logique saisonnière (avril, juillet).....	17
3.2.3 Bandes mobilisées (4, 5, 10)	17
3.3 Organisation et préparation des données	17
3.3.1 Organisation des dossiers et conventions de nommage	17
3.3.2 Environnement logiciel et outils de traitement	18
3.3.3 Découpage des images sur la zone d'étude	18
3.4 Chaîne de traitement et équations	18
3.4.1 Calcul du NDVI	19
3.4.2 Classification thématique du NDVI en classes d'occupation du sol.....	19
3.4.3 Conversion DN vers TOA radiance	20
3.4.4 Calcul de la BT	20
3.4.5 Calcul de la proportion de végétation (PV)	21
3.4.6 Calcul de l'émissivité (LSE)	21
3.4.7 Calcul final de la LST avec correction d'émissivité.....	21
3.5 Production cartographique.....	22
3.5.1 Conventions de mise en page et harmonisation des classes de température	22

3.5.2 Séries de cartes produites (NDVI, BT, LSE, LST)	22
4. Analyses et résultats	35
4.1 Analyses comparatives	35
4.1.1 Différences saisonnières intra année (avril contre juillet)	35
4.1.2 Différences temporelles interannuelles (2015 contre 2025)	37
4.1.3 Graphiques composés de comparaison saisonnière et temporelle.....	39
4.2 Indicateurs statistiques sur les rasters LST	43
4.2.1 Min, max, moyenne, médiane, écart type	43
4.2.2 Tableau comparatif fusionné.....	43
4.3 Échantillonnage spatial et extraction de valeurs	44
4.3.1 Stratégie de points aléatoires.....	44
4.3.2 Extraction NDVI et LST sur points communs	44
4.4 Analyses graphiques avec Python	44
4.4.1 Évolution de la LST moyenne.....	44
4.4.2 Écart type et hétérogénéité spatiale	45
4.4.3 Distribution par boxplot sur échantillon de pixels	45
4.4.4 Nuages de points NDVI et LST et corrélations.....	47
4.4.5 Relation NDVI classes et LST	51
4.4.6 Répartition par plages de température et zones géographiques.....	53
4.5 Résultats.....	57
4.5.1 Résultats NDVI	57
4.5.2 Résultats LST	58
5. Discussion et Conclusion	59
5.1 Synthèse des principaux enseignements.....	59
5.2 Interprétation de la relation NDVI et LST	59
5.3 Lecture spatiale des zones chaudes et des zones plus fraîches	59
5.4 Évolution 2015–2020–2025 et rôle de la saisonnalité	60
5.5 Cohérence avec les tendances attendues et comparaison qualitative avec la littérature	60
5.6 Limites de l'approche et biais possibles	61
5.7 Recommandations techniques pour des travaux futurs.....	61
5.8 Conclusion générale	62
6. Bibliographie	63
7. Annexes.....	67

1. Introduction

1.1 Contexte général et enjeux

Les températures augmentent et les épisodes de chaleur extrême deviennent plus préoccupants, avec des effets déjà observés dans de nombreuses régions [1], [2]. Dans les espaces urbains, l'effet d'îlot de chaleur peut renforcer la chaleur près du sol et augmenter l'exposition des habitants [1], [3]. Ces conditions posent des enjeux importants pour la santé, le confort et la gestion urbaine, ce qui rend nécessaire une meilleure connaissance de la répartition spatiale de la chaleur [1], [2]. Dans ce cadre, nous cherchons à relier la chaleur de surface et la couverture végétale, car la végétation est fréquemment mobilisée comme levier d'adaptation et d'aménagement [1].

Pour analyser ces enjeux à l'échelle d'une ville, la télédétection constitue une approche pertinente, car elle permet de produire des observations cohérentes et comparables dans le temps. Dans notre travail, nous utilisons Landsat 8 et ses capteurs OLI et TIRS afin d'estimer des indicateurs tels que le NDVI et la température de surface, à partir d'images Level 1 et de leurs métadonnées. [4], [5]. Les ressources USGS décrivent aussi les conversions nécessaires, notamment le passage de la radiance au sommet de l'atmosphère vers la température de brilliance, qui soutient ensuite l'estimation de la température de surface [5], [6].

Enfin, l'approche est pertinente pour une ville comme Sanandaj, située dans un contexte climatique contrasté avec une saison chaude marquée et le choix d'une comparaison en avril et en juillet s'inscrit dans une logique saisonnière, juillet étant typiquement le mois le plus chaud à Sanandaj selon les normales disponibles, ce qui rend la comparaison plus informative [7].

1.2 Problématique

Les épisodes de chaleur représentent un risque croissant pour les sociétés, et les villes sont particulièrement concernées en raison de l'exposition des habitants et de la concentration des enjeux sanitaires et urbains [1], [2].

Pour agir efficacement, nous devons comprendre où se situent les zones les plus chaudes et comment ces zones évoluent selon les saisons et les années. Or, une observation fine et continue de la chaleur à l'échelle intra urbaine est souvent difficile à obtenir uniquement par des mesures au sol, surtout lorsqu'on veut comparer plusieurs années avec une méthode identique [1].

Dans ce contexte, nous posons la problématique suivante : comment caractériser, de manière cohérente et reproductible, la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface à Sanandaj, et dans quelle mesure cette variabilité est liée à la couverture végétale.

Nous utilisons des images Landsat 8, car elles permettent d'estimer des indicateurs comme le NDVI et la température de surface à partir des bandes optiques et thermiques, en s'appuyant sur des procédures documentées de conversion radiométrique et thermique [4], [6], [8].

Cette estimation implique toutefois des choix méthodologiques importants, notamment l'estimation de l'émissivité de surface à partir d'indicateurs de végétation et l'usage d'algorithmes de type single channel ou apparentés, ce qui rend nécessaire de bien expliciter nos hypothèses et nos limites [9], [10].

Questions de recherche associées :

1. Comment la température de surface se répartit-elle dans l'espace à Sanandaj pour avril et juillet, et comment cette répartition évolue-t-elle entre 2015, 2020 et 2025.
2. Quelle relation observons-nous entre NDVI et température de surface, et cette relation change-t-elle selon la saison et l'année.
3. Quels sont les secteurs qui concentrent les températures les plus élevées, et comment ces secteurs se comparent entre les cartes de différence saisonnière et temporelle.

1.3 Objectifs du travail

Notre objectif général est de caractériser la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface à Sanandaj, et d'examiner son lien avec la couverture végétale, afin de produire un diagnostic reproductible utile à la compréhension des dynamiques thermiques urbaines. Pour atteindre cet objectif, nous mobilisons la télédétection Landsat 8 et des procédures de traitement décrites dans la documentation USGS, ce qui permet de comparer des dates et des saisons avec un cadre méthodologique cohérent.

Objectifs spécifiques :

1. Constituer une série d'images Landsat 8 (avril et juillet, 2015, 2020, 2025) et préparer un jeu de données propre et homogène pour l'analyse.
2. Produire, pour chaque date, les cartes de NDVI, puis les produits thermiques nécessaires (BT, LSE, LST) selon une chaîne de calcul explicitée et traçable.
3. Harmoniser la lecture cartographique grâce à des classes communes pour le NDVI et pour les températures, afin de faciliter la comparaison entre dates.
4. Mettre en évidence les contrastes saisonniers, en produisant des cartes de différence entre juillet et avril pour chaque année.
5. Mettre en évidence l'évolution de long terme, en produisant des cartes de différence entre 2025 et 2015 pour avril et pour juillet.
6. Résumer quantitativement chaque raster LST à l'aide d'indicateurs statistiques (min, max, moyenne, médiane, écart type) et d'un tableau comparatif.
7. Analyser la relation NDVI et LST à partir d'un échantillonnage spatial, de graphiques et de mesures de corrélation, puis discuter les tendances observées selon la saison et l'année.
8. Discuter les limites, les choix méthodologiques et les conditions de reproductibilité de notre démarche, en vue d'une réutilisation possible dans d'autres contextes.

1.4 Questions de recherche

1.4.1 Question principale

Comment la température de surface évolue-t-elle à Sanandaj selon la saison et selon l'année, et dans quelle mesure cette évolution est liée à la couverture végétale observée par télédétection ?

1.4.2 Questions de recherche spécifiques

1. Quelle est la distribution spatiale de la LST à Sanandaj pour avril et juillet, en 2015, 2020 et 2025, et quels secteurs apparaissent systématiquement plus chauds que les autres ?
2. Quelle est l'ampleur du contraste saisonnier au sein de chaque année, mesurée par la différence LST juillet moins LST avril, et comment ce contraste varie-t-il entre 2015, 2020 et 2025 ?
3. Quelle est l'évolution interannuelle entre 2015 et 2025 pour avril et pour juillet, et observe-t-on un réchauffement net et spatialement structuré ?
4. Quelle relation observons-nous entre NDVI et LST sur des points d'échantillonnage communs, et cette relation change-t-elle selon la saison et selon l'année ?
5. Lorsque nous regroupons les valeurs par classes issues du NDVI, observe-t-on des différences nettes de LST entre zones bâties, sols nus et zones végétalisées ?
6. Dans quelle mesure nos résultats dépendent-ils des choix méthodologiques liés au traitement thermique Landsat, notamment les conversions radiométriques et l'usage de l'émissivité, et quelles limites cela impose-t-il à l'interprétation ?

1.5 Périmètre de l'étude et choix de la zone d'étude (Sanandaj)

Sanandaj est la capitale de la province du Kurdistan, dans le nord-ouest de l'Iran. La ville se situe dans un contexte de relief, au pied du mont Abidar, à une altitude d'environ 1'521 m, ce qui influence les contrastes locaux de température et la circulation de l'air [11].

Le choix de Sanandaj s'appuie aussi sur un contraste saisonnier marqué entre le printemps et l'été, pertinent pour analyser les variations thermiques [7].

Enfin, ce choix est également motivé par une connaissance approfondie du terrain, l'auteure étant originaire de la province du Kurdistan. Cette proximité permet une meilleure appréhension des réalités locales et soutient l'interprétation qualitative des dynamiques urbaines observées.

Périmètre retenu pour notre travail :

1. Périmètre spatial : notre zone d'étude correspond à l'emprise que nous avons définie pour Sanandaj et l'aéroport de Sanandaj, et que nous utilisons pour découper les scènes Landsat avant traitement.
2. Périmètre temporel : nous comparons deux saisons, avril et juillet, sur trois années de référence, 2015, 2020 et 2025.
3. Périmètre thématique : nous analysons la relation entre végétation et chaleur de surface à travers le NDVI et la température de surface.

4. Périmètre technique : nous utilisons Landsat 8 OLI et TIRS en produits Level 1, avec une résolution de 30 m pour les bandes multispectrales, et une bande thermique acquise à 100 m mais fournie en Level 1 avec un rééchantillonnage à 30 m pour faciliter l'intégration avec les bandes optiques [4], [12].
5. Périmètre d'interprétation : nos résultats décrivent la température de surface estimée par télédétection, utile pour comparer l'espace et le temps, mais différente de la température de l'air mesurée au sol.

1.6 Organisation du rapport

Ce rapport est structuré en cinq parties principales. Nous commençons par présenter le contexte, la problématique, les objectifs et le périmètre de l'étude. Nous décrivons ensuite les bases conceptuelles utiles pour comprendre les indicateurs mobilisés et leur interprétation. La troisième partie détaille nos données et notre méthodologie, depuis la préparation des images jusqu'aux calculs de NDVI, BT, LSE et LST, ainsi que les analyses comparatives et statistiques. La quatrième partie présente les résultats sous forme de cartes, tableaux et graphiques, puis nous les discutons en mettant en évidence les tendances, les explications possibles et les limites. Enfin, nous concluons par une synthèse critique et des recommandations, avant de fournir la bibliographie et les annexes.

2. Cadre conceptuel et bases théoriques

2.1 Télédétection urbaine et analyse environnementale

La télédétection est devenue un outil central pour analyser les environnements urbains, car elle permet d'observer de manière homogène des surfaces étendues et de comparer des territoires à différentes dates [1], [13].

Dans une ville, ces observations sont particulièrement utiles pour relier des contrastes environnementaux à la structure du tissu urbain et aux formes de couverture du sol [13], [14].

Elles complètent les mesures locales, souvent plus fines mais plus difficiles à mobiliser sur de longues périodes et sur l'ensemble d'un territoire urbain.

En particulier, la télédétection thermique permet d'estimer la température de surface, un indicateur clé pour étudier les îlots de chaleur de surface et leur variabilité spatiale [13], [14], [15]. Les travaux de synthèse montrent que la température de surface est fortement liée aux propriétés des matériaux, à l'imperméabilisation et à la présence de végétation, et qu'elle constitue un support pertinent pour comparer l'espace et le temps, tout en restant distincte de la température de l'air [13], [14]. Dans ce cadre, Landsat est largement mobilisé pour des analyses de chaleur urbaine, car il combine des bandes optiques utiles pour des indices de végétation et une bande thermique adaptée à l'estimation de la température de surface [15], [16].

2.2 Landsat 8, capteurs OLI et TIRS, niveaux de produits (L1, L2)

Landsat 8 est un satellite d'observation de la Terre lancé en février 2013, conçu pour fournir des images régulières et comparables dans le temps. Il embarque deux capteurs complémentaires, OLI pour l'optique et TIRS pour la thermique, avec une fauchée d'environ 185 km et un cycle de revisite de 16 jours [4].

Le capteur OLI acquiert des bandes dans le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge à ondes courtes, avec notamment la bande 4 (rouge) et la bande 5 (proche infrarouge), utilisées dans notre calcul du NDVI [4].

Le capteur TIRS acquiert deux bandes thermiques, dont la bande 10, centrale dans notre estimation de la température, avec une résolution native de 100 m mais distribuée sous forme rééchantillonnée à 30 m pour faciliter l'intégration avec les bandes optiques [4], [17].

Tableau 1: Caractéristiques techniques de Landsat 8

Caractéristique	Description / Valeur
Date de lancement	11 février 2013
Opérateur	NASA (Lancement/Capteurs) & USGS (Opérations/Données)
Capteurs embarqués	OLI (Operational Land Imager) & TIRS (Thermal Infrared Sensor)
Cycle de revisite	16 jours (couverture globale)
Fauchée (Swath)	185 km
Résolution spatiale (OLI)	30 m (Visible, NIR, SWIR) / 15 m (Panchromatique)
Résolution spatiale (TIRS)	100 m (acquis) / 30 m (rééchantillonné dans le produit final)
Bandes utilisées (Étude)	Bande 4 (Rouge), Bande 5 (Proche Infrarouge), Bande 10 (Thermique)
Altitude orbitale	~705 km

Dans la logique USGS, les produits de niveau L1 correspondent à des images calibrées et livrées sous forme de nombres numériques (DN) que nous pouvons convertir en réflectance ou radiance au sommet de l'atmosphère grâce aux coefficients fournis dans les métadonnées [6], [18]. Les produits L1 sont aussi structurés en catégories de qualité (Real Time, Tier 1, Tier 2), où Tier 1 est considéré comme le plus adapté aux analyses temporelles grâce à une qualité radiométrique et géométrique mieux caractérisée [18].

Les produits de niveau L2 vont plus loin, car ils proposent des produits scientifiques prêts pour l'analyse, notamment la réflectance de surface (correction atmosphérique) et la température de surface [19].

Ces produits L2 sont générés à partir des scènes L1 (Tier 1 ou Tier 2) et nécessitent des données auxiliaires atmosphériques pour produire des estimations scientifiquement exploitables [15], [19], [20].

Dans ce travail, nous avons choisi d'utiliser le niveau Level 1, car notre objectif est de garder une maîtrise complète de la chaîne de calcul et de documenter chaque étape, depuis les valeurs numériques jusqu'aux produits finaux.

Tableau 2: Comparaison des Niveaux de Traitement (Level 1 vs Level 2)

Critère	Niveau 1 (Level 1 - Collection 2)	Niveau 2 (Level 2 - Science Products)
Donnée de base	Nombres Numériques (DN) calibrés et géoréférencés.	Produits dérivés issus du traitement des scènes L1.
Grandeur physique	Radiance ou Réflectance au Sommet de l'Atmosphère (TOA).	Réflectance ou Température de Surface (Surface BOA).
Correction atmosphérique	Non appliquée. L'utilisateur doit la faire s'il veut des valeurs de surface.	Déjà appliquée par l'USGS (via algorithmes LaSRC ou autres).
Contenu principal	Bandes spectrales brutes (DN), Fichier de métadonnées (MTL), Quality Assessment (QA).	Surface Reflectance (SR), Surface Temperature (ST), Masques de qualité.
Usage recommandé	Utilisateurs avancés souhaitant appliquer leurs propres algorithmes de correction (comme vous le faites avec le Single Channel).	Utilisateurs souhaitant des données "prêtes à l'emploi" pour des analyses temporelles directes.
Catégorisation	Classé en Tier 1 (Haute qualité) ou Tier 2.	Généré uniquement si la donnée source L1 répond aux critères requis.

2.3 Indice NDVI et interprétation thématique

Le NDVI, pour Normalized Difference Vegetation Index, est un indice spectral proposé dès les premiers travaux de suivi de la végétation par satellite et largement utilisé depuis [21], [22]. Son principe repose sur une propriété simple : une végétation active absorbe fortement le rouge pour la photosynthèse et réfléchit davantage le proche infrarouge, ce qui permet d'en déduire un indicateur de vigueur ou de densité de végétation [22], [23]. Dans le cas de Landsat 8, nous calculons le NDVI à partir de la bande 5 (NIR) et de la bande 4 (rouge), selon la formule $(\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R})$ [23].

Le NDVI varie en général entre -1 et +1, et les valeurs faibles correspondent le plus souvent à l'eau, aux surfaces très minérales ou à des sols peu ou pas végétalisés, tandis que les valeurs plus élevées traduisent une couverture végétale plus importante [24], [25]. Ces ordres de grandeur restent indicatifs, car les valeurs peuvent varier selon la saison, l'humidité, l'état de la végétation, l'angle solaire, ainsi que le niveau de correction atmosphérique appliqué aux images [25], [26].

Dans notre travail, nous utilisons le NDVI comme un proxy de la végétation afin de proposer une lecture thématique de la couverture du sol, et pour étudier le lien entre végétation et température de surface [25]. Notre classification en catégories (eau, bâti, sol nu, formations herbacées, végétation clairsemée, végétation dense) est un choix opérationnel visant surtout la comparaison temporelle et saisonnière au sein de notre zone d'étude.

Enfin, il est important de rappeler que le NDVI présente des limites bien connues : il peut saturer en présence de végétation très dense, et il peut être influencé par la brillance du sol ou par des effets atmosphériques [26], [27]. Ces limites expliquent l'existence d'autres indices, par exemple SAVI pour réduire l'influence du sol, ou EVI pour améliorer la sensibilité dans certains contextes, mais le NDVI reste souvent privilégié pour sa simplicité et sa comparabilité [27], [28].

2.4 Température de brillance (BT) et radiance au sommet de l'atmosphère (TOA)

En télédétection, le signal thermique mesuré par le capteur est d'abord exprimé en radiance au sommet de l'atmosphère, c'est à dire une radiance qui représente l'énergie reçue par le capteur après son passage dans l'atmosphère [6], [29]. Pour les produits Landsat Level 1, l'USGS fournit dans le fichier de métadonnées (MTL) les coefficients nécessaires pour convertir les valeurs numériques (DN) en radiance TOA, via une relation linéaire de type gain et biais [6], [30].

À partir de cette radiance TOA, nous calculons ensuite la température de brillance (BT). Cette température correspond à la température qu'aurait un corps noir pour émettre la même radiance que celle observée par le capteur dans la bande thermique considérée [6], [31]. La conversion radiance TOA vers BT repose sur la loi de Planck, sous une forme opérationnelle utilisant deux constantes K1 et K2 fournies dans les métadonnées Landsat [6], [30].

Il est important de préciser que la BT est une température au capteur, donc un produit intermédiaire. Elle n'est pas encore corrigée des effets d'émissivité de surface, et elle n'a pas la même signification que la température de surface finale (LST) que nous calculons ensuite [15]. Enfin, pour Landsat 8, la qualité radiométrique du capteur thermique TIRS a fait l'objet de corrections et d'améliorations liées notamment aux effets de lumière parasite, ce qui justifie de rester attentifs aux recommandations de l'USGS et à la littérature lors de l'interprétation [32], [33].

2.5 Émissivité de surface (LSE) et lien avec la végétation

L'émissivité de surface, notée LSE ou ϵ , est une propriété des matériaux qui mesure leur efficacité à émettre un rayonnement thermique, par comparaison avec un corps noir à la même température [34], [35]. Dans les méthodes d'estimation de la température de surface à partir d'images thermiques, l'émissivité est un paramètre essentiel, car une erreur sur ϵ se répercute directement sur l'estimation de la LST [36].

L'émissivité dépend du type de surface et de la longueur d'onde, ce qui signifie qu'elle varie entre eau, sols nus, matériaux urbains et couvert végétal [34], [37]. En pratique, une scène contient souvent des pixels mixtes, où la contribution de la végétation et celle du sol ou du bâti se combinent, ce qui motive l'usage d'approches basées sur la fraction de végétation [37].

Dans notre démarche, nous estimons l'émissivité à partir du NDVI via la proportion de végétation (PV), ce qui revient à relier un indicateur optique à un paramètre thermique nécessaire au calcul de la LST [37], [38].

La formule opérationnelle que nous utilisons, souvent associée à la méthode NDVI et fraction de végétation, s'écrit $\varepsilon = 0.004 \times PV + 0.986$, et elle est fréquemment reprise dans la littérature appliquée Landsat [38]. Cette logique est cohérente avec l'idée générale des approches NDVI threshold, où l'émissivité des pixels mixtes est interpolée entre des valeurs typiques de sol nu et de végétation [37].

Enfin, il faut rappeler que cette estimation reste une approximation. Elle dépend du calcul du NDVI, du choix de NDVI_{min} et NDVI_{max}, et elle ne représente pas toutes les variations liées aux matériaux urbains, à l'humidité des sols ou à la rugosité de surface [36], [37].

2.6 Température de surface (LST), sens physique et limites d'interprétation

La température de surface, souvent notée LST, désigne la température de la couche superficielle de la surface terrestre, parfois appelée température de peau. En télédétection, elle est estimée à partir du rayonnement thermique mesuré par le capteur et représente donc une température radiative agrégée à l'échelle du pixel [15], [34], [39].

Sur le plan physique, la LST reflète le bilan d'énergie à l'interface sol-atmosphère et varie fortement selon la nature des surfaces, par exemple végétation, sol nu, eau, matériaux urbains, ainsi que selon l'humidité du sol et l'albédo. C'est pour cela qu'elle est largement utilisée pour étudier les contrastes environnementaux et, en ville, les îlots de chaleur de surface [13], [39], [40].

Il est important de rappeler que la LST n'est pas la température de l'air mesurée à 2 m. Les deux variables sont liées, mais elles ne décrivent pas la même réalité et peuvent présenter des écarts significatifs, notamment en milieux secs et minéraux où la surface peut chauffer beaucoup plus vite que l'air [40], [41].

Enfin, la LST estimée par satellite doit être interprétée avec prudence, car elle dépend de plusieurs paramètres et hypothèses. La restitution est un problème difficile, car elle nécessite de représenter correctement l'émissivité et les effets atmosphériques, et elle reste sensible à la présence de pixels mixtes, à l'hétérogénéité urbaine, aux ombres, ainsi qu'au fait que l'observation correspond à un instant précis de passage du satellite. Pour ces raisons, la LST est un excellent indicateur pour comparer des contrastes spatiaux et des différences entre dates, mais elle ne doit pas être confondue avec un diagnostic direct de confort thermique ou de température de l'air [13], [19], [42].

2.7 Relation NDVI et LST et principales tendances attendues

La relation entre NDVI et température de surface est souvent étudiée en milieu urbain, car elle permet de relier un indicateur de végétation à un indicateur thermique utile pour décrire les

contrastes de chaleur à l'échelle de la ville [13], [43]. De manière générale, de nombreuses études observent une relation inverse, où des valeurs plus élevées de NDVI sont associées à des températures de surface plus faibles, ce qui est cohérent avec le rôle de l'ombrage et surtout de l'évapotranspiration [43], [44], [45].

Cette relation n'est toutefois pas une règle mécanique. Elle dépend du contexte climatique, de la saison, de l'humidité des sols, de l'hétérogénéité des pixels, ainsi que de la présence de surfaces imperméables ou de sols nus qui modifient fortement le bilan d'énergie [13], [44].

En milieu urbain, les surfaces imperméables ont tendance à être plus chaudes que les zones végétalisées, et la comparaison NDVI LST est souvent mobilisée pour mettre en évidence ces contrastes et leur variabilité saisonnière [43], [44].

Dans notre travail, nous utilisons cette relation comme un fil conducteur pour interpréter nos cartes et nos graphiques, en comparant avril et juillet et en suivant l'évolution entre 2015, 2020 et 2025. Nous attendons surtout de voir si les zones les plus végétalisées restent relativement plus fraîches, et si la force de la relation varie selon la saison.

3. Données, zone d'étude et méthodologie

3.1 Présentation de la zone d'étude (Sanandaj, Kurdistan, Iran)

Sanandaj est une ville du nord-ouest de l'Iran et la capitale de la province du Kurdistan. Elle est située au pied du mont Abidar, à une altitude d'environ 1'521 m, dans un contexte de relief marqué qui influence les contrastes locaux de température et d'occupation du sol [11]. Les coordonnées du centre urbain se situent autour de 35.315° N et 46.999° E, ce qui permet de localiser précisément notre emprise dans les scènes Landsat [46].

Du point de vue environnemental, Sanandaj se trouve dans une région montagneuse associée à la chaîne du Zagros, avec une variabilité saisonnière prononcée, ce qui est cohérent avec notre choix d'analyser avril et juillet [47]. Les sources démographiques disponibles indiquent une population municipale de 412'767 habitants au recensement de 2016, tandis que des estimations plus récentes parlent d'un ordre de grandeur proche de 480'000 à 500'000 habitants selon les définitions retenues (ville ou agglomération) [48], [49], [50].

Dans le cadre de notre projet, nous définissons un périmètre d'analyse correspondant à l'emprise urbaine de Sanandaj utilisée pour le découpage des rasters, avec une surface d'environ 44,50 km².

Nous intégrons aussi l'emprise de l'aéroport de Sanandaj, d'environ 1,31 km², car cet équipement constitue un repère spatial clairement identifiable et utile pour l'interprétation de certains contrastes observés sur les cartes thermiques.

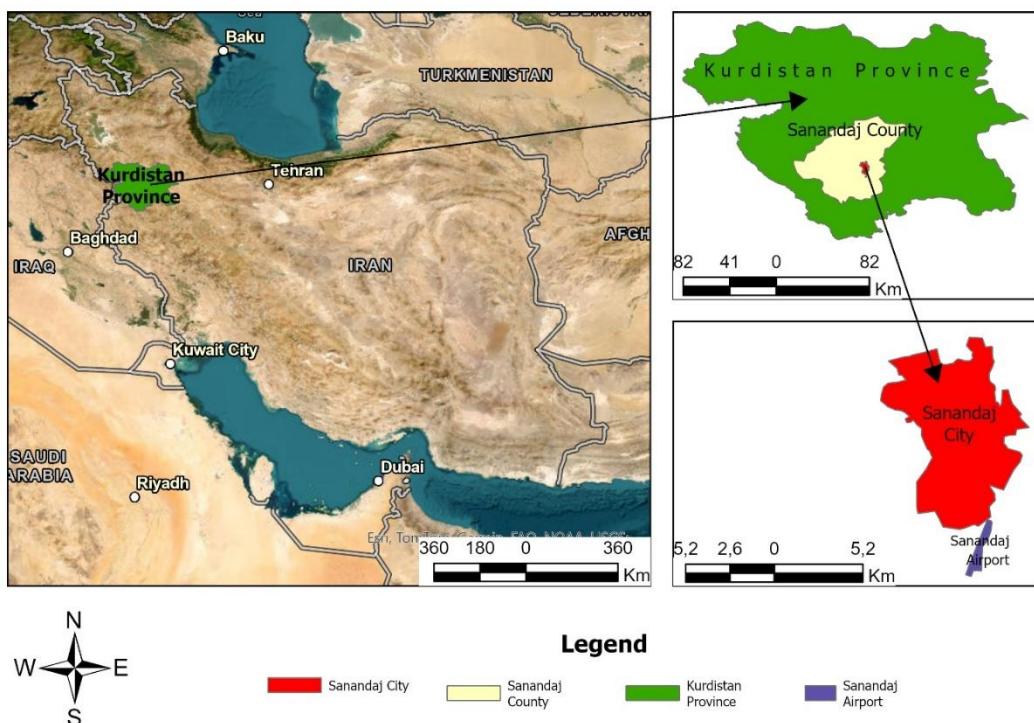


Figure 1: Localisation de la zone d'étude : position de Sanandaj au Kurdistan en Iran

3.2 Données satellitaires utilisées

3.2.1 Images Landsat 8 OLI TIRS L1

Nous utilisons des scènes Landsat 8 issues des capteurs OLI (optique) et TIRS (thermique). Les données mobilisées sont des produits de niveau Level 1 (Collection 2), accompagnés d'un fichier de métadonnées (MTL) qui contient les coefficients nécessaires aux conversions radiométriques [4], [8], [51].

Les produits Level 1 sont accessibles et téléchargeables via la plateforme USGS EarthExplorer, ce qui garantit la traçabilité des scènes utilisées [8], [52].

3.2.2 Dates d'acquisition et logique saisonnière (avril, juillet)

Notre série d'analyse comprend deux dates par année, une en avril et une en juillet, pour les années 2015, 2020 et 2025, afin de comparer une situation printanière et une situation estivale. Nous retenons ces mois pour documenter un contraste saisonnier marqué, tout en conservant une logique identique entre les années, ce qui facilite la comparaison temporelle.

Dates utilisées dans notre étude (issues de notre sélection EarthExplorer) :

- 2015 : 20 avril et 09 juillet
- 2020 : 17 avril et 06 juillet
- 2025 : 15 avril et 04 juillet

3.2.3 Bandes mobilisées (4, 5, 10)

Pour le NDVI, nous utilisons la bande 4 (rouge) et la bande 5 (proche infrarouge), qui sont les bandes standard recommandées pour cet indice sur Landsat 8 [17]. Pour l'information thermique, nous utilisons la bande 10 (TIRS 1), dont l'intervalle spectral est 10.6 à 11.19 µm, avec une résolution native de 100 m et une mise à disposition rééchantillonnée à 30 m dans les produits Level 1 [4], [17].

3.3 Organisation et préparation des données

3.3.1 Organisation des dossiers et conventions de nommage

Pour garantir la traçabilité et éviter les erreurs, nous organisons nos données par année et par mois, puis par type de produit (NDVI, BT, LSE, LST) et par étape de traitement. Nous conservons systématiquement les fichiers d'origine téléchargés depuis EarthExplorer, y compris le fichier de métadonnées MTL, car il contient les informations nécessaires aux conversions radiométriques et à l'identification précise de chaque scène.

Concernant la nomenclature des fichiers, nous appliquons une codification systématique composée d'un préfixe indiquant la nature de la variable (ex : Raw, NDVI, BT, LSE, LST), suivi de la date d'acquisition (Année_Mois). Cette convention assure l'unicité des fichiers téléchargés et des fichiers de sortie et maintient un lien explicite entre chaque produit dérivé et la scène Landsat brute dont il est issu.

3.3.2 Environnement logiciel et outils de traitement

L'ensemble des traitements géomatiques, de la gestion des bases de données à la mise en page cartographique, est réalisé à l'aide du logiciel ArcGIS Pro (version 3.4). Pour la partie de programmation et produire des graphiques, nous utilisons l'environnement Python Notebooks intégré directement dans ArcGIS Pro. Cette approche hybride permet de combiner les fonctionnalités avancées d'analyse spatiale du SIG avec la flexibilité du langage Python pour documenter et reproduire les scripts de traitement.

3.3.3 Découpage des images sur la zone d'étude

Avant tout calcul, nous découpons chaque bande sur l'emprise de la zone d'étude afin de limiter le volume de données et de rendre les traitements plus rapides et plus cohérents. Cette étape permet aussi de garantir que toutes les cartes produites ont exactement la même emprise spatiale, ce qui facilite les comparaisons temporelles, les cartes de différence et l'extraction de valeurs pour les points d'échantillonnage.

Nous conservons une version découpée de chaque bande utilisée, ainsi qu'un dossier de travail pour les rasters intermédiaires, afin de pouvoir reproduire la chaîne de traitement ou vérifier un calcul à tout moment.

3.4 Chaîne de traitement et équations

Afin de passer des données brutes aux cartes de température de surface, nous avons suivi un protocole de traitement rigoureux et linéaire. La Figure 2 ci-dessous synthétise cette chaîne méthodologique. Elle détaille la succession des étapes, depuis l'importation des bandes spectrales et des métadonnées, jusqu'au calcul des variables intermédiaires (NDVI, Émissivité) et l'application de l'algorithme d'inversion thermique pour obtenir la LST finale. Chaque étape de ce diagramme correspond aux équations détaillées dans les sections suivantes.

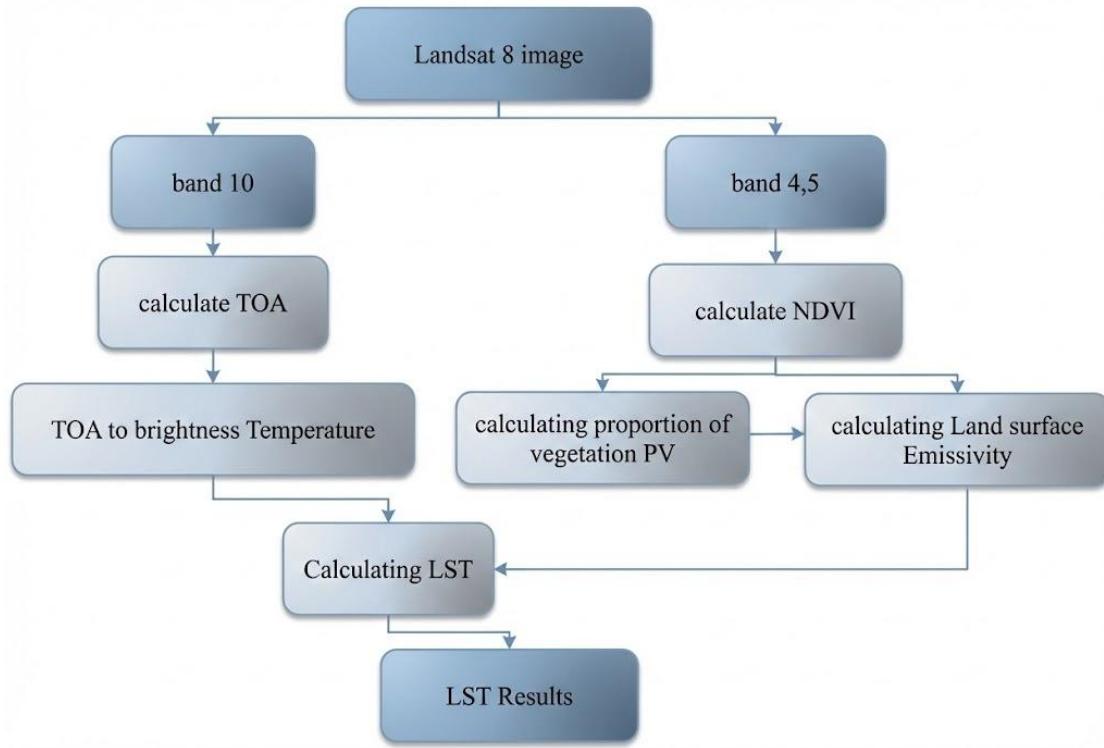


Figure 2: Flowchart traitement LST

3.4.1 Calcul du NDVI

Dans notre étude, nous calculons le NDVI à partir des bandes Landsat 8 OLI suivantes : la bande 4 (rouge, 0.64 à 0.67 µm) et la bande 5 (proche infrarouge, 0.85 à 0.88 µm) [4].

La formule appliquée est la suivante :

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

ce qui correspond à (Band 5 - Band 4) / (Band 5 + Band 4) pour Landsat 8 et 9 [23].

3.4.2 Classification thématique du NDVI en classes d'occupation du sol

Dans notre étude, nous transformons les valeurs continues du NDVI en classes interprétatives afin de faciliter la lecture cartographique et la comparaison entre dates. Cette démarche est cohérente avec une approche NDVI-derived LULC décrite par Akbar et al., qui proposent des plages de NDVI adaptées à six classes : eau, bâti, sol nu, arbustes et herbacées, végétation clairsemée, végétation dense.

Sur cette base, nous adoptons les seuils suivants pour classifier nos cartes NDVI en six classes :

1. Water: NDVI < 0.015
2. Built-up: 0.016 à 0.14
3. Barren Land: 0.141 à 0.18
4. Shrub and Grassland: 0.181 à 0.27

5. Sparse Vegetation: 0.271 à 0.36

6. Dense Vegetation: > 0.361

Ces seuils reprennent la logique de l'article, en introduisant de très légers ajustements pratiques pour éviter les chevauchements et garantir une attribution unique de chaque pixel [53].

Il est important de préciser que cette classification reste une approximation de l'occupation du sol : elle décrit surtout un gradient de végétation, et certaines surfaces peuvent être confondues lorsque leur signature NDVI est proche, par exemple bâti clair, sols nus et surfaces peu végétalisées [23].

Nous utilisons donc ces classes comme un support de comparaison spatio-temporelle, et non comme une cartographie d'occupation du sol au sens d'une classification supervisée complète.

3.4.3 Conversion DN vers TOA radiance

L'USGS recommande une conversion linéaire basée sur deux coefficients présents dans le fichier de métadonnées MTL, un coefficient multiplicatif (ML) et un coefficient additif (AL) [6], [30].

Pour chaque bande concernée, la radiance TOA est calculée avec l'équation suivante [6] :

$$L_\lambda = ML \times Q_{cal} + AL$$

où :

- L_λ est la radiance TOA ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$)
- Q_{cal} est la valeur DN du pixel
- ML correspond à RADIANCE_MULT_BAND_x dans le MTL
- AL correspond à RADIANCE_ADD_BAND_x dans le MTL.

Nous conservons la radiance calculée comme raster intermédiaire afin de garantir la traçabilité des calculs jusqu'à la LST.

3.4.4 Calcul de la BT

Après la conversion des DN en radiance TOA L_λ (section 3.4.3), nous calculons la température de brillance (BT), aussi appelée température au satellite.

Nous appliquons l'équation opérationnelle suivante [6] :

$$BT = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1\right)} - 273.15$$

où :

- L_λ est la radiance TOA de la bande thermique (issue de 3.4.3)
- K1 et K2 sont les constantes thermiques de la bande 10, présentes dans le MTL (K1_CONSTANT_BAND_10 et K2_CONSTANT_BAND_10).

3.4.5 Calcul de la proportion de végétation (PV)

La proportion de végétation, notée PV, représente une estimation de la fraction de végétation à l'intérieur de chaque pixel. Elle sert ensuite à corriger l'émissivité dans les calculs de température de surface. Nous calculons PV à partir d'un NDVI mis à l'échelle entre une valeur minimale et une valeur maximale, puis nous appliquons un exposant 2 selon l'approche proposée par Carlson et Ripley et largement reprise dans les méthodes NDVI threshold [37], [54].

Formule utilisée [54] :

$$PV = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2$$

Définition des paramètres :

- NDVI est le raster NDVI calculé à l'étape 3.4.1
- NDVI_min et NDVI_max sont les valeurs minimale et maximale du NDVI observées dans notre zone d'étude pour la date considérée [37], [54].

3.4.6 Calcul de l'émissivité (LSE)

Dans notre chaîne de traitement, nous estimons l'émissivité à partir de la proportion de végétation PV calculée à l'étape 3.4.5, selon une approche largement utilisée avec Landsat [9], [37].

Formule utilisée [9] :

$$LSE = 0.004 \times PV + 0.986$$

Remarque méthodologique

Cette estimation est une approximation pratique, surtout adaptée aux pixels mixtes sol-végétation. En milieu urbain, l'émissivité varie aussi selon les matériaux (asphalte, béton, toitures), ce qui peut introduire des incertitudes si l'on ne dispose pas d'une information plus détaillée sur les surfaces [37].

3.4.7 Calcul final de la LST avec correction d'émissivité

Après le calcul de la radiance TOA puis de la température de brillance BT, nous estimons la température de surface LST en appliquant une correction liée à l'émissivité, car la BT correspond à une température radiative au capteur et pas encore à une température de surface [55].

Formules de la LST [55], [56] :

1. Nous travaillons avec BT en Kelvin :

$$BT_K = BT + 273.15$$

2. Nous utilisons une formulation classique d'inversion de la loi de Planck avec correction d'émissivité, souvent écrite sous la forme suivante (en Kelvin) :

$$LST_K = \frac{BT_K}{1 + \left(\frac{\lambda \cdot BT_K}{\rho}\right) \ln(\varepsilon)}$$

où ε correspond à l'émissivité de surface LSE calculée à l'étape 3.4.6, λ est la longueur d'onde moyenne associée à la bande thermique, et ρ correspond à la seconde constante de Planck (en pratique $1.438 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$, soit $14388 \mu\text{m}\cdot\text{K}$).

Pour Landsat 8, la bande 10 couvre le domaine thermique autour de 10.6 à 11.19 μm, ce qui justifie l'usage d'une valeur moyenne proche de 10.9 μm dans une approche opérationnelle [4], [56].

3. Enfin nous convertissons en degrés Celsius :

$$LST_{^\circ C} = LST_K - 273.15$$

3.5 Production cartographique

3.5.1 Conventions de mise en page et harmonisation des classes de température

Pour assurer une lecture claire et comparable entre toutes nos cartes, nous adoptons une mise en page identique, avec les éléments cartographiques essentiels : titre, légende, échelle graphique et flèche nord.

Nous appliquons les mêmes règles de présentation sur l'ensemble de la série : même emprise spatiale (zone d'étude), même système de coordonnées, même échelle d'affichage, et même hiérarchie visuelle entre la carte principale, la légende et les informations de contexte.

Pour les cartes de température (BT, LST et cartes de différence), nous harmonisons la classification en fixant des plages de température identiques entre les dates, afin de rendre les comparaisons saisonnières et interannuelles directement lisibles.

Nous utilisons une progression de couleurs adaptée à une variable ordonnée, et nous conservons la même légende et les mêmes seuils sur toutes les cartes de température.

Conventions appliquées dans nos cartes de température :

1. Unité affichée dans la légende : degrés Celsius.
2. Plages de classification fixes sur l'ensemble de la série : intervalles réguliers de 5 degrés, de -20 à 60, avec les couleurs associées définies.
3. Même nombre de classes et mêmes seuils pour toutes les cartes BT et LST, afin que la couleur ait le même sens d'une date à l'autre.

3.5.2 Séries de cartes produites (NDVI, BT, LSE, LST)

Dans ce travail, nous produisons une série complète de cartes thématiques afin de documenter, pour chaque date, la végétation et les variables thermiques dérivées. Chaque variable est cartographiée pour les 6 scènes retenues (avril et juillet, 2015, 2020, 2025), ce qui représente 24 cartes au total, organisées dans l'ordre suivant : 6 cartes NDVI, 6 cartes BT, 6 cartes LSE, 6 cartes LST.

Cartes NDVI :

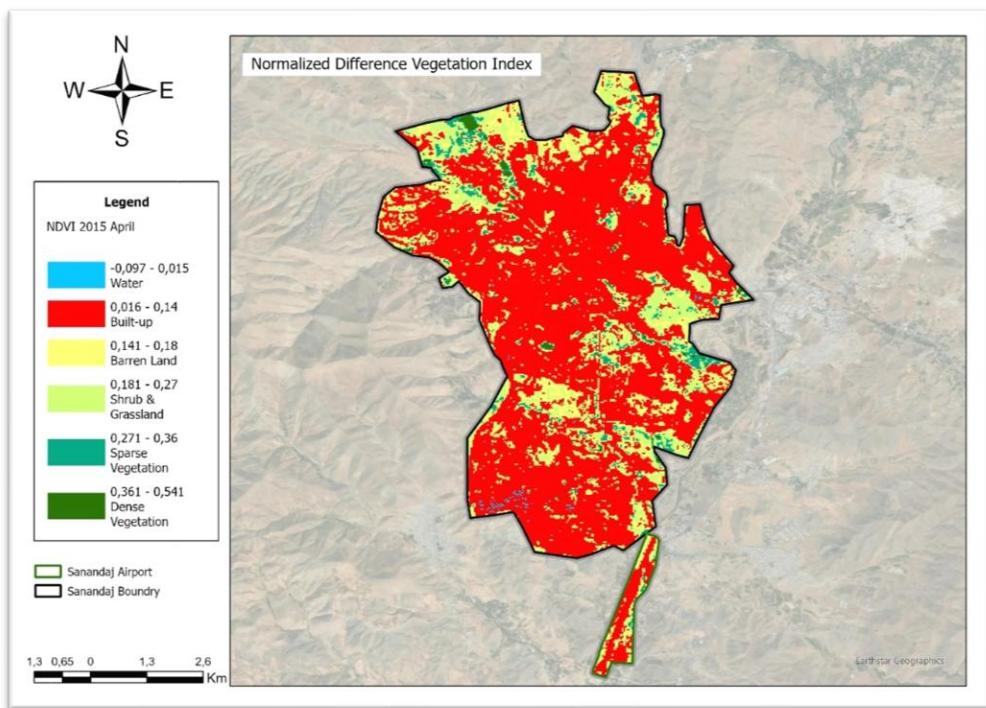


Figure 3: NDVI de Sanandaj, avril 2015

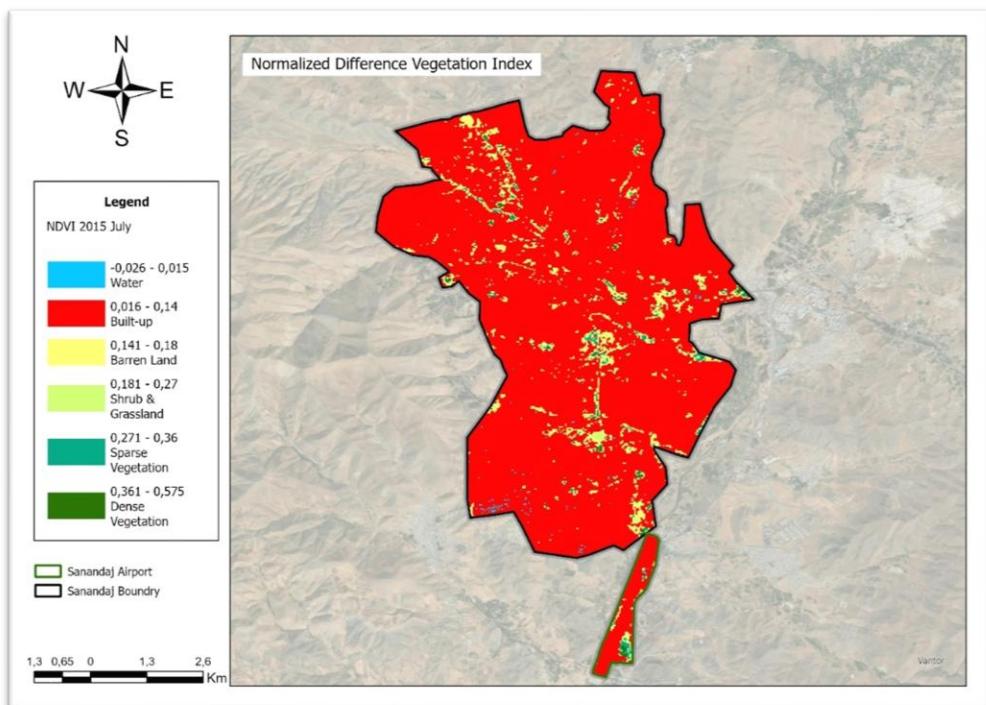


Figure 4: NDVI de Sanandaj, juillet 2015.

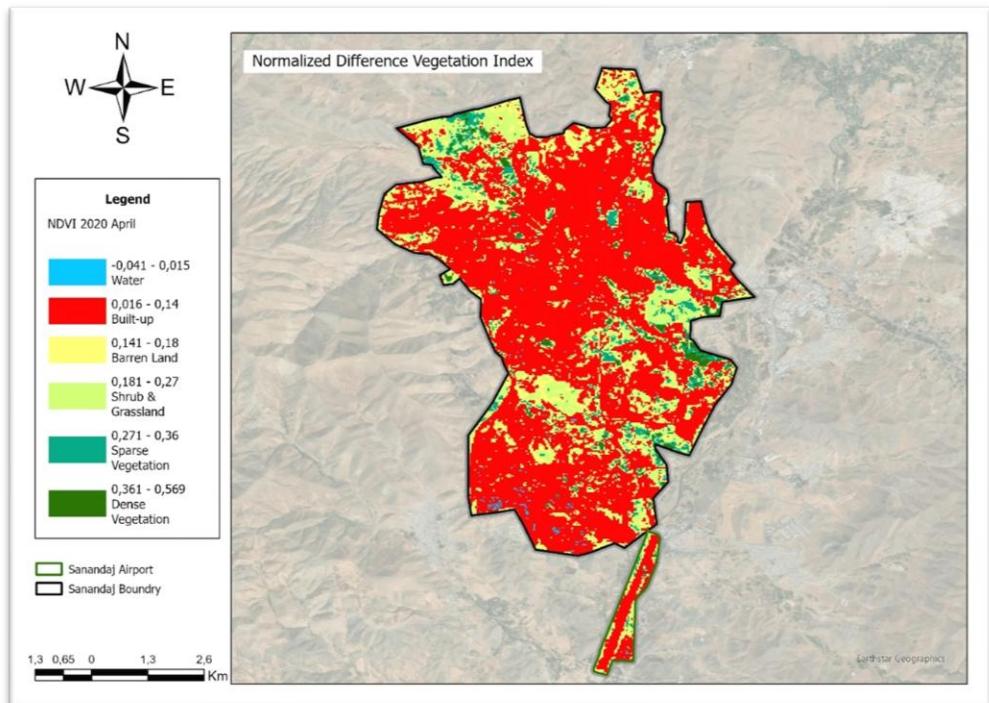


Figure 5: NDVI de Sanandaj, avril 2020

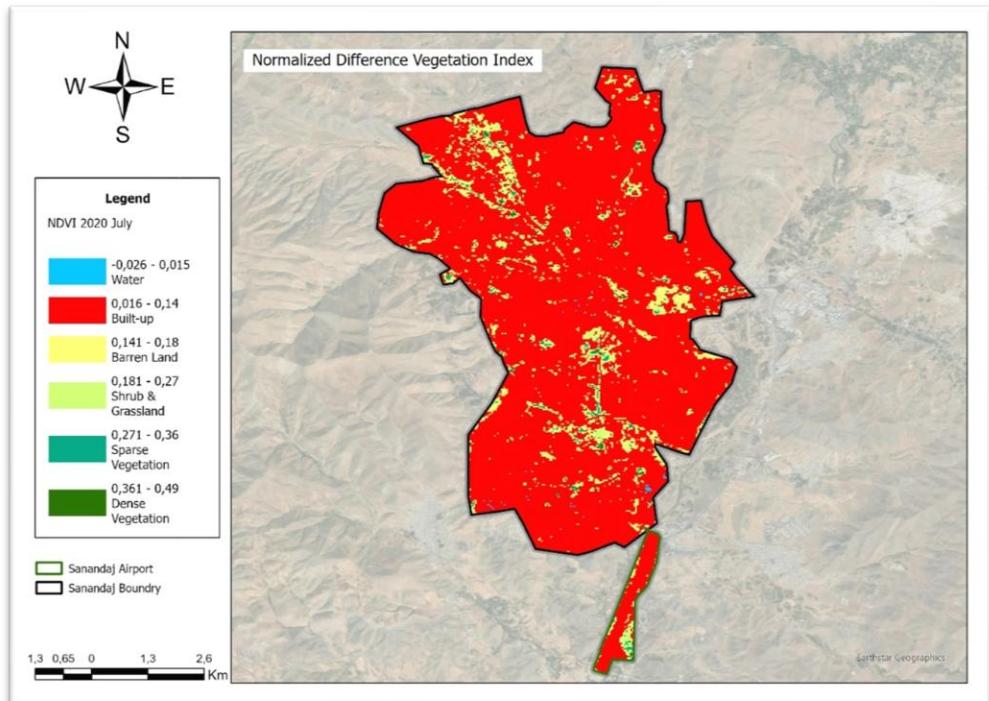


Figure 6: NDVI de Sanandaj, juillet 2020

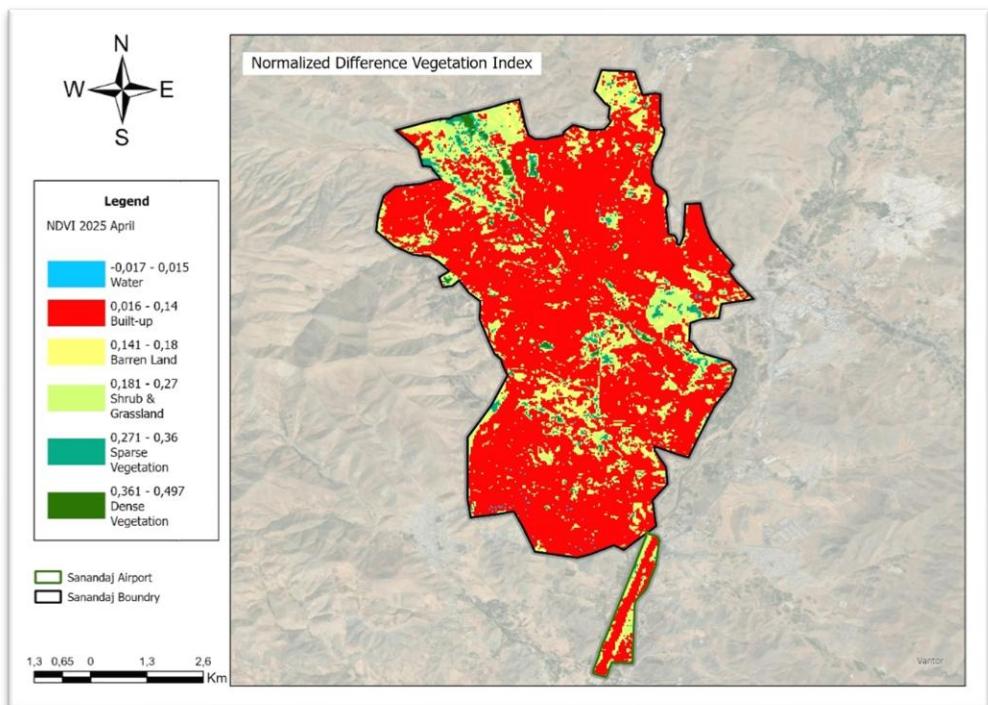


Figure 7: NDVI de Sanandaj, avril 2025

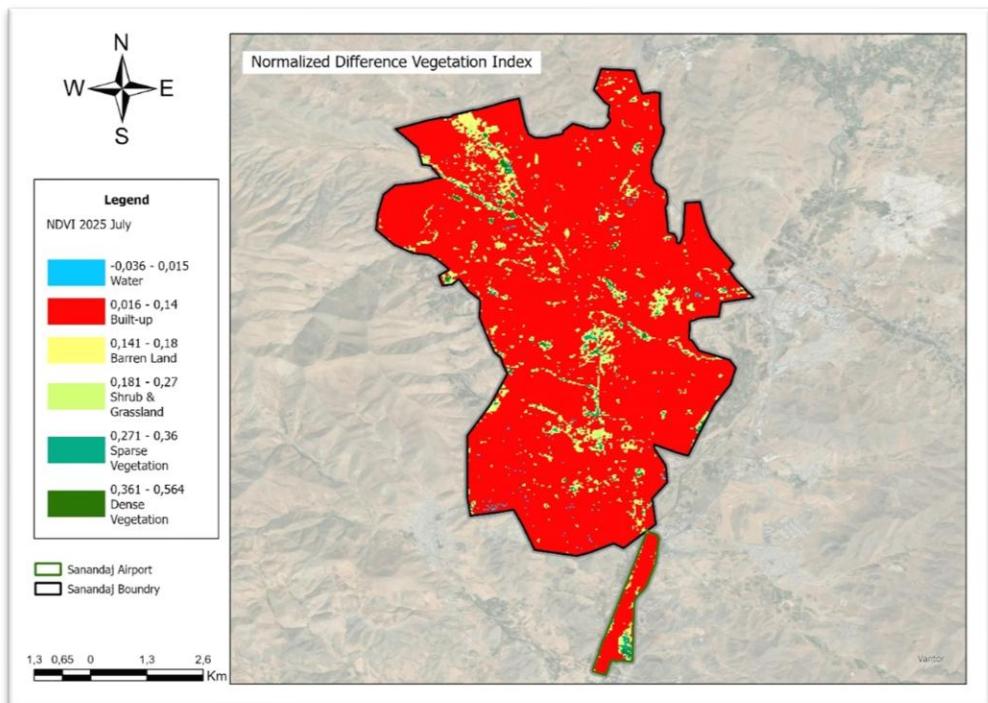


Figure 8: NDVI de Sanandaj, juillet 2025

Cartes BT :

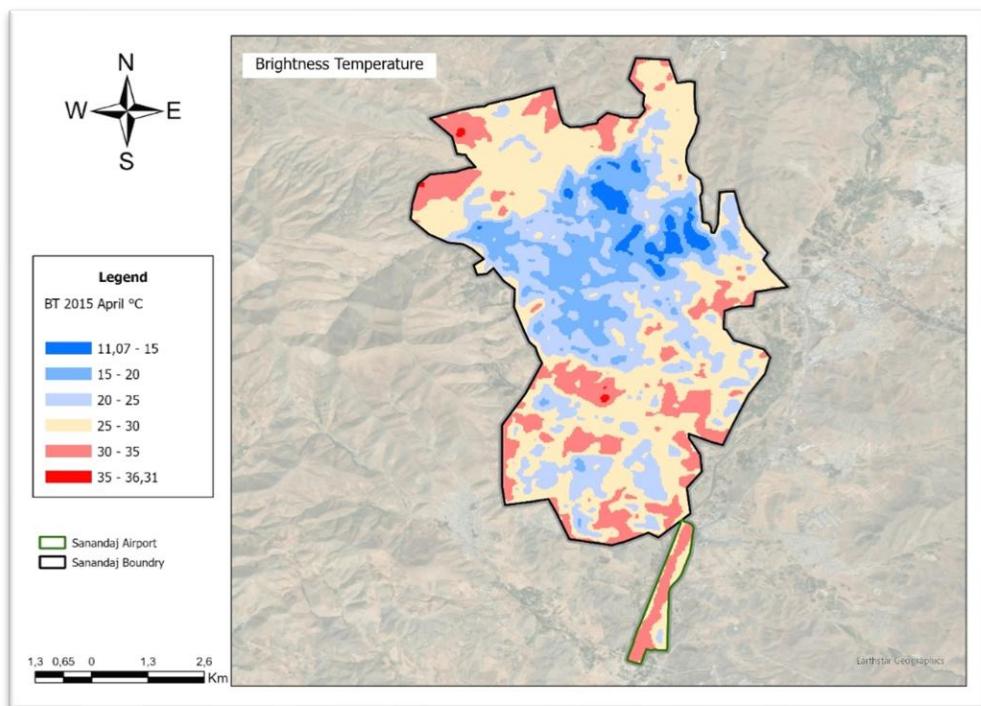


Figure 9: Température de brillance (BT) de Sanandaj, avril 2015, en degrés Celsius

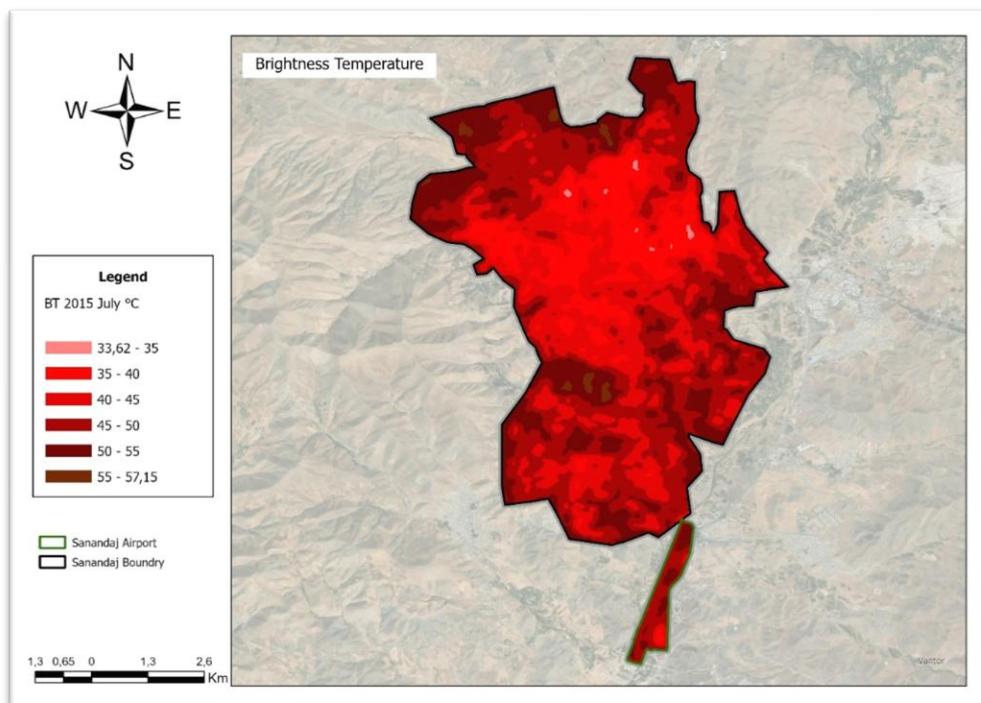


Figure 10: Température de brillance (BT) de Sanandaj, juillet 2015, en degrés Celsius

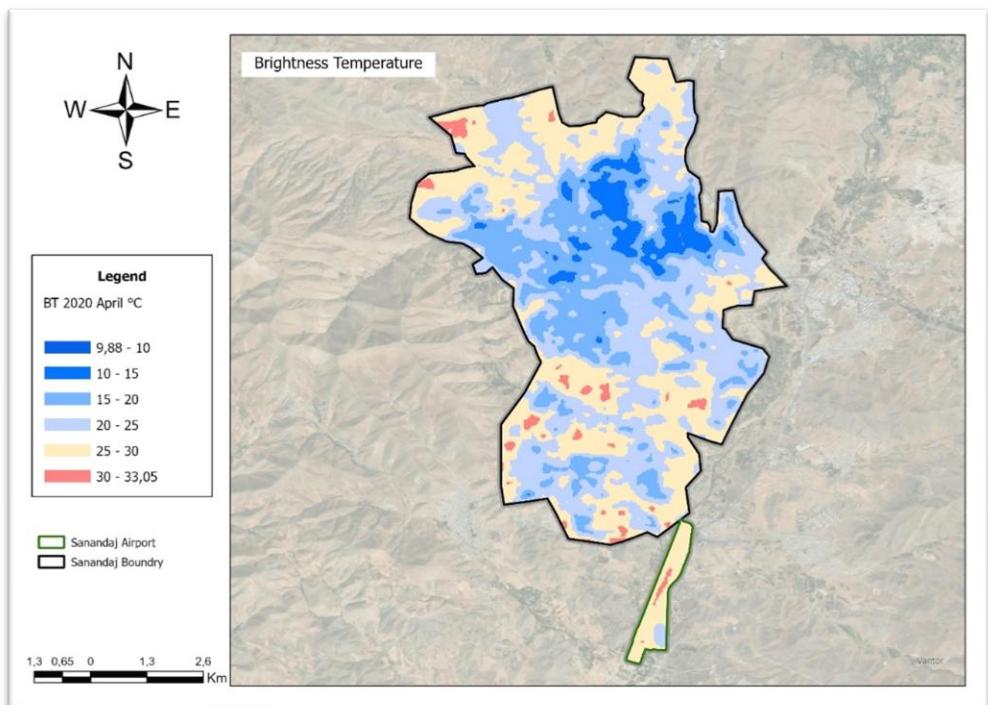


Figure 11: Température de brillance (BT) de Sanandaj, avril 2020, en degrés Celsius

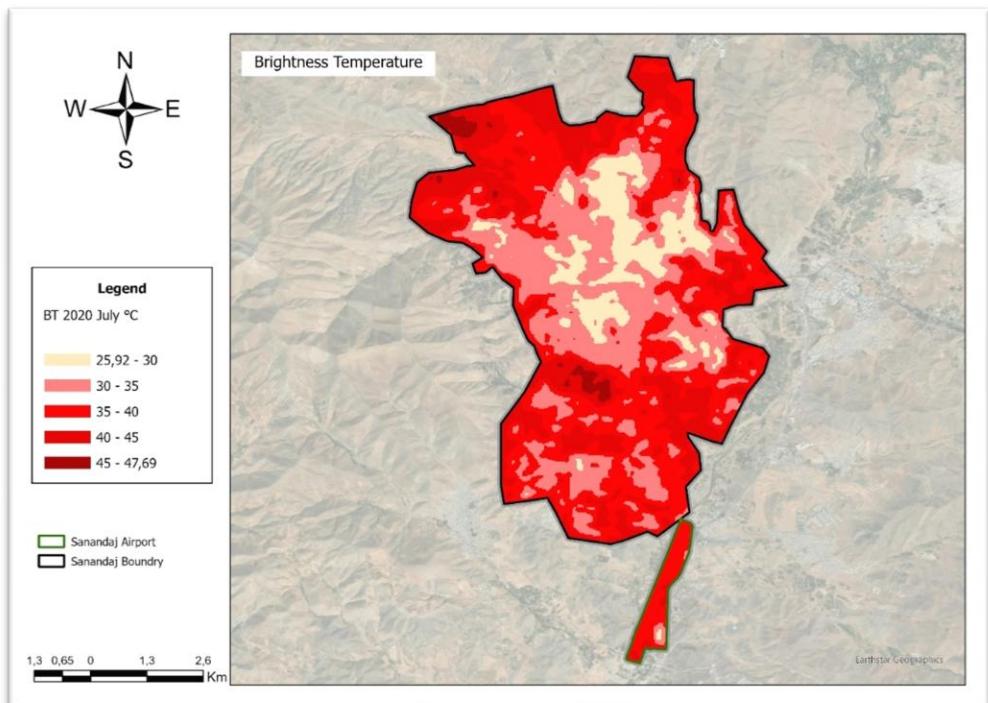


Figure 12: Température de brillance (BT) de Sanandaj, juillet 2020, en degrés Celsius

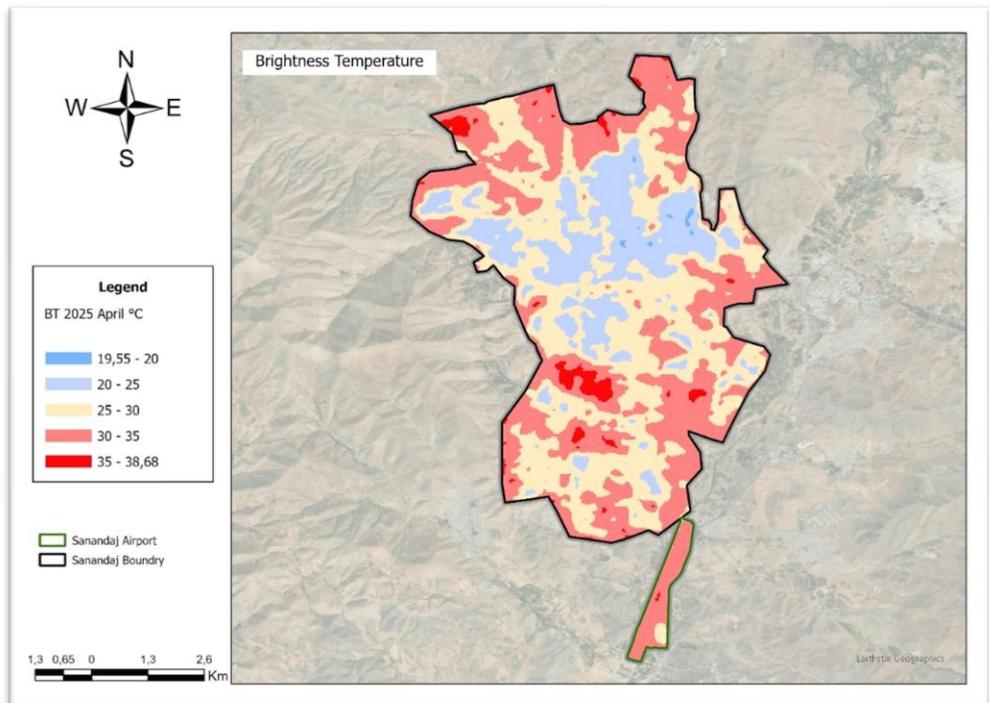


Figure 13: Température de brillance (BT) de Sanandaj, avril 2025, en degrés Celsius

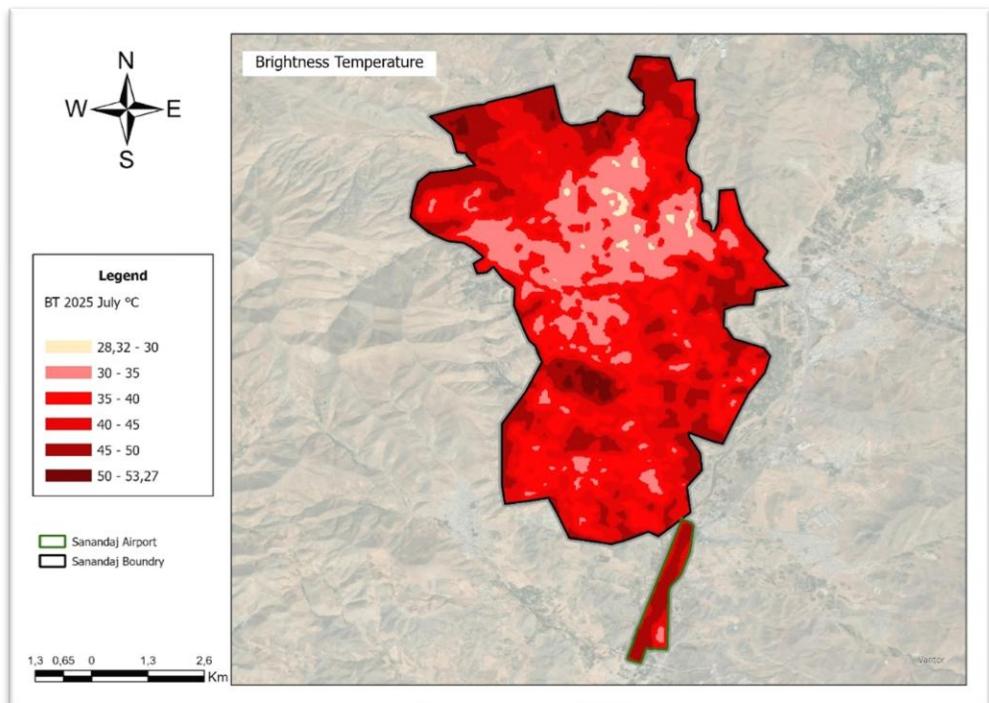


Figure 14: Température de brillance (BT) de Sanandaj, juillet 2025, en degrés Celsius

Cartes LSE :

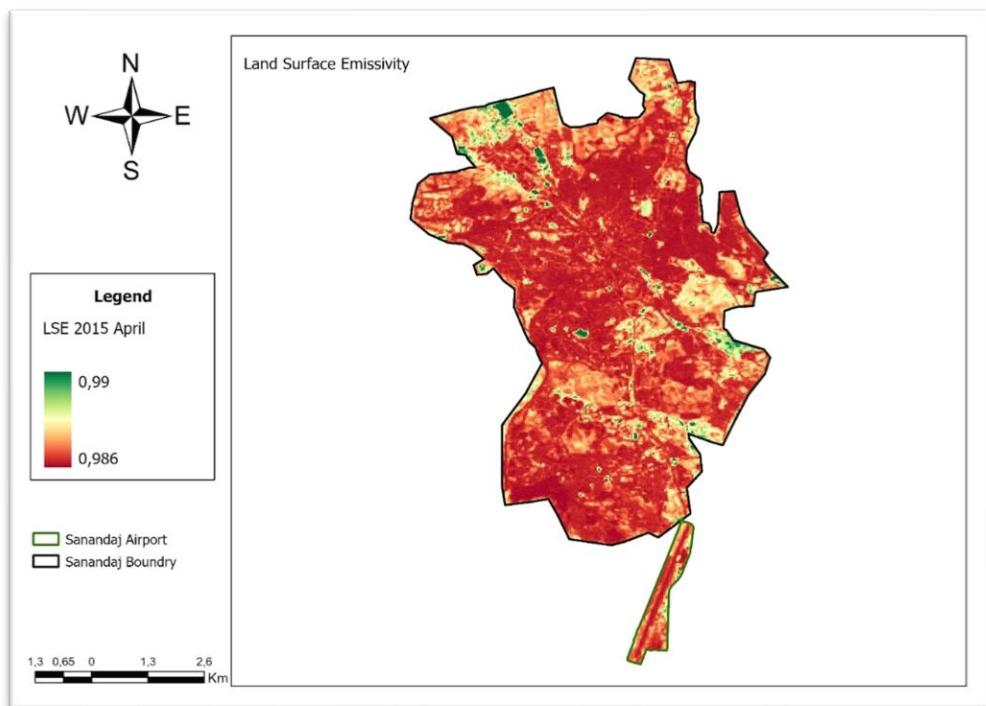


Figure 15: Émissivité de surface (LSE) de Sanandaj, avril 2015

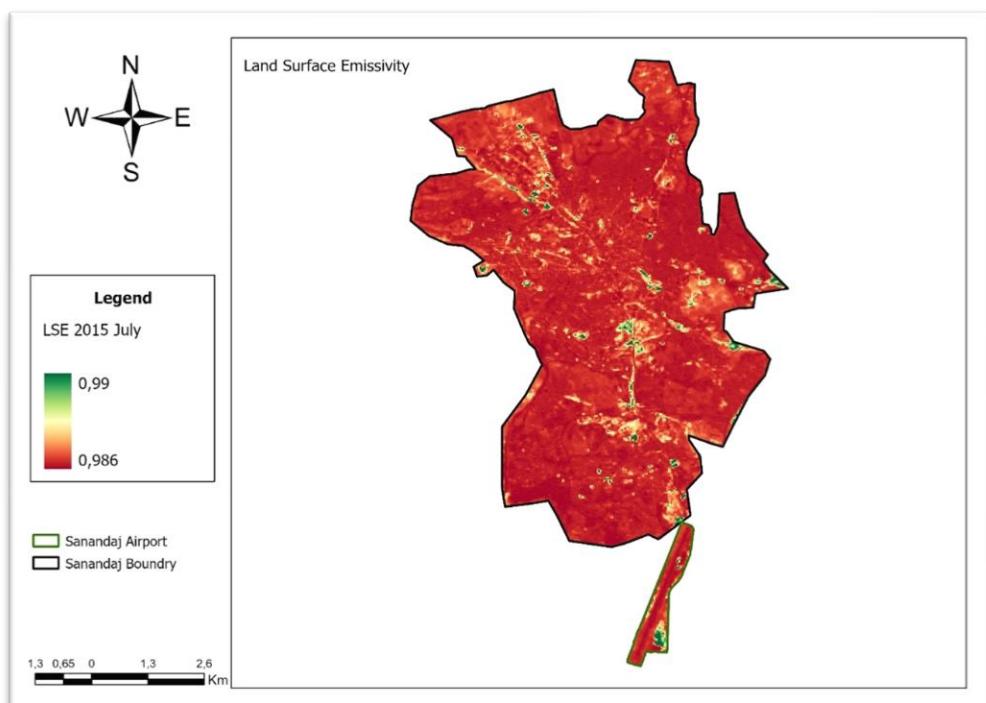


Figure 16: Émissivité de surface (LSE) de Sanandaj, juillet 2015

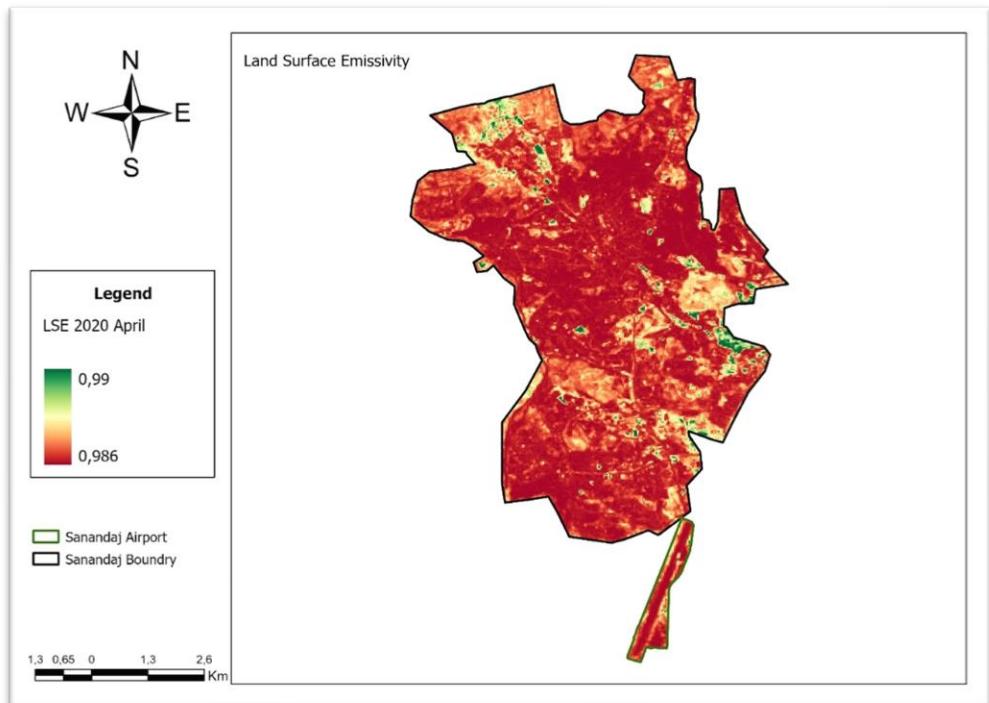


Figure 17: Émissivité de surface (LSE) de Sanandaj, avril 2020

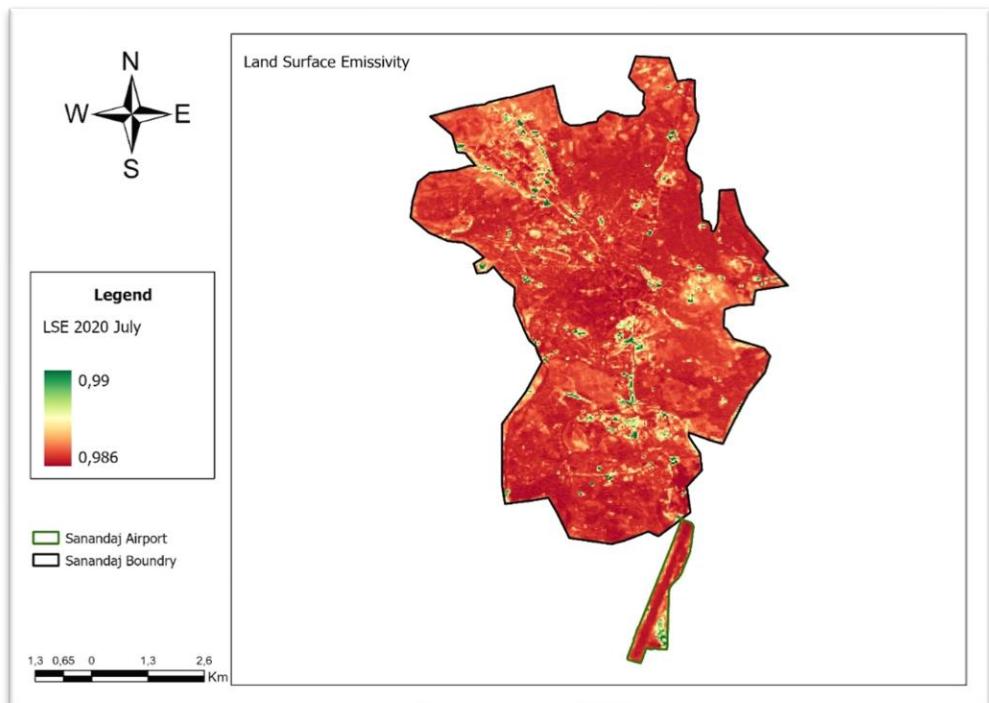


Figure 18: Émissivité de surface (LSE) de Sanandaj, juillet 2020

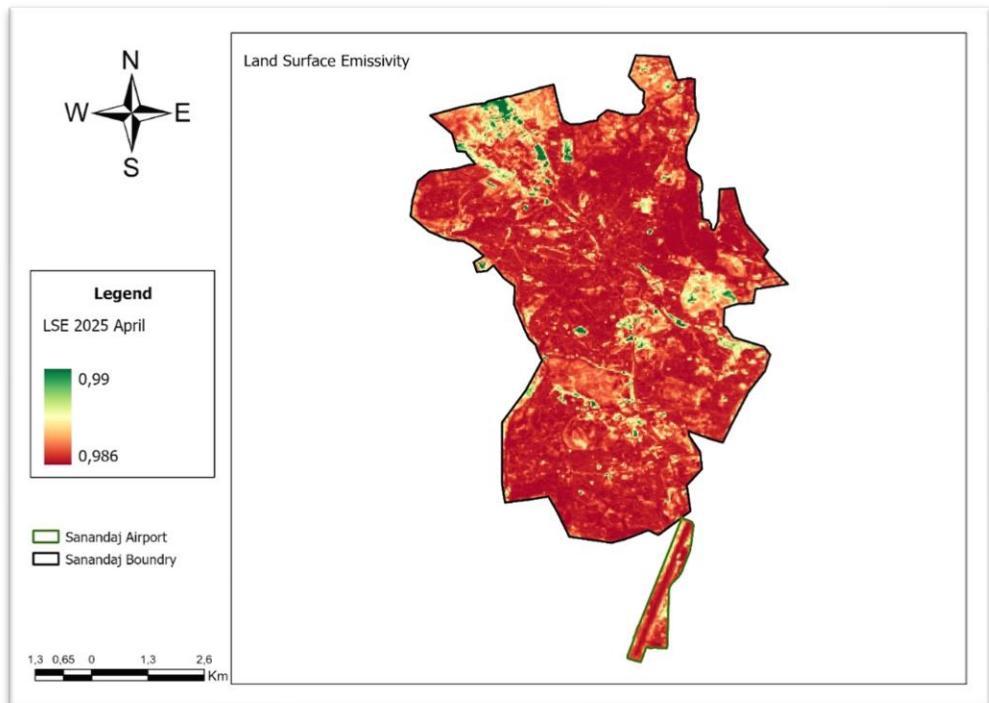


Figure 19: Émissivité de surface (LSE) de Sanandaj, avril 2025

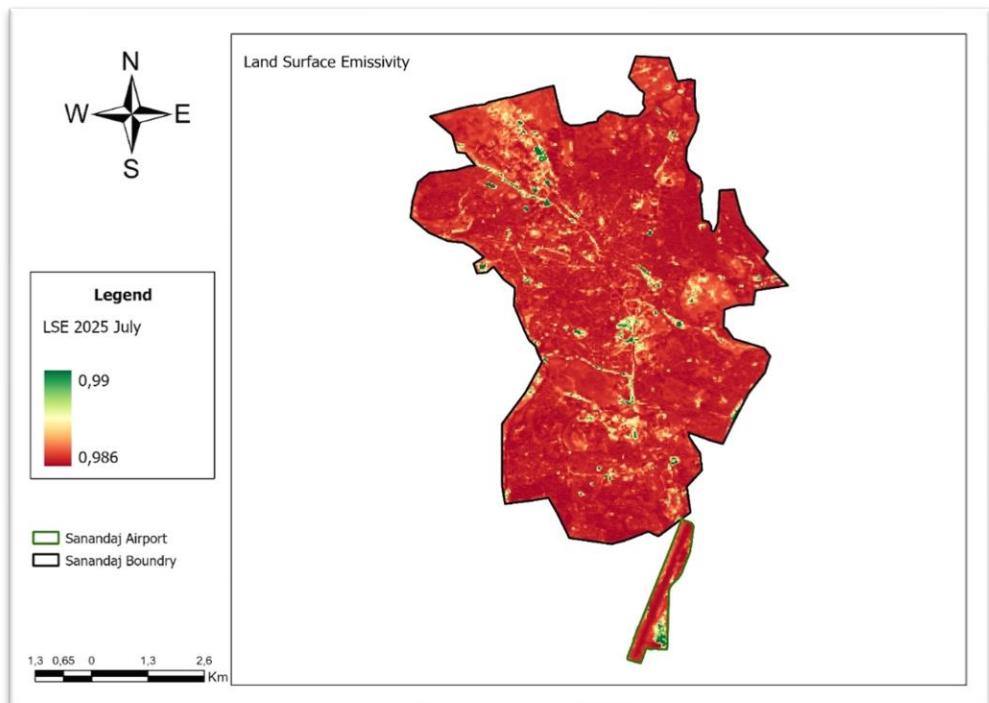


Figure 20: Émissivité de surface (LSE) de Sanandaj, juillet 2025

Cartes LST :

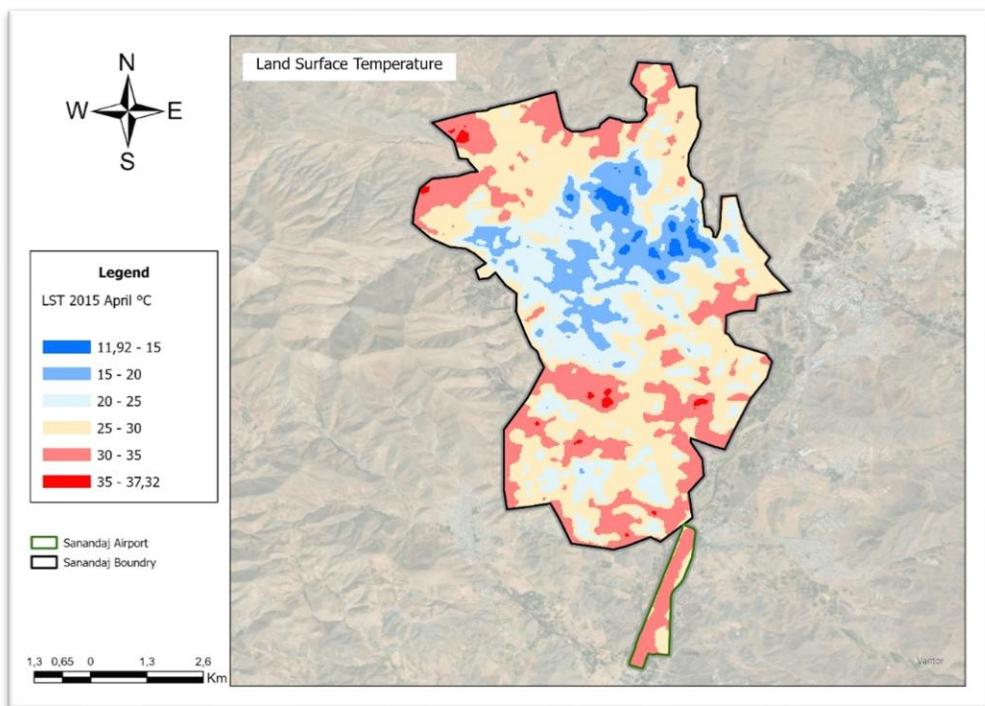


Figure 21: Température de surface (LST) de Sanandaj, avril 2015, en degrés Celsius

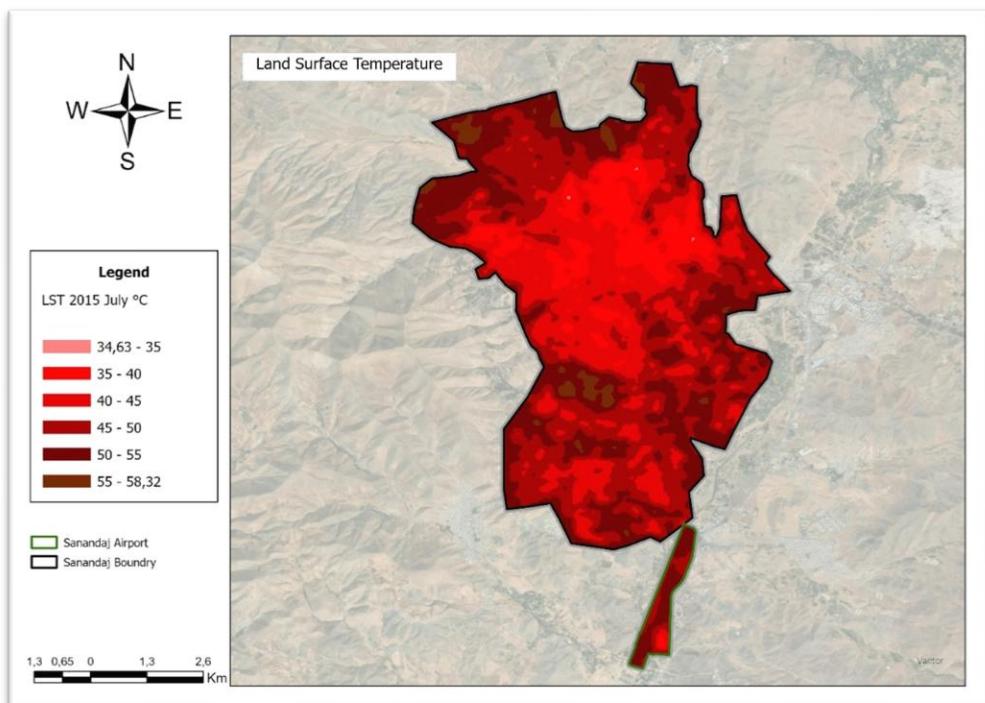


Figure 22: Température de surface (LST) de Sanandaj, juillet 2015, en degrés Celsius

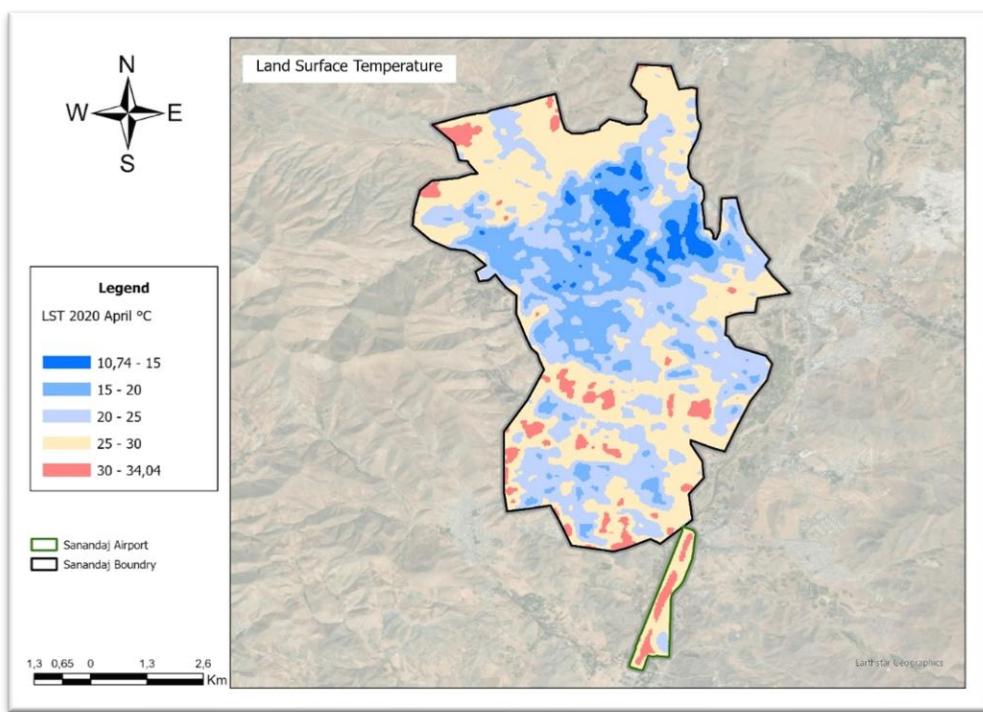


Figure 23: Température de surface (LST) de Sanandaj, avril 2020, en degrés Celsius

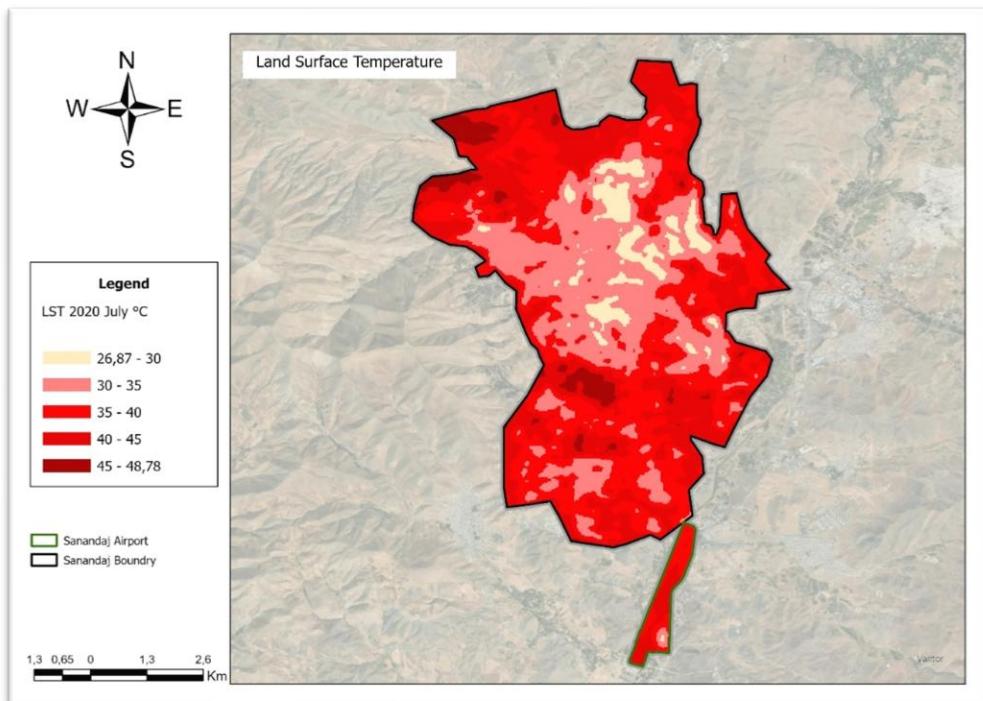


Figure 24: Température de surface (LST) de Sanandaj, juillet 2020, en degrés Celsius

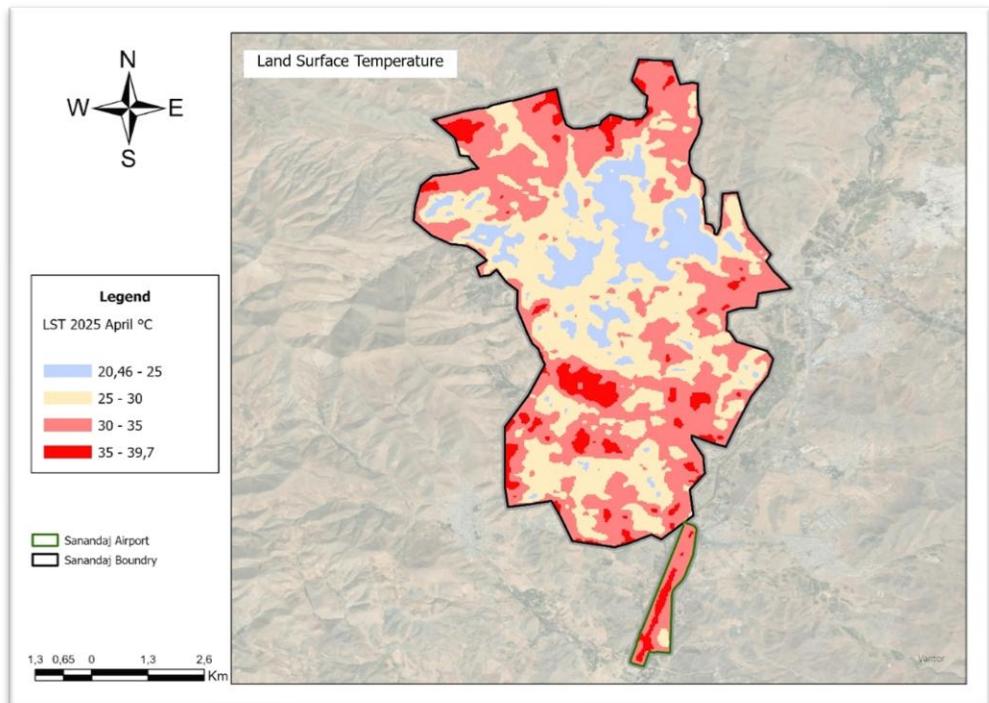


Figure 25: Température de surface (LST) de Sanandaj, avril 2025, en degrés Celsius

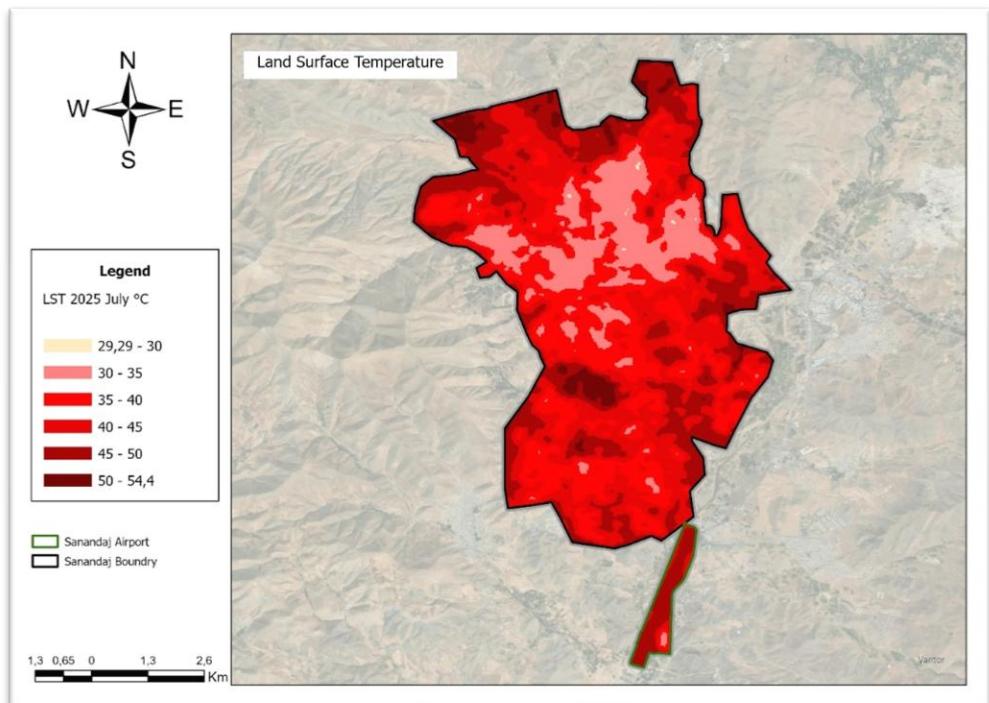


Figure 26: Température de surface (LST) de Sanandaj, juillet 2025, en degrés Celsius

4. Analyses et résultats

4.1 Analyses comparatives

4.1.1 Différences saisonnières intra année (avril contre juillet)

Pour chaque année, nous évaluons l'amplitude saisonnière de la température de surface en calculant une carte de différence entre l'été et le printemps, selon la relation suivante :

$$\Delta LST = LST \text{ juillet} - LST \text{ avril}.$$

Cette approche met en évidence le réchauffement de la surface entre deux périodes contrastées, tout en conservant la même emprise spatiale.

À partir des trois cartes produites (2015, 2020, 2025), nous observons d'abord que ΔLST est positif sur l'ensemble de la zone d'étude. Autrement dit, la surface est systématiquement plus chaude en juillet qu'en avril, ce qui confirme l'existence d'un contraste saisonnier net.

Ensuite, l'amplitude de ce contraste varie selon les années :

- 2015 présente les différences les plus fortes, avec une grande part de la zone située dans des classes élevées (principalement 15 à 25 degrés, avec des zones atteignant environ 27).
- 2020 montre un contraste saisonnier plus modéré, dominé par des classes autour de 10 à 15 degrés, avec quelques secteurs atteignant environ 20 à 24.
- 2025 présente le contraste le plus faible, majoritairement autour de 5 à 10 degrés, et des maxima proches de 20.

Sur le plan spatial, les cartes suggèrent aussi une hétérogénéité interne : certaines zones se réchauffent davantage que d'autres entre avril et juillet. On voit notamment que les différences ne sont pas uniformes et que des poches de valeurs plus élevées apparaissent selon l'année, ce qui peut refléter des contrastes locaux de couverture du sol, d'humidité de surface ou de topographie. L'emprise de l'aéroport apparaît également comme un repère utile, car elle permet de comparer un même secteur identifiable d'une carte à l'autre.

Interprétation et points de vigilance :

1. Une différence plus forte peut provenir soit d'un juillet plus chaud, soit d'un avril plus frais, soit des deux. Cela dépend beaucoup des conditions météorologiques exactes au moment du passage du satellite (et pas seulement de la saison).
2. Pour discuter une tendance climatique de fond, une paire de dates par année est déjà informative, mais une analyse plus robuste utiliserait idéalement plusieurs dates par saison.

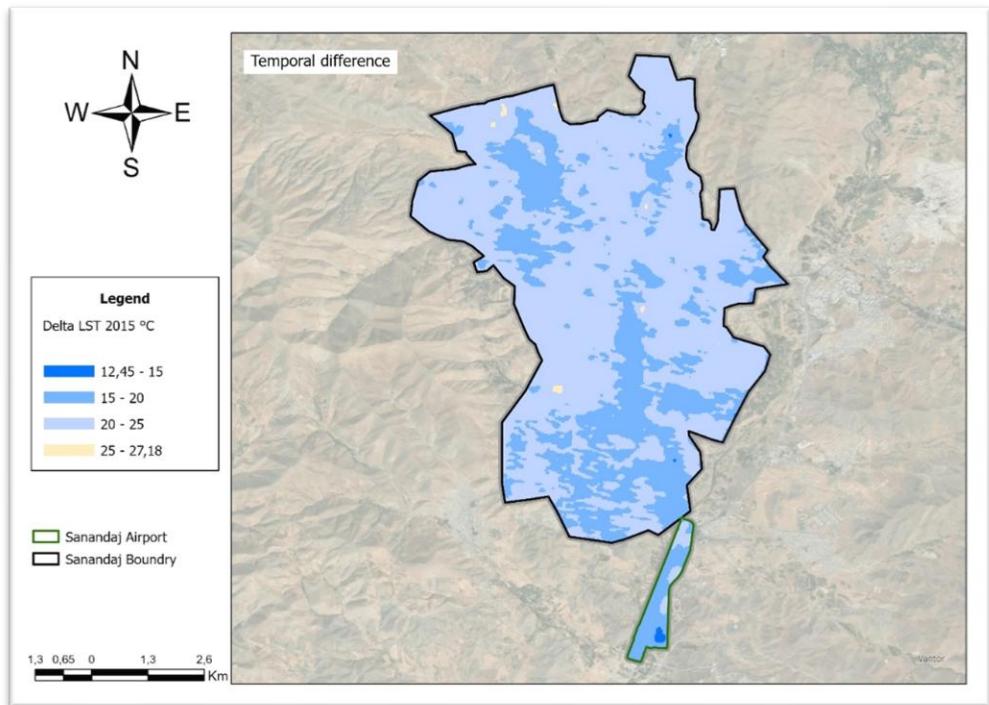


Figure 27: Différence saisonnière de la température de surface à Sanandaj en 2015, calculée comme LST juillet moins LST avril, en degrés Celsius

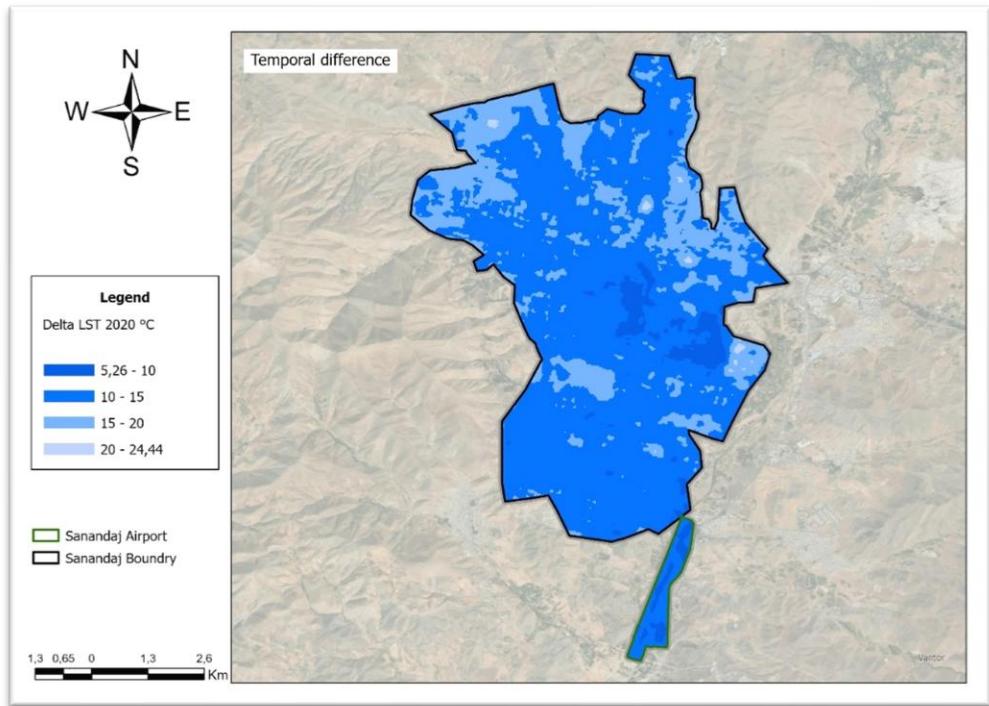


Figure 28: Différence saisonnière de la température de surface à Sanandaj en 2020, calculée comme LST juillet moins LST avril, en degrés Celsius

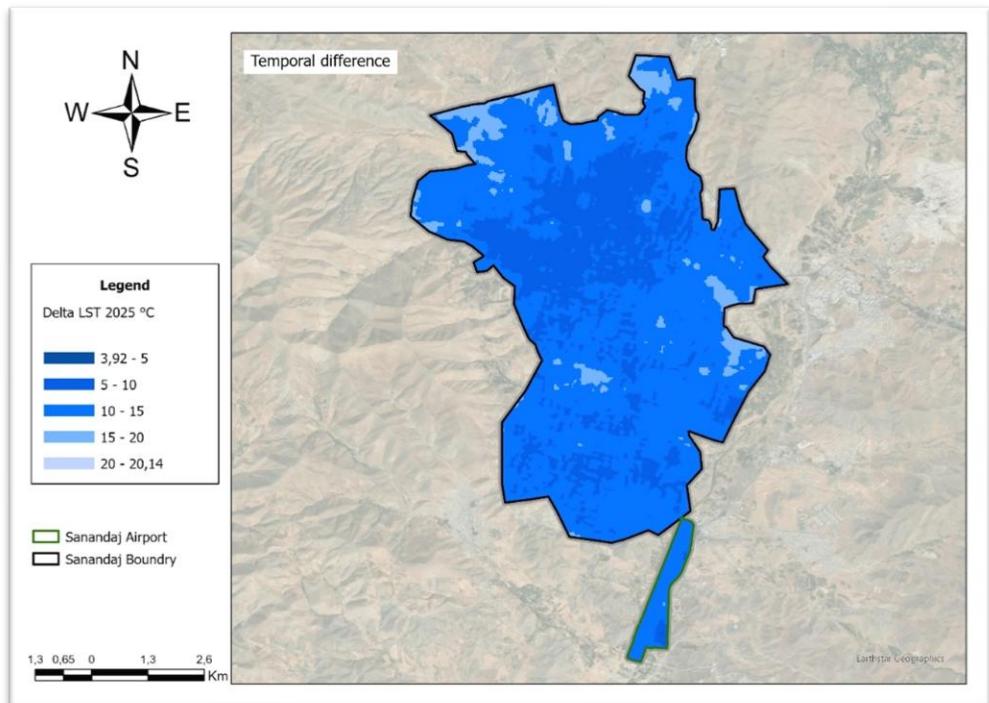


Figure 29: Différence saisonnière de la température de surface à Sanandaj en 2025, calculée comme LST juillet moins LST avril, en degrés Celsius

4.1.2 Différences temporelles interannuelles (2015 contre 2025)

Pour évaluer l'évolution sur dix ans, nous comparons les cartes de température de surface à saison constante en calculant, pour chaque mois, une différence interannuelle :

- $\Delta LST \text{ avril} = LST \text{ avril } 2025 - LST \text{ avril } 2015$
- $\Delta LST \text{ juillet} = LST \text{ juillet } 2025 - LST \text{ juillet } 2015$

Résultats pour avril :

La carte d'avril montre une dominance de valeurs positives sur la quasi-totalité de la zone d'étude. Cela indique un réchauffement de la température de surface en avril entre 2015 et 2025, le plus souvent dans les classes 0 à 5 degrés et 5 à environ 9.4 degrés. On observe toutefois des poches localisées de refroidissement (valeurs négatives), dont certaines apparaissent au nord-ouest et ponctuellement ailleurs. Ces zones suggèrent que l'évolution n'est pas homogène, et qu'elle dépend fortement des caractéristiques locales de la surface.

Résultats pour juillet :

À l'inverse, la carte de juillet est majoritairement négative, ce qui indique une diminution de la température de surface en juillet en 2025 par rapport à 2015 sur une grande partie de la ville. Les classes dominantes se situent surtout entre -10 et 0 degrés. Un point remarquable est la présence, au nord-ouest, d'une zone où le refroidissement est nettement plus fort (jusqu'aux classes les plus basses de la légende). Cela correspond bien à la zone de transformations urbaines que nous avons repérée. Nous pouvons la signaler ici comme un résultat visuel

important, puis la discuter en détail plus tard avec les cartes NDVI, les cartes LST brutes, et les analyses NDVI-LST.

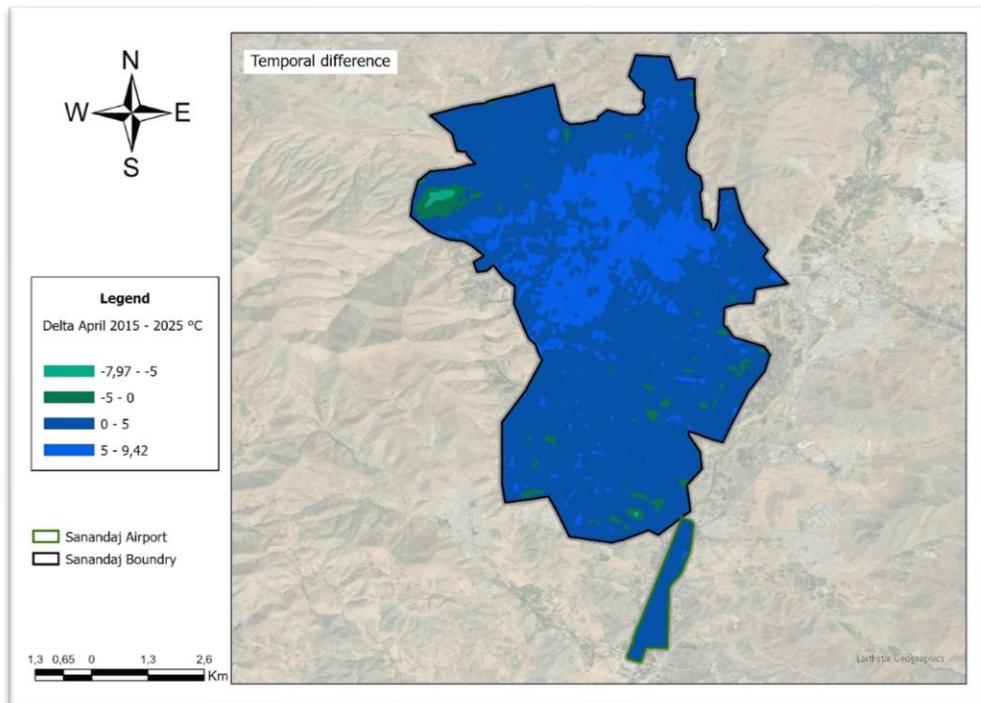


Figure 30: Différence interannuelle de la température de surface à Sanandaj en avril, calculée comme LST avril 2025 moins LST avril 2015, en degrés Celsius.

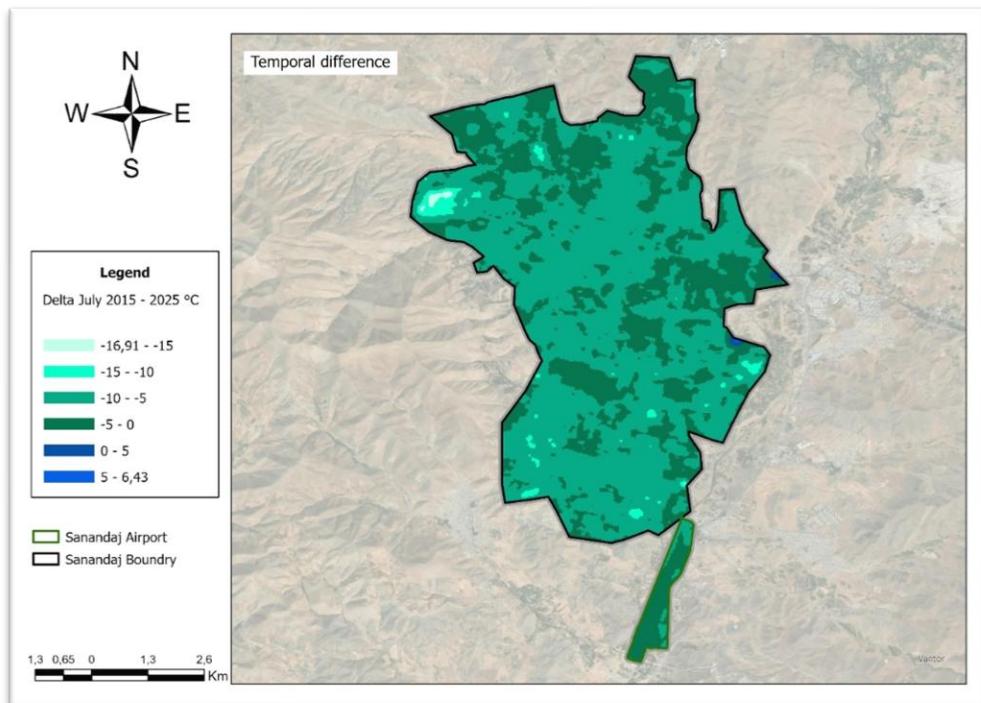


Figure 31: Différence interannuelle de la température de surface à Sanandaj en juillet, calculée comme LST juillet 2025 moins LST juillet 2015, en degrés Celsius.

4.1.3 Graphiques composés de comparaison saisonnière et temporelle

Dans cette sous-section, nous synthétisons les différences de LST sous forme de distributions surfaciques par classes, calculées sur les rasters de différence. Autrement dit, chaque barre indique la surface (km^2) correspondant à une plage de différence de température.

A. Comparaison saisonnière intra année, juillet moins avril :

2015 :

La différence saisonnière est élevée et très homogène spatialement : 68,77 % de la surface se situe dans la classe 20 - 25 °C, et 30,86 % dans la classe 15 - 20 °C. Les classes extrêmes sont presque absentes, ce qui indique que, pour 2015, l'essentiel de la zone d'étude s'est réchauffé de manière assez uniforme entre avril et juillet.

Tableau 3: Tableau comparaison saisonnière 2015

Temperature	Area(Sq.Km)	Percentage (%)
12,44 - 15	0,1	0,15
15 - 20	14,2	30,86
20 - 25	31,6	68,77
25 - 27,17	0,1	0,22

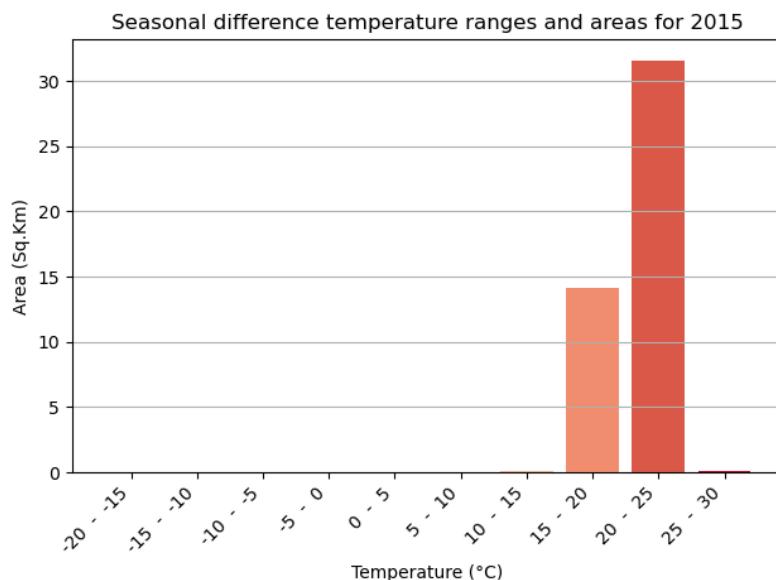


Figure 32: Comparaison saisonnière intra année pour avril et juillet 2015

2020 :

La distribution est nettement décalée vers des différences plus faibles : 72,56 % de la surface est dans 10 - 15 °C, et 22,45 % dans 15 - 20 °C. La classe 5 - 10 °C existe (4,68 %), ce qui suggère des secteurs où l'amplitude saisonnière a été encore plus limitée.

Tableau 4: Tableau comparaison saisonnière 2020

Temperature	Area(Sq.Km)	Percentage (%)
5,26 - 10	2,1	4,68
10 - 15	33,3	72,56
15 - 20	10,3	22,45
20 - 24,44	0,1	0,31

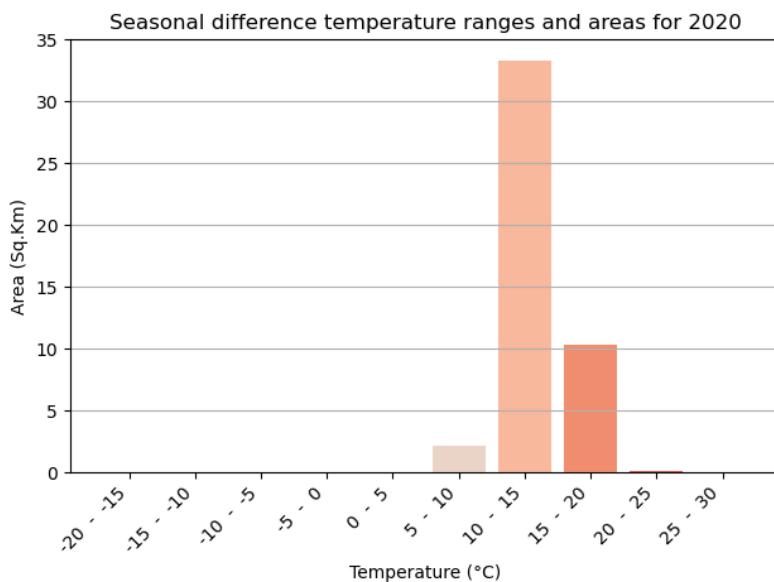


Figure 33: Comparaison saisonnière intra année pour avril et juillet 2020

2025 :

La structure est proche de 2020, avec 68,02 % dans 10 - 15 °C et 25,54 % dans 5 - 10 °C. La classe 15 - 20 °C ne représente plus que 6,42 %. Cela confirme une amplitude saisonnière plus faible qu'en 2015.

Tableau 5: Tableau comparaison saisonnière 2025

Temperature	Area(Sq.Km)	Percentage (%)
3,92 - 5	0,0	0,01
5 - 10	11,7	25,54
10 - 15	31,3	68,02
15 - 20	3,0	6,42
20 - 20,13	0,0	0,00

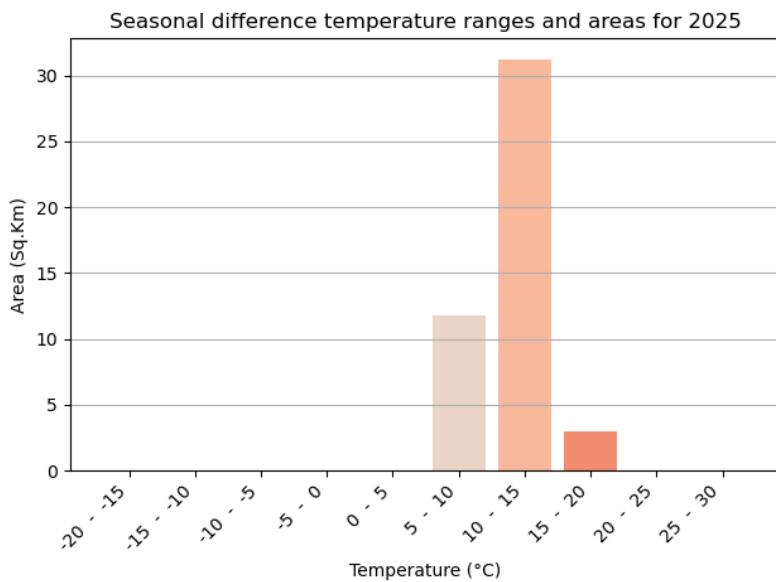


Figure 34: Comparaison saisonnière intra année pour avril et juillet 2025

B. Comparaison temporelle interannuelle, 2025 moins 2015 :

Avril 2015-2025 :

La différence est majoritairement positive : 78,40 % de la surface est dans 0 - 5 °C et 18,66 % dans 5 - 9,42 °C. Les classes négatives (refroidissement) sont marginales (2,93 % au total). En avril, la zone d'étude apparaît donc globalement plus chaude en 2025 qu'en 2015.

Tableau 6: Tableau comparaison temporelle avril (2015 - 2025)

Temperature	Area(Sq.Km)	Percentage (%)
-7,97 - -5	0,1	0,24
-5 - 0	1,2	2,69
0 - 5	36,0	78,40
5 - 9,42	8,6	18,66

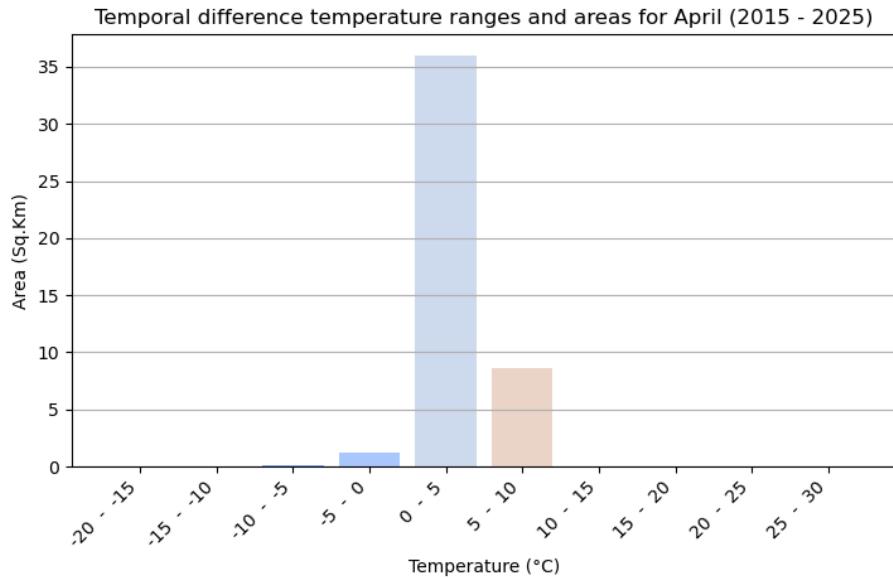


Figure 35: Comparaison temporelle interannuelle (2025 moins 2015) pour avril

Juillet 2015-2025 :

La distribution est à l'inverse très majoritairement négative : 63,96 % de la surface est dans -10 - -5 °C et 34,12 % dans -5 - 0 °C. Les classes proches de zéro ou positives sont presque nulles. En juillet, la zone d'étude apparaît donc globalement plus fraîche en 2025 qu'en 2015.

Tableau 7: Tableau comparaison temporelle juillet (2015 - 2025)

Temperature	Area(Sq.Km)	Percentage (%)
-16,91 - -15	0,1	0,18
-15 - -10	0,7	1,57
-10 - -5	29,4	63,96
-5 - 0	15,7	34,12
0 - 5	0,1	0,14
5 - 6,43	0,0	0,02

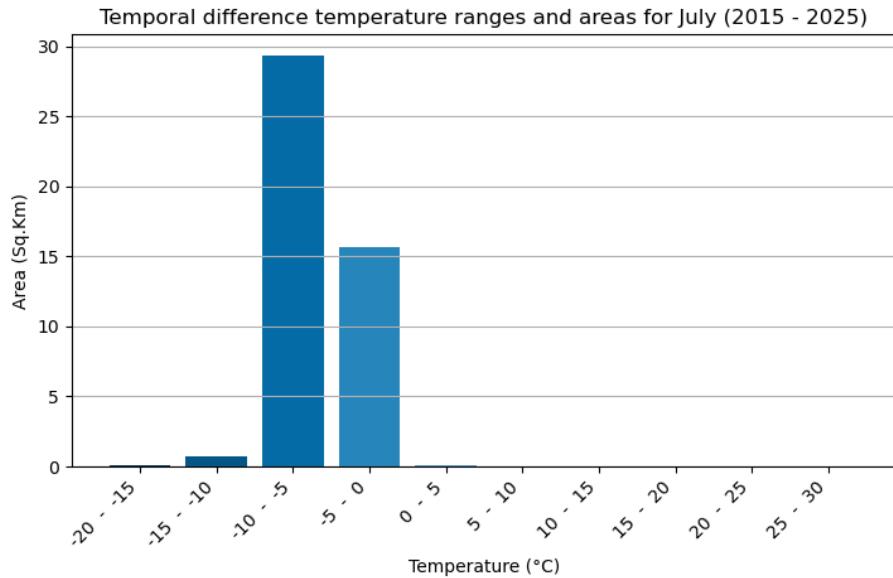


Figure 36: Comparaison temporelle interannuelle (2025 moins 2015) pour juillet

4.2 Indicateurs statistiques sur les rasters LST

4.2.1 Min, max, moyenne, médiane, écart type

Afin de synthétiser chaque carte de température de surface, nous calculons cinq indicateurs descriptifs sur les pixels de notre zone d'étude : minimum, maximum, moyenne, médiane et écart type. Ces statistiques permettent de comparer rapidement les dates, de quantifier l'amplitude saisonnière, et d'évaluer l'hétérogénéité spatiale de la température.

4.2.2 Tableau comparatif fusionné

Nous regroupons l'ensemble des indicateurs dans un tableau comparatif afin de faciliter la lecture multitemporelle et de servir de base aux graphiques présentés ensuite. Le tableau ci-dessous synthétise les statistiques de la température de surface (LST) à Sanandaj pour les six dates.

Tableau 8: Statistiques de la température de surface (LST) à Sanandaj, calculées sur l'ensemble des pixels de la zone d'étude, en degrés Celsius.

Years	Month	MIN(°C)	MAX(°C)	MEAN(°C)	STD(°C)	MEDIAN(°C)
2015	April	11,9	37,3	26,2	4,7	27,1
2015	July	34,6	58,3	46,9	4,7	47,3
2020	April	10,7	34,0	23,7	4,3	24,3
2020	July	26,9	48,8	37,3	4,6	37,6
2025	April	20,5	39,7	29,7	3,7	29,8
2025	July	29,3	54,4	41,2	5,2	41,3

4.3 Échantillonnage spatial et extraction de valeurs

4.3.1 Stratégie de points aléatoires

Pour analyser la dispersion des températures et la relation NDVI LST, nous avons mis en place un échantillonnage spatial par points aléatoires à l'intérieur de l'emprise de la zone d'étude. Cette approche correspond à une logique d'échantillonnage probabiliste, couramment recommandée pour garantir une sélection non biaisée des unités observées.

4.3.2 Extraction NDVI et LST sur points communs

Afin d'obtenir des paires comparables, nous extrayons NDVI et LST sur les mêmes points d'échantillonnage. Cette règle permet ensuite de produire des nuages de points NDVI LST et de calculer des corrélations en utilisant des observations strictement appariées spatialement.

4.4 Analyses graphiques avec Python

4.4.1 Évolution de la LST moyenne

Le graphique d'évolution de la LST moyenne met en évidence deux messages simples. Premièrement, la LST moyenne de juillet reste toujours supérieure à celle d'avril, ce qui confirme le contraste saisonnier observé sur les cartes. Deuxièmement, nous observons une baisse entre 2015 et 2020, puis une remontée en 2025, mais avec des trajectoires différentes selon le mois.

En avril, la moyenne passe de 26,2 °C en 2015 à 23,7 °C en 2020, puis augmente nettement à 29,7 °C en 2025. En juillet, la moyenne diminue de 46,9 °C en 2015 à 37,3 °C en 2020, puis remonte à 41,2 °C en 2025, tout en restant en dessous du niveau de 2015.

Ces évolutions suggèrent une variabilité interannuelle importante et rappellent que la LST dépend fortement des conditions de surface et des conditions atmosphériques au moment précis du passage du satellite, en plus des changements de couverture du sol.

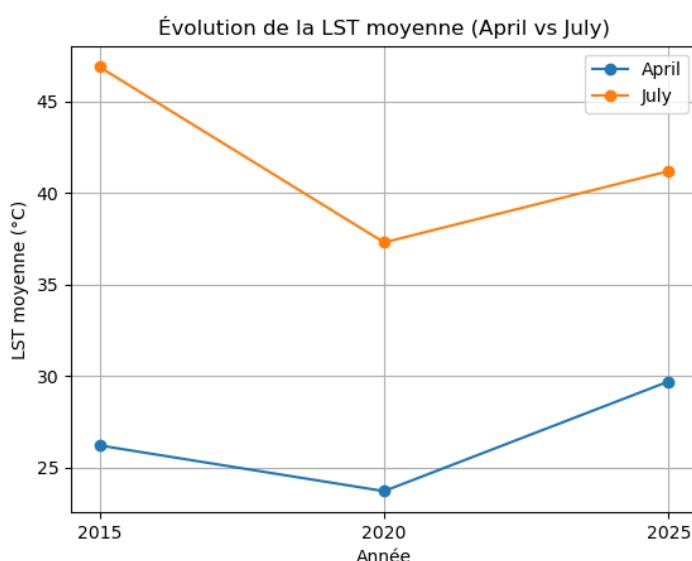


Figure 37: Évolution de la LST moyenne à Sanandaj en avril et en juillet pour 2015, 2020 et 2025, en degrés Celsius

4.4.2 Écart type et hétérogénéité spatiale

L'écart type est un indicateur classique de dispersion, utile pour résumer l'hétérogénéité des températures à l'échelle de la zone d'étude.

Dans notre série, les valeurs restent globalement proches de 4 à 5 °C, ce qui suggère une variabilité spatiale relativement stable pour plusieurs dates.

Nous observons toutefois deux points marquants :

- Avril 2025 présente l'écart type le plus faible (3,7 °C), ce qui indique une distribution plus homogène des températures de surface au printemps 2025
- Juillet 2025 présente l'écart type le plus élevé (5,2 °C), ce qui indique au contraire une hétérogénéité renforcée en été, cohérente avec un paysage thermique plus contrasté, où coexistent des surfaces très chaudes et des surfaces relativement plus fraîches

Cette lecture est importante pour la suite, car une hétérogénéité plus forte en juillet renforce l'intérêt d'analyser la relation NDVI LST et les différences entre classes dérivées du NDVI.

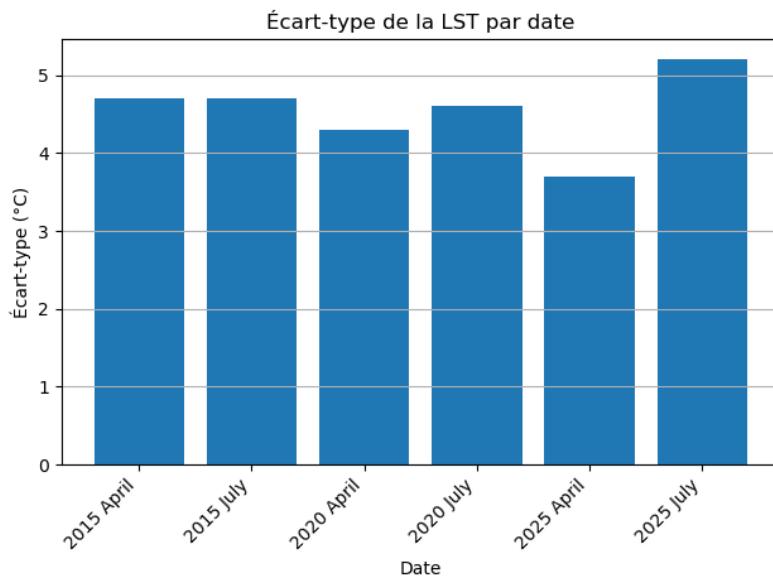


Figure 38: Écart type de la LST par date à Sanandaj pour 2015, 2020 et 2025, en degrés Celsius

4.4.3 Distribution par boxplot sur échantillon de pixels

Pour compléter les indicateurs globaux (min, max, moyenne, médiane, écart type), nous représentons la distribution des valeurs de LST à partir d'un échantillon de 2000 points tirés dans la zone d'étude. Cette représentation sous forme de boîte à moustaches permet de visualiser, pour chaque date, la médiane, l'étendue interquartile et la dispersion des valeurs.

Principaux résultats observés :

1. Contraste saisonnier confirmé : pour chaque année, la distribution de juillet est décalée vers le haut par rapport à avril, ce qui traduit des températures de surface systématiquement plus élevées en été.
2. Différences entre années :
 - 2020 avril présente la distribution la plus basse, avec une médiane située autour de 24 à 25 °C.
 - 2015 juillet présente la distribution la plus élevée, avec une médiane autour de 47 °C et une dispersion importante.
 - 2025 avril est nettement plus chaud que 2015 avril et 2020 avril, avec une médiane autour de 30 °C, ce qui rejoint la hausse observée dans nos statistiques globales.
 - 2025 juillet se situe autour de 41 à 42 °C pour la médiane, en dessous de 2015 juillet mais au-dessus de 2020 juillet.
3. Dispersion et valeurs extrêmes : les moustaches et la hauteur des boîtes suggèrent une variabilité notable en juillet, en particulier en 2015 et en 2025. Cette dispersion est cohérente avec l'idée d'un paysage thermique plus contrasté en été, où coexistent des surfaces très chaudes et des surfaces plus fraîches au sein d'une même date.

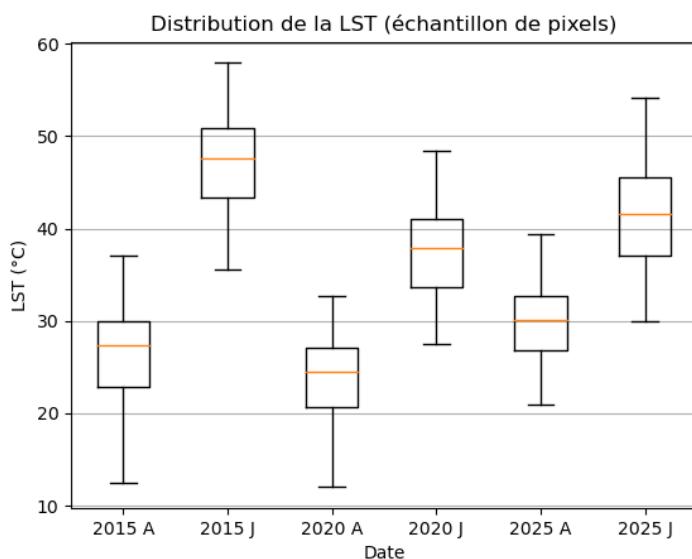


Figure 39: Distribution des valeurs de température de surface (LST) à Sanandaj pour les six dates étudiées, estimée sur un échantillon de 2000 points extraits dans la zone d'étude, en degrés Celsius

4.4.4 Nuages de points NDVI et LST et corrélations

Nous analysons la relation entre NDVI et LST à partir de points communs, en représentant les couples NDVI LST sous forme de nuages de points et en calculant, pour chaque date, une corrélation de Pearson r .

Résultats obtenus :

Avril 2015 : $r = 0,421$	Juillet 2015 : $r = 0,036$
Avril 2020 : $r = 0,410$	Juillet 2020 : $r = 0,185$
Avril 2025 : $r = 0,315$	Juillet 2025 : $r = 0,095$

Lecture générale :

Dans de nombreux contextes urbains, on observe souvent une relation négative entre NDVI et LST, car la végétation peut contribuer à réduire la température de surface via l'ombrage et l'évapotranspiration [43]. Dans nos résultats, cette relation attendue n'apparaît pas clairement : en avril, la corrélation est au contraire modérément positive, et en juillet elle devient faible à quasi nulle.

Interprétations possibles :

1. Rôle des facteurs topographiques et de l'exposition

La température de surface est influencée par l'altitude, la pente et l'exposition, qui peuvent créer des contrastes thermiques indépendants de la végétation [43]. Dans une ville en contexte montagneux, il est donc possible que les gradients topographiques structurent une partie du signal et perturbent une lecture simple NDVI LST.

2. Rôle des matériaux urbains et de la réflectance

Nos observations locales à Sanandaj suggèrent la présence fréquente de toitures en membrane bitumineuse, parfois associée à une feuille aluminisée réfléchissante, connue localement sous le nom d'Isogam.



Figure 40: Exemple de toiture à Sanandaj montrant une membrane bitumineuse avec surface aluminisée de type Isogam, pouvant influencer la réponse thermique des surfaces bâties.

Or, la réflectance solaire et l'albédo des matériaux influencent le bilan radiatif des surfaces et peuvent modifier leur échauffement. Des travaux sur les cool roofs montrent qu'une augmentation de la réflectance d'une toiture peut réduire la température de surface du toit et contribuer à diminuer la chaleur stockée par les surfaces urbaines [57], [58].

De même, la littérature sur les façades souligne que les propriétés optiques des matériaux, dont la réflectance, jouent un rôle dans le comportement thermique des parois extérieures [59].



Figure 41: Exemple de façade en pierre à Sanandaj, illustrant l'importance des propriétés optiques des matériaux de façade dans le comportement thermique.

Dans ce contexte, l'usage de matériaux minéraux clairs et de surfaces réfléchissantes peut contribuer, localement, à limiter la hausse de température de certaines surfaces bâties, ce qui complique l'interprétation NDVI LST si nous considérons uniquement la végétation comme facteur explicatif [57], [59].

3. Lien avec notre observation sur le nord-ouest :

Nous avons repéré au nord-ouest de la ville une zone ayant connu des constructions importantes. Dans ce secteur, les cartes de différence montrent une baisse de LST en 2025 par rapport à 2015.

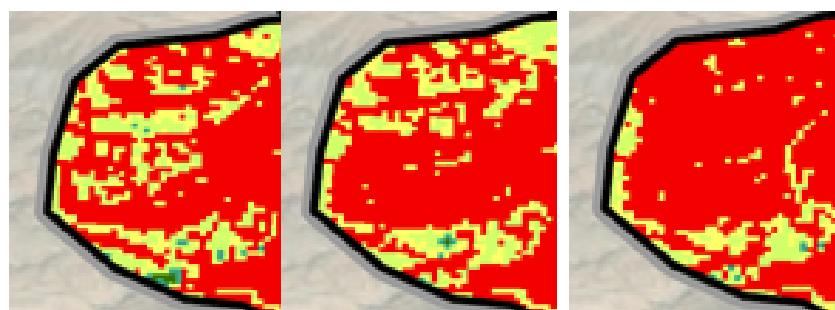


Figure 42: Secteur nord-ouest de Sanandaj : extrait NDVI montrant une végétation relativement élevée pour 2015, une végétation intermédiaire pour 2020 et une forte diminution du couvert végétal pour 2025

Ce résultat est compatible avec l'hypothèse d'un changement de matériaux ou de configuration urbaine pouvant modifier la signature thermique locale, par exemple via des surfaces plus réfléchissantes [57], [58].

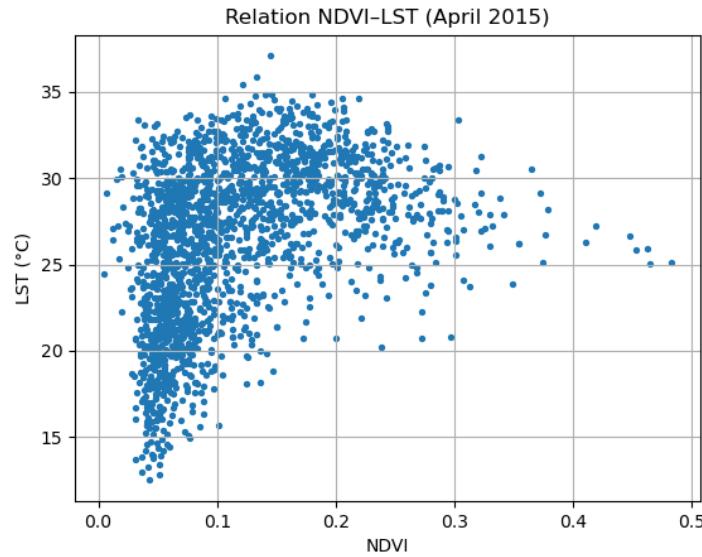


Figure 43: Relation entre NDVI et LST à Sanandaj en avril 2015, points d'échantillonnage communs, corrélation de Pearson $r = 0,421$

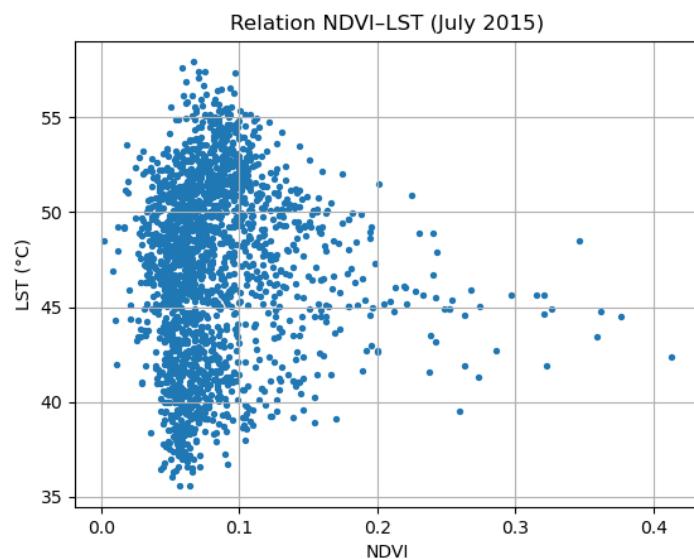


Figure 44: Relation entre NDVI et LST à Sanandaj en juillet 2015, points d'échantillonnage communs, corrélation de Pearson $r = 0,036$

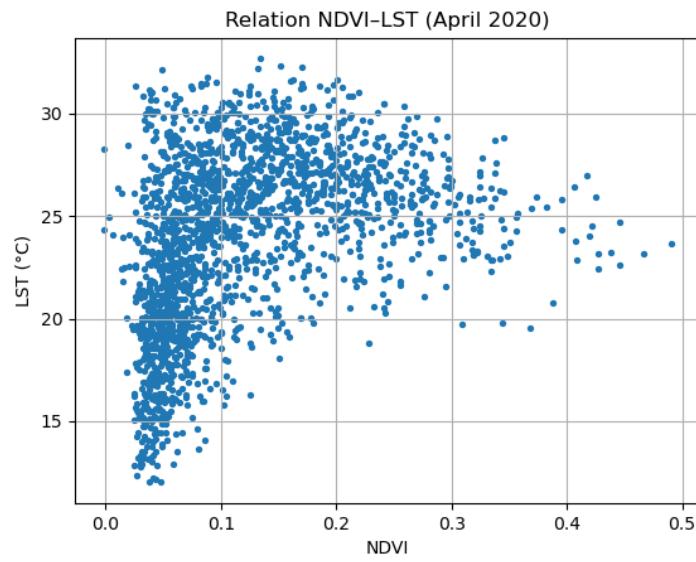


Figure 45: Relation entre NDVI et LST à Sanandaj en avril 2020, points d'échantillonnage communs, corrélation de Pearson $r = 0,410$

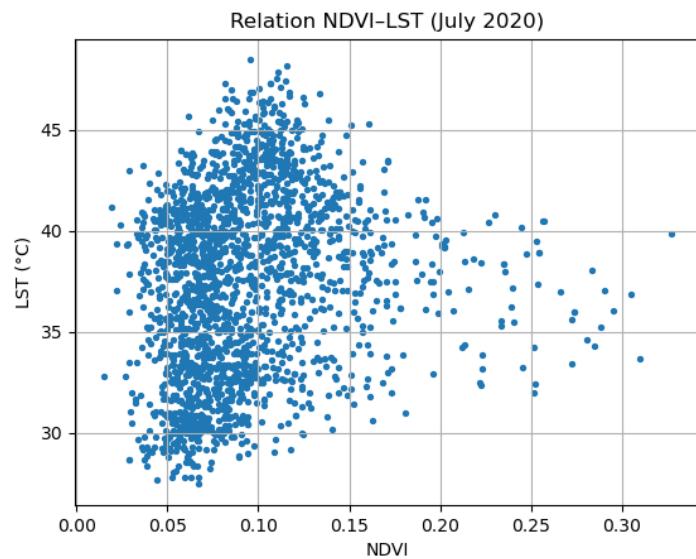


Figure 46: Relation entre NDVI et LST à Sanandaj en juillet 2020, points d'échantillonnage communs, corrélation de Pearson $r = 0,185$

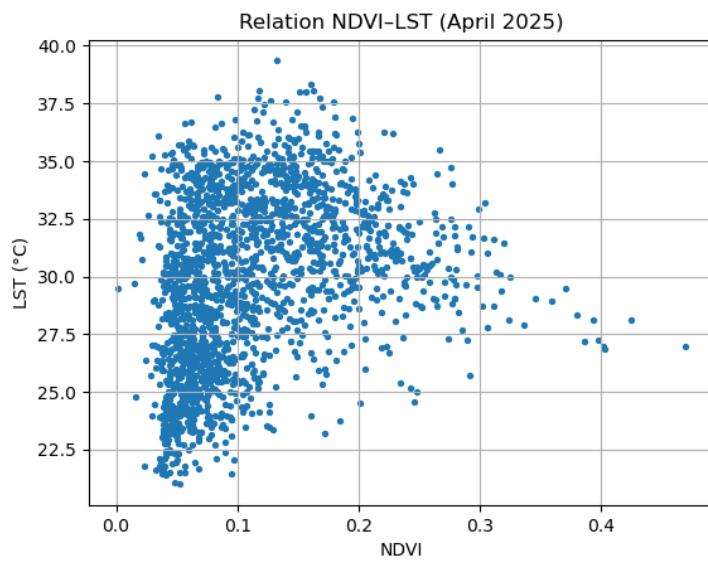


Figure 47: Relation entre NDVI et LST à Sanandaj en avril 2025, points d'échantillonnage communs, corrélation de Pearson $r = 0,315$

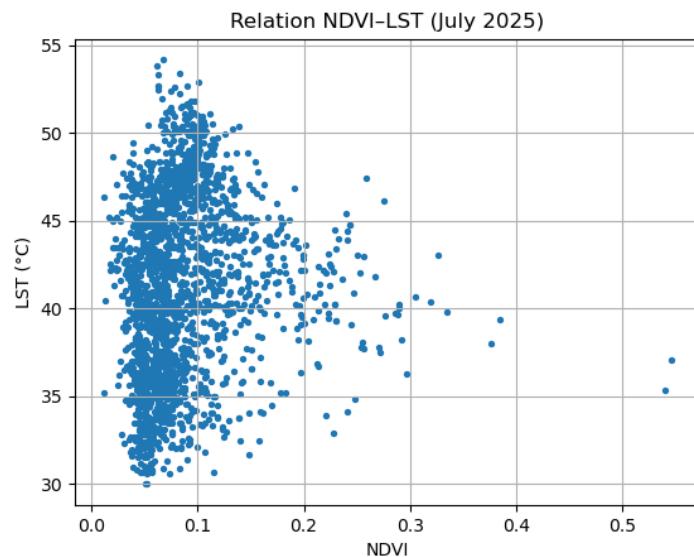


Figure 48: Relation entre NDVI et LST à Sanandaj en juillet 2025, points d'échantillonnage communs, corrélation de Pearson $r = 0,095$

4.4.5 Relation NDVI classes et LST

Dans cette analyse, nous affinons la lecture de la relation NDVI LST en classant d'abord le NDVI en six catégories (Water, Built-up, Barren Land, Shrub and Grassland, Sparse Vegetation, Dense Vegetation), selon la logique de classification reprise de la littérature, puis en calculant la LST moyenne pour chaque catégorie à partir des mêmes points d'échantillonnage.

Ce graphique apporte une lecture plus détaillée que la corrélation globale, car il compare des valeurs moyennes de LST au sein de groupes homogènes définis par les classes de NDVI.

Résultat principal sur les classes de végétation :

En examinant les trois catégories de végétation (Shrub and Grassland, Sparse Vegetation, Dense Vegetation), nous observons un motif stable pour les six dates : la LST moyenne diminue lorsque le niveau de végétation augmente, avec Dense Vegetation systématiquement plus faible que Sparse Vegetation, elle-même plus faible que Shrub and Grassland.

Cette tendance est cohérente avec le rôle de la végétation dans la régulation thermique de surface, notamment via l'ombrage et l'évapotranspiration, même si l'intensité du signal peut varier selon le contexte local et la saison.

Lien avec la corrélation positive observée au niveau global :

Dans la section précédente, les corrélations NDVI LST calculées sur l'ensemble des points étaient positives en avril et faibles en juillet. Le graphique par classes montre que, même si la corrélation globale n'est pas négative, un gradient cohérent apparaît dès que nous comparons des niveaux de végétation entre eux.

Autrement dit, l'analyse par classes met en évidence un effet de refroidissement relatif associé à l'augmentation de la végétation, tandis que la corrélation globale peut être influencée par la composition de l'échantillon et par d'autres gradients spatiaux, notamment topographie, matériaux et organisation urbaine.

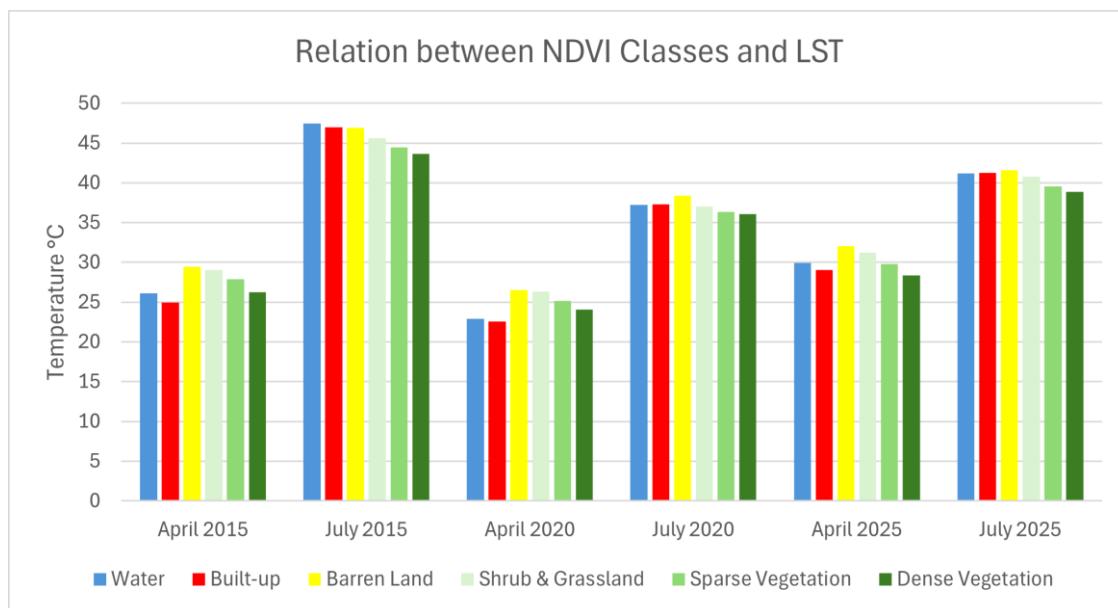


Figure 49: Relation entre classes de NDVI et température de surface (LST) à Sanandaj pour six dates (avril et juillet 2015, 2020 et 2025). Pour chaque date, la LST moyenne est calculée par classe NDVI à partir des mêmes points d'échantillonnage

4.4.6 Répartition par plages de température et zones géographiques

Nous avons reclassé chaque raster de LST en plages de température (classes de 5 °C, avec des bornes extrêmes adaptées au minimum et au maximum de chaque date), puis nous avons calculé, pour chaque plage, la surface correspondante en km² et en pourcentage de la zone d'étude.

Pour faciliter la lecture, nous représentons ensuite ces résultats sous forme d'histogrammes, qui décrivent la distribution des surfaces par classes de température.

Résultats par date

Avril 2015 :

La distribution est dominée par la plage 25 - 30 °C, qui représente 40,53 % de la surface, suivie de 20 - 25 °C (23,33 %) et 30 - 35 °C (23,24 %). La zone d'étude se situe donc très majoritairement entre 20 et 35 °C (87,10 %), avec une part marginale au-dessus de 35 °C (0,52 %).

Tableau 9: Tableau LST température ranges and areas for April 2015

Temperature	Area(Sq.Km)	Percentage (%)
11,91 - 15	0,6	1,37
15 - 20	5,1	11,02
20 - 25	10,7	23,33
25 - 30	18,6	40,53
30 - 35	10,7	23,24
35 - 37,32	0,2	0,52

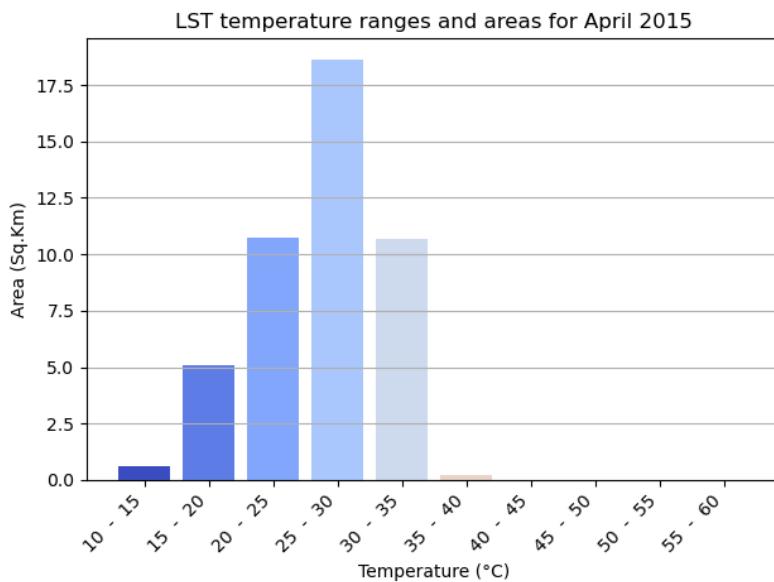


Figure 50: Répartition surfacique de la température de surface (LST) par plages de température - avril 2015

Juillet 2015 :

La distribution se déplace vers des valeurs élevées, avec une domination des classes 45 - 50 °C (35,86 %), 50 - 55 °C (27,36 %) et 40 - 45 °C (25,03 %). Au total, 65,64 % de la surface se situe au-dessus de 45 °C, ce qui confirme un épisode estival très chaud à l'échelle des surfaces.

Tableau 10: Tableau LST temperature ranges and areas for July 2015

Temperature	Area(Sq.Km)	Percentage (%)
34,62 - 35	0,0	0,02
35 - 40	4,3	9,30
40 - 45	11,5	25,03
45 - 50	16,5	35,86
50 - 55	12,6	27,36
55 - 58,31	1,1	2,42

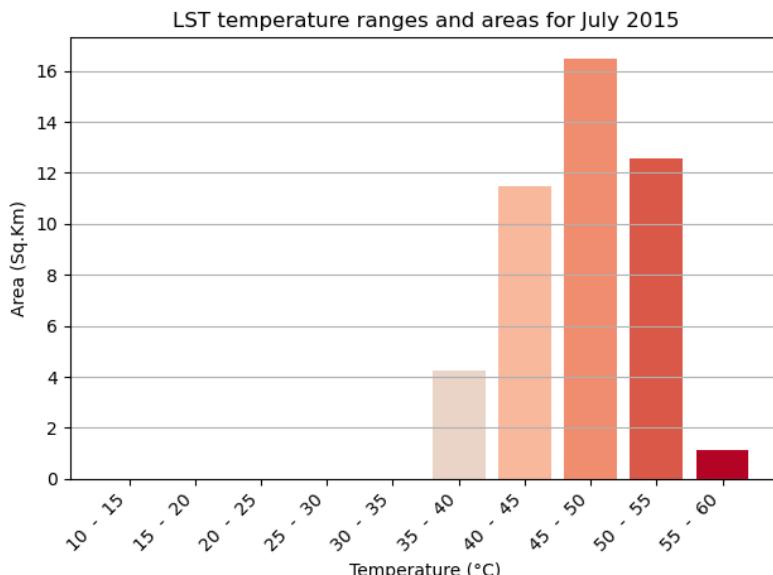


Figure 51: Répartition surfacique de la température de surface (LST) par plages de température - juillet 2015

Avril 2020 :

Le cœur de distribution se situe entre 15 et 30 °C. Les classes 25 - 30 °C (39,82 %) et 20 - 25 °C (33,83 %) dominent, tandis que les températures inférieures à 20 °C représentent 21,51 %. Cette date apparaît comme la plus fraîche parmi les trois mois d'avril.

Tableau 11: Tableau LST temperature ranges and areas for April 2020

Temperature	Area(Sq.Km)	Percentage (%)
10,73 - 15	1,6	3,48
15 - 20	8,3	18,03
20 - 25	15,5	33,83
25 - 30	18,3	39,82
30 - 34,03	2,2	4,84

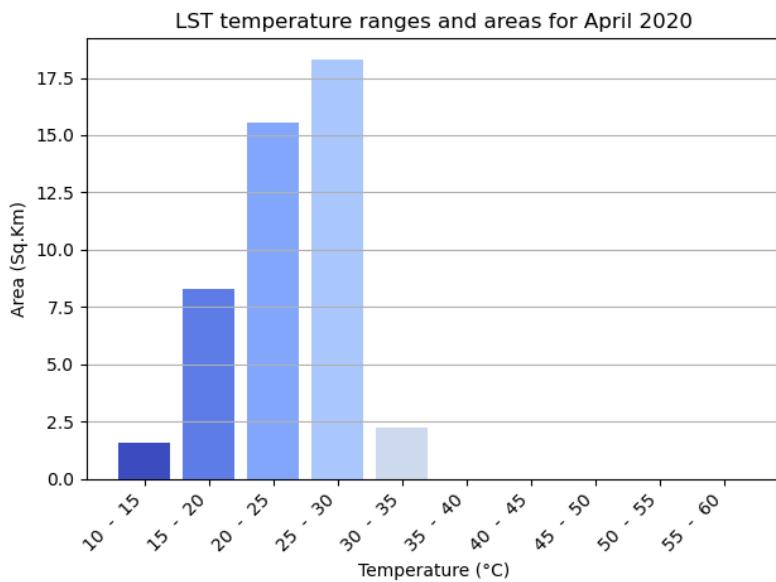


Figure 52: Répartition surfacique de la température de surface (LST) par plages de température - avril 2020

Juillet 2020 :

Les classes 35 - 40 °C (34,09 %), 40 - 45 °C (28,79 %) et 30 - 35 °C (28,06 %) structurent l'essentiel du signal. La part au-dessus de 45 °C est très limitée (3,72 %), ce qui distingue clairement juillet 2020 de juillet 2015.

Tableau 12: Tableau LST temperature ranges and areas for July 2020

Temperature	Area(Sq.Km)	Percentage (%)
26,87 - 30	2,5	5,35
30 - 35	12,9	28,06
35 - 40	15,7	34,09
40 - 45	13,2	28,79
45 - 48,78	1,7	3,72

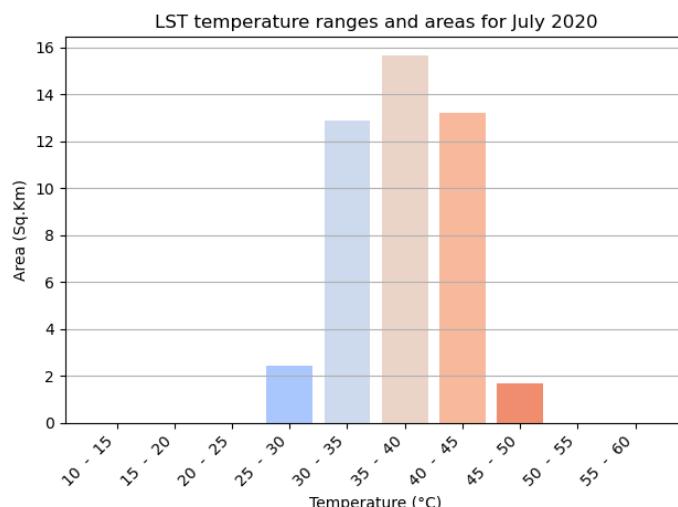


Figure 53: Répartition surfacique de la température de surface (LST) par plages de température - juillet 2020

Avril 2025 :

La distribution est recentrée sur 25 - 35 °C, avec 25 - 30 °C (39,31 %) et 30 - 35 °C (42,01 %) comme classes dominantes. On note l'absence de classes en dessous de 20 °C dans nos résultats, ce qui confirme un avril globalement plus chaud, en cohérence avec la hausse des indicateurs moyens observée précédemment.

Tableau 13: Tableau LST temperature ranges and areas for April 2025

Temperature	Area(Sq.Km)	Percentage (%)
20,46 - 25	5,6	12,18
25 - 30	18,1	39,31
30 - 35	19,3	42,01
35 - 39,7	3,0	6,49

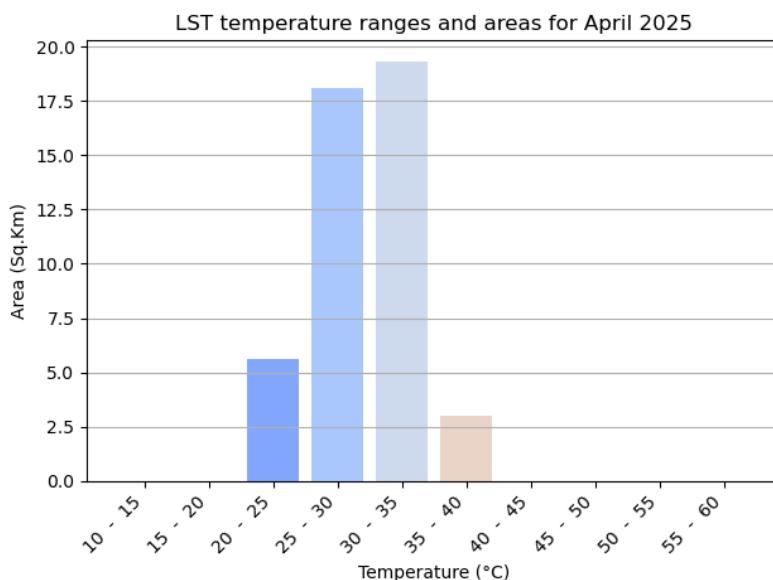


Figure 54: Répartition surfacique de la température de surface (LST) par plages de température - avril 2025

Juillet 2025 :

Les classes 40 - 45 °C (31,20 %), 35 - 40 °C (27,75 %) et 45 - 50 °C (23,87 %) sont majoritaires. La part au-dessus de 45 °C atteint 27,12 %, supérieure à juillet 2020, mais nettement inférieure à juillet 2015, ce qui positionne juillet 2025 comme une situation intermédiaire entre ces deux années.

Tableau 14: Tableau LST température ranges and areas for July 2025

Temperature	Area(Sq.Km)	Percentage (%)
29,28 - 30	0,0	0,07
30 - 35	6,4	13,87
35 - 40	12,8	27,75
40 - 45	14,3	31,20
45 - 50	11,0	23,87
50 - 54,4	1,5	3,25

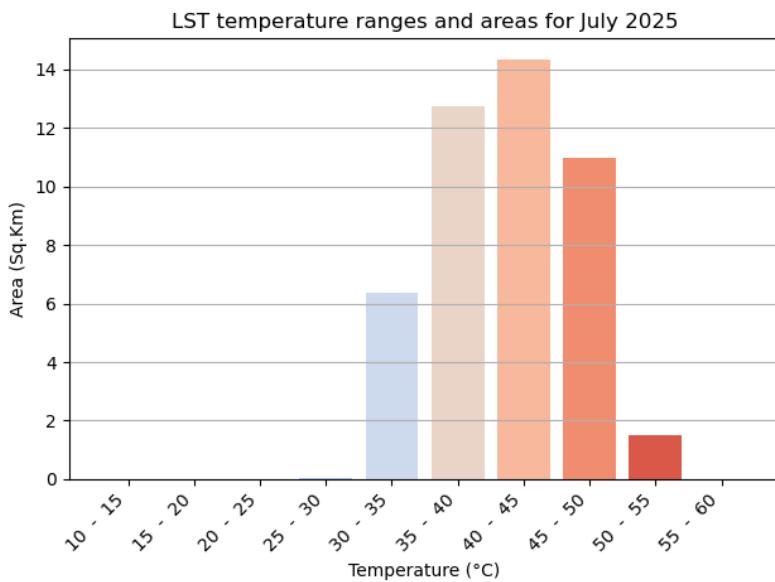


Figure 55: Répartition surfacique de la température de surface (LST) par plages de température - juillet 2025

4.5 Résultats

4.5.1 Résultats NDVI

Nous cartographions le NDVI pour six dates (avril et juillet 2015, 2020 et 2025) afin de décrire la distribution spatiale de la végétation et ses variations saisonnières et interannuelles à l'échelle de Sanandaj.

Sur l'ensemble des cartes, la structure spatiale du NDVI met en évidence une dominance de faibles valeurs dans le périmètre urbain, ce qui traduit l'importance des surfaces minérales (bâti, sols nus et surfaces artificialisées) et la fragmentation des taches végétalisées. Les classes de végétation (arbustes et prairies, végétation clairsemée, végétation dense) apparaissent sous forme de noyaux et de bandes discontinues, plus visibles au printemps qu'en été. Il faut toutefois rappeler que le NDVI reste sensible aux conditions de surface (couleur du sol, atmosphère, humidité) et doit être interprété comme un indicateur de couverture végétale et non comme une classification d'occupation du sol "stricte".

Le contraste saisonnier est net entre avril et juillet, pour les trois années. En avril, les classes végétalisées sont plus étendues et plus continues, ce qui correspond à une période où l'activité photosynthétique est généralement plus forte. En juillet, les cartes montrent davantage de pixels à NDVI faible et une réduction des classes de végétation, ce qui est cohérent avec une végétation plus sèche ou plus stressée en période estivale, et donc un signal NDVI plus faible malgré la présence de couvert végétal.

Enfin, la comparaison interannuelle 2015, 2020 et 2025 met en évidence des changements localisés, dont un signal très marqué dans le secteur nord-ouest de la ville (Figure 42). Les trois zooms illustrent une évolution allant d'un état plus végétalisé (présence plus importante de classes "arbustes et prairies", "végétation clairsemée" et "végétation dense") vers un état plus pauvre en végétation, où dominent les classes à faible NDVI. Cette observation suggère une transformation locale du couvert végétal (par exemple modification des usages, artificialisation,

changements des conditions hydriques ou de gestion), qui sera discutée plus en détail en lien avec les autres résultats (LST, différences temporelles, zone récemment urbanisée).

4.5.2 Résultats LST

Les cartes de température de surface (LST) confirment la saisonnalité observée avec la BT, tout en offrant une lecture plus directement liée à la température de surface corrigée. En avril, la LST est modérée et hétérogène spatialement : les classes dominantes se situent surtout entre 20–30 °C en 2015 et 2020, alors qu'en 2025 le printemps apparaît plus chaud avec une dominance des classes 25–35 °C (et des valeurs maximales proches de ~39–40 °C). En juillet, la LST augmente fortement : l'année 2015 montre une emprise largement couverte par des classes élevées (souvent ≥ 45 °C), tandis que 2020 présente une distribution plus “modérée” (maximum plus faible, classes dominantes plutôt 30–45 °C), et 2025 se situe à un niveau intermédiaire à éléver (présence importante des classes 35–50 °C et des valeurs atteignant >50 °C).

Les résultats quantifiés (aires et pourcentages par classes) appuient cette lecture. En avril, la part des températures 30–35 °C passe d'environ 23 % (2015) à ~42 % (2025), indiquant un net déplacement vers des classes plus chaudes au printemps. En juillet, 2015 se distingue par une forte proportion de températures très élevées (notamment les classes 45–55 °C), alors que 2020 concentre davantage de surface dans les classes 30–40 °C. Ces contrastes suggèrent une variabilité interannuelle marquée de la chaleur de surface estivale et un réchauffement printanier plus visible en 2025 sur l'emprise étudiée.

5. Discussion et Conclusion

5.1 Synthèse des principaux enseignements

L'analyse diachronique (2015–2020–2025) et saisonnière (avril vs juillet) met en évidence une forte variabilité spatiale et temporelle de la végétation (NDVI) et des températures de surface (BT/LST) sur la ville de Sanandaj et ses périphéries. Globalement, les cartes NDVI montrent une dominance des valeurs faibles à moyennes sur l'emprise urbaine (surfaces bâties et sols nus), tandis que des taches de végétation plus favorables apparaissent surtout en périphérie et le long de certains axes/structures (corridors, zones agricoles, espaces verts). En parallèle, les cartes BT et LST révèlent des contrastes thermiques marqués, particulièrement en juillet, avec une intensification des surfaces chaudes dans les secteurs fortement minéralisés et une présence de zones plus fraîches associées à des milieux plus végétalisés ou à certaines caractéristiques topographiques.

La comparaison entre avril et juillet confirme un signal saisonnier attendu : juillet présente des températures de surface nettement plus élevées et une végétation globalement plus faible/fragmentée (stress hydrique, aridité estivale), alors qu'avril montre des conditions plus favorables à la végétation et des températures plus modérées. Les cartes LSE (émissivité) présentent des variations plus subtiles (plage resserrée), mais elles restent utiles pour la cohérence physique du calcul de la LST et pour interpréter les différences entre surfaces (minérales vs végétalisées), même si ce paramètre apparaît moins discriminant visuellement à l'échelle cartographique utilisée.

5.2 Interprétation de la relation NDVI et LST

L'ensemble des résultats suggère une relation inverse entre NDVI et LST : lorsque le NDVI est plus élevé (végétation plus dense ou plus saine), la LST tend à être plus faible. Ce résultat est cohérent avec les mécanismes biophysiques classiques : ombrage, évapotranspiration, et capacité de la végétation à limiter l'accumulation de chaleur en surface. À l'inverse, les zones bâties et les sols nus, souvent associés à des NDVI faibles, favorisent l'absorption du rayonnement et la restitution de chaleur, ce qui se traduit par des températures de surface plus élevées.

Cette relation n'est toutefois pas parfaitement linéaire ni uniforme : elle dépend des conditions saisonnières (disponibilité en eau), du type de couverture (sol nu clair vs asphalté), et d'effets locaux (relief, exposition, humidité des sols, matériel des toitures et des façades). Malgré cela, l'opposition "surfaces végétalisées = plus fraîches" vs "surfaces minéralisées = plus chaudes" ressort clairement dans plusieurs secteurs et dates.

5.3 Lecture spatiale des zones chaudes et des zones plus fraîches

Les cartes LST/BT mettent en évidence des zones chaudes concentrées sur les secteurs urbains compacts et sur des surfaces fortement minéralisées. En juillet, ces zones chaudes deviennent plus étendues et plus intenses, traduisant un renforcement potentiel des phénomènes de type îlot de chaleur de surface. À l'inverse, les zones plus fraîches apparaissent davantage dans les espaces périphériques, les zones plus végétalisées, et possiblement certains secteurs influencés par l'altitude/topographie.

Un point important ressort de notre observation : comme le montre la carte NDVI de juillet 2025 (Figure 56, à gauche), une vaste zone à végétation favorable s'étend en périphérie de la ville. En comparant avec la carte LST de juillet 2025 (Figure 56, à droite), on constate que les températures de surface sont plus basses dans ces zones végétalisées que dans les zones plus minérales. Cette observation suggère un rôle potentiel de la végétation périphérique dans le maintien de “poches de fraîcheur” en saison chaude.

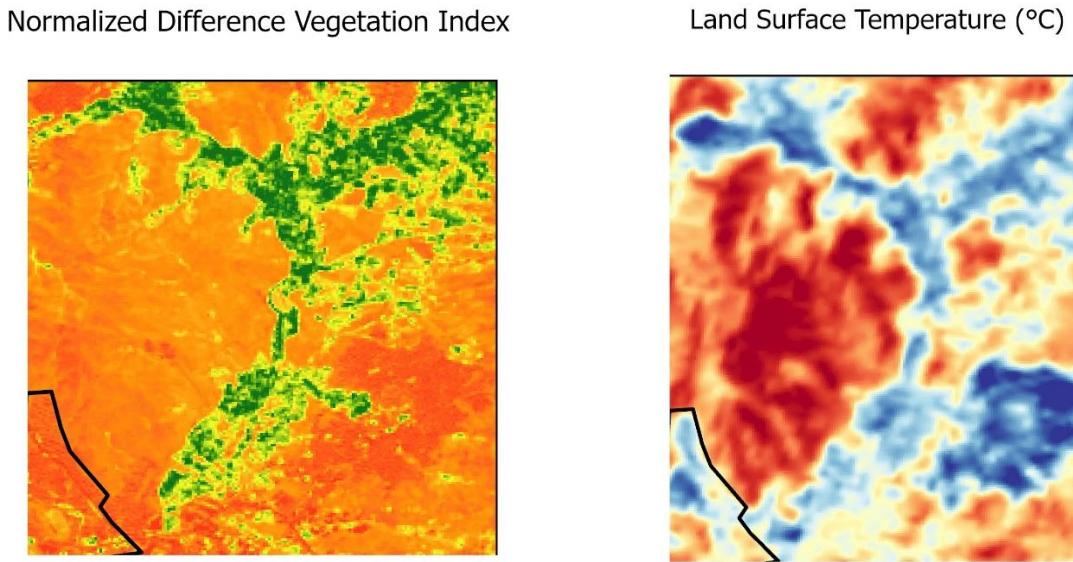


Figure 56: Comparaison de l'indice NDVI (à gauche) et de la température de surface (à droite) en juillet 2025 en périphérie de Sanandaj, région de Nanaleh

5.4 Évolution 2015–2020–2025 et rôle de la saisonnalité

Sur la période 2015–2020–2025, on observe des différences spatiales dans la distribution de la végétation (NDVI) et des surfaces chaudes (LST). L'évolution n'est pas homogène : certains secteurs montrent une continuité des zones végétalisées, tandis que d'autres semblent se fragmenter ou diminuer selon les années.

La saisonnalité reste un facteur majeur : les contrastes entre avril et juillet sont très structurants. En juillet, le stress hydrique et la chaleur tendent à réduire l'expression du NDVI (surtout sur végétation non irriguée) tandis que la LST augmente fortement. Ainsi, une partie des différences interannuelles peut aussi refléter des conditions météorologiques particulières autour de la date d'acquisition (vagues de chaleur, sécheresse, pluie récente), ce qui doit être pris en compte dans l'interprétation.

5.5 Cohérence avec les tendances attendues et comparaison qualitative avec la littérature

Les résultats sont globalement cohérents avec les tendances généralement rapportées dans les études urbaines et périurbaines : (1) corrélation négative NDVI–LST, (2) amplification estivale des contrastes thermiques, (3) rôle rafraîchissant des espaces végétalisés (parcs, zones agricoles, ceintures vertes). La cohérence qualitative est un point fort : malgré des données limitées dans le temps (deux dates par année), les patrons spatiaux observés correspondent à des mécanismes

robustes et bien documentés (évapotranspiration, albédo, inertie thermique des matériaux urbains).

5.6 Limites de l'approche et biais possibles

Plusieurs limites méthodologiques doivent être rappelées pour interpréter correctement les résultats :

- Échantillonnage temporel limité : utiliser une paire de dates (avril/jUILLET) par année donne déjà une information utile sur la saisonnalité et la tendance générale, mais une analyse plus robuste nécessiterait plusieurs dates par saison (ou des séries mensuelles), afin de réduire l'effet “date particulière” et mieux caractériser une tendance de fond.
- Absence de validation météo locale : idéalement, les variations de LST/NDVI devraient être discutées en parallèle de données locales (température de l'air, précipitations, humidité, vent). Dans ce projet, l'accès aux plateformes locales a été impossible en raison d'une coupure totale d'Internet en Iran rapportée par la presse [60], [61], ce qui a empêché d'intégrer des données météorologiques et géographiques régionales précises.
- Effets atmosphériques et conditions d'acquisition : même avec des prétraitements, la présence de brume, d'aérosols, de résidus de nuages/ombres, et les différences de conditions d'illumination peuvent influencer NDVI et LST.
- Résolution spatiale et pixels mixtes : en milieu urbain, un pixel peut mélanger végétation, sol nu et bâti, ce qui introduit une incertitude dans l'interprétation (surtout aux frontières urbain/périurbain).

5.7 Recommandations techniques pour des travaux futurs

À partir des résultats et des limites identifiées, plusieurs pistes d'amélioration et de prolongement sont proposées :

1. Renforcer la robustesse temporelle : intégrer plusieurs dates par saison (ou une série mensuelle) et, si possible, analyser des indicateurs climatiques locaux (température de l'air, pluie) pour distinguer “tendance de fond” et “effet date”.
2. Approfondir l'analyse NDVI–LST par zones : au-delà de la lecture visuelle, calculer des statistiques (moyenne, médiane, quantiles) de NDVI et LST par unités spatiales (quartiers, classes d'occupation du sol, gradient centre–périphérie) et tester quantitativement la relation (corrélation/régression).
3. Étudier spécifiquement la périphérie végétalisée (cas juillet 2025) : la comparaison NDVI (juillet 2025) vs LST (juillet 2025) montre une zone périphérique bien végétalisée associée à une LST plus faible. Cela pourrait indiquer un effet rafraîchissant significatif des espaces végétalisés périphériques. Un travail futur pourrait :
 - Cartographier précisément cette ceinture verte,
 - Comparer plusieurs années et plusieurs dates estivales,
 - Analyser le rôle de l'irrigation, de l'occupation du sol et de la topographie,

- Et évaluer son potentiel comme levier d'adaptation (planification urbaine, trames vertes).
4. Améliorer la caractérisation des surfaces : coupler NDVI/LST avec une classification d'occupation du sol (bâti, sol nu, agriculture, végétation) et/ou intégrer des données plus fines (p. ex. Sentinel-2 pour la végétation) afin de réduire l'incertitude liée aux pixels mixtes et mieux expliquer les “hotspots”.
 5. Intégrer des données météorologiques et géographiques régionales précises (température de l'air, précipitations, humidité, vent) avec les variations de LST/NDVI.

5.8 Conclusion générale

Ce travail montre que l'approche par télédétection permet de décrire efficacement la dynamique spatiale et saisonnière de la végétation (NDVI) et des températures de surface (BT/LST) à Sanandaj sur 2015–2020–2025. Les résultats indiquent une opposition nette entre surfaces minéralisées (plus chaudes, NDVI faible) et espaces végétalisés (plus frais, NDVI élevé), particulièrement en été. Malgré des limites (peu de dates, absence de données météo locales), l'étude met en évidence des patrons cohérents et utiles pour une lecture territoriale : localisation des zones chaudes, rôle potentiel des périphéries végétalisées, et importance de la saisonnalité. Les recommandations proposées visent à rendre l'analyse plus robuste et opérationnelle, notamment via un renforcement temporel, une validation climatique, et une étude approfondie du rôle rafraîchissant de la ceinture végétalisée périphérique observée en juillet 2025.

6. Bibliographie

- [1] "Chapter 6: Cities, settlements and key infrastructure." Accessed: Jan. 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/chapter-6/>
- [2] "Heat and health." Accessed: Jan. 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health>
- [3] "Health risks." Accessed: Jan. 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.who.int/initiatives/urban-health-initiative/health-impacts/other-health-risks>
- [4] "Landsat 8 | U.S. Geological Survey." Accessed: Jan. 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>
- [5] "USGS, Landsat 8 Data Users Handbook v5.0 (2019)".
- [6] "Using the USGS Landsat Level-1 Data Product | U.S. Geological Survey." Accessed: Jan. 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>
- [7] "2015 Past Weather at Sanandaj, Iran - Weather Spark." Accessed: Jan. 12, 2026. [Online]. Available: <https://weatherspark.com/h/y/148832/2015/Historical-Weather-during-2015-at-Sanandaj-Iran#Figures-Temperature>
- [8] "Landsat Collection 2 Level-1 Data | U.S. Geological Survey." Accessed: Jan. 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-1-data>
- [9] J. A. Sobrino, J. C. Jiménez-Muñoz, and L. Paolini, "Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5," *Remote Sens. Environ.*, vol. 90, no. 4, pp. 434–440, Apr. 2004, doi: 10.1016/j.rse.2004.02.003.
- [10] J. C. Jiménez-Muñoz and J. A. Sobrino, "A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data," *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 108, no. D22, 2003, doi: 10.1029/2003JD003480.
- [11] "Sanandaj | Kurdish City, Capital of Kurdistan, Iran | Britannica," Encyclopedia Britannica. Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/place/Sanandaj>
- [12] "USGS EROS Archive - Landsat Archives - Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) and TIRS (Thermal Infrared Sensor) Level-1 Data Products | U.S. Geological Survey." Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-8-oli-operational-land-imager-and>
- [13] J. A. Voogt and T. R. Oke, "Thermal remote sensing of urban climates," *Remote Sens. Environ.*, vol. 86, no. 3, pp. 370–384, Aug. 2003, doi: 10.1016/S0034-4257(03)00079-8.
- [14] Q. Weng, "Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 64, no. 4, pp. 335–344, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2009.03.007.
- [15] "Landsat Collection 2 Surface Temperature | U.S. Geological Survey." Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-temperature>
- [16] "ARSET - Satellite Remote Sensing for Urban Heat Islands | NASA Applied Sciences." Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training/english/arset-satellite-remote-sensing-urban-heat-islands>
- [17] "What are the band designations for the Landsat satellites? | U.S. Geological Survey." Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites>
- [18] "Landsat Collection 2 Level-1 Data | U.S. Geological Survey." Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-1-data>
- [19] "Landsat Collection 2 Level-2 Science Products | U.S. Geological Survey." Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>

- [20] "Landsat Collection 2 Surface Reflectance | U.S. Geological Survey." Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-reflectance>
- [21] J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering, "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS," Jan. 1974. Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>
- [22] C. J. Tucker, "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation," *Remote Sens. Environ.*, vol. 8, no. 2, pp. 127–150, May 1979, doi: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- [23] "Landsat Normalized Difference Vegetation Index | U.S. Geological Survey." Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index>
- [24] "NDVI, the Foundation for Remote Sensing Phenology | U.S. Geological Survey." Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/special-topics/remote-sensing-phenology/science/ndvi-foundation-remote-sensing-phenology>
- [25] N. Earth Science Data Systems, "Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) | NASA Earthdata." Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.earthdata.nasa.gov/topics/land-surface/normalized-difference-vegetation-index-ndvi>
- [26] S. Huang, L. Tang, J. P. Hupy, Y. Wang, and G. Shao, "A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing," *J. For. Res.*, vol. 32, no. 1, pp. 1–6, Feb. 2021, doi: 10.1007/s11676-020-01155-1.
- [27] A. R. Huete, "A soil-adjusted vegetation index (SAVI)," *Remote Sens. Environ.*, vol. 25, no. 3, pp. 295–309, Aug. 1988, doi: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
- [28] "Landsat Enhanced Vegetation Index | U.S. Geological Survey." Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-enhanced-vegetation-index>
- [29] "Top of the Atmosphere (TOA) | UN-SPIDER Knowledge Portal." Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.un-spider.org/node/10958>
- [30] "How do I rescale Landsat Level-1 digital numbers to reflectance, radiance, and brightness temperature? | U.S. Geological Survey." Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/faqs/how-do-i-rescale-landsat-level-1-digital-numbers-reflectance-radiance-and-brightness>
- [31] ZB Su, "Introduction to thermal infrared remote sensing." May 01, 2013. [Online]. Available: https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/0/D3T1b_Su_BasicSEBS_ESA_LTC13.pdf
- [32] "Landsat 8 OLI and TIRS Calibration Notices | U.S. Geological Survey." Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8-oli-and-tirs-calibration-notices>
- [33] X. Yu, X. Guo, and Z. Wu, "Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method," *Remote Sens.*, vol. 6, no. 10, pp. 9829–9852, Oct. 2014, doi: 10.3390/rs6109829.
- [34] J. M. Norman and F. Becker, "Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 77, no. 3–4, pp. 153–166, Dec. 1995, doi: 10.1016/0168-1923(95)02259-Z.
- [35] "Land Surface Temperature and Emissivity." Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <http://lsa-saf.eumetsat.int/en/data/products/land-surface-temperature-and-emissivity/>
- [36] L. Wang *et al.*, "Land Surface Condition-Driven Emissivity Variation and Its Impact on Diurnal Land Surface Temperature Retrieval Uncertainty," *Remote Sens.*, vol. 17, no. 14, p. 2353, Jan. 2025, doi: 10.3390/rs17142353.

- [37] J. A. Sobrino *et al.*, “Land Surface Emissivity Retrieval From Different VNIR and TIR Sensors,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 2, pp. 316–327, Feb. 2008, doi: 10.1109/TGRS.2007.904834.
- [38] Copertino, “Comparison of algorithms to retrieve Land Surface Temperature from LANDSAT-7 ETM+ IR data in the Basilicata Ionian band,” *Tethys J. Weather Clim. West. Mediterr.*, 2012, doi: 10.3369/tethys.2012.9.03.
- [39] N. Earth Science Data Systems, “Land Surface Temperature | NASA Earthdata.” Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.earthdata.nasa.gov/topics/land-surface/land-surface-temperature>
- [40] “Land Surface Temperature,” World Meteorological Organization. Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://gcos.wmo.int/site/global-climate-observing-system-gcos/essential-climate-variables/land-surface-temperature>
- [41] Joel Susskind, Jae Lee, and Lena Iredell, “Version 6 Surface Skin/Surface Air Temperature Differences and their Interannual Variability.” 2014.
- [42] Z.-L. Li *et al.*, “Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 131, pp. 14–37, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.rse.2012.12.008.
- [43] Q. Weng, D. Lu, and J. Schubring, “Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 89, no. 4, pp. 467–483, Feb. 2004, doi: 10.1016/j.rse.2003.11.005.
- [44] F. Yuan and M. E. Bauer, “Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 106, no. 3, pp. 375–386, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.rse.2006.09.003.
- [45] S. Guha and H. Govil, “A long-term monthly analytical study on the relationship of LST with normalized difference spectral indices,” *Eur. J. Remote Sens.*, vol. 54, no. 1, pp. 487–512, Jan. 2021, doi: 10.1080/22797254.2021.1965496.
- [46] “Sanandaj, Iran.” Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.geonames.org/117574/sanandaj.html>
- [47] N. Karimi and K. Boussauw, “Sanandaj, Iran,” *Cities*, vol. 72, pp. 261–273, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.cities.2017.09.004.
- [48] “Sanandaj (Sanandaj, Kurdistan, Iran) - Population Statistics, Charts, Map, Location, Weather and Web Information.” Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: https://citypopulation.de/en/iran/kordestan/sanandaj/120403_sanandaj/
- [49] “Sanandaj - Creative Cities Network.” Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.unesco.org/en/creative-cities/sanandaj>
- [50] “Sanandaj Population 2026,” World Population Review. Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://worldpopulationreview.com/cities/iran/sanandaj>
- [51] “Landsat 8-9 OLI/TIRS Collection 2 Level 1 Data Format Control Book | U.S. Geological Survey.” Accessed: Jan. 13, 2026. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-9-olitirs-collection-2-level-1-data-format-control-book>
- [52] “EarthExplorer,” EarthExplorer. [Online]. Available: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- [53] T. A. Akbar, Q. K. Hassan, S. Ishaq, M. Batool, H. J. Butt, and H. Jabbar, “Investigative Spatial Distribution and Modelling of Existing and Future Urban Land Changes and Its Impact on Urbanization and Economy,” *Remote Sens.*, vol. 11, no. 2, p. 105, Jan. 2019, doi: 10.3390/rs11020105.
- [54] J. Cristóbal, J. C. Jiménez-Muñoz, J. A. Sobrino, M. Ninyerola, and X. Pons, “Improvements in land surface temperature retrieval from the Landsat series thermal band using water vapor and air temperature,” *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 114, no. D8, 2009, doi: 10.1029/2008JD010616.

- [55] N. Aslan and D. Koc-San, “THE EFFECTS OF LAND COVER CHANGES ON LAND SURFACE TEMPERATURES,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. XLVIII-1/W2-2023, pp. 1311–1318, Dec. 2023, doi: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W2-2023-1311-2023.
- [56] J. Cristóbal, J. C. Jiménez-Muñoz, A. Prakash, C. Mattar, D. Skoković, and J. A. Sobrino, “An Improved Single-Channel Method to Retrieve Land Surface Temperature from the Landsat-8 Thermal Band,” *Remote Sens.*, vol. 10, no. 3, p. 431, Mar. 2018, doi: 10.3390/rs10030431.
- [57] M. Rawat and R. N. Singh, “A study on the comparative review of cool roof thermal performance in various regions,” *Energy Built Environ.*, vol. 3, no. 3, pp. 327–347, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.enbenv.2021.03.001.
- [58] J.-J. Baik, H. Lim, B.-S. Han, and H.-G. Jin, “Cool-roof effects on thermal and wind environments during heat waves: A case modeling study in Seoul, South Korea,” *Urban Clim.*, vol. 41, p. 101044, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.uclim.2021.101044.
- [59] “Comparison of the performance of different facade materials for reducing building cooling needs,” in *Eco-Efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs*, Woodhead Publishing, 2015, pp. 155–194. doi: 10.1016/B978-1-78242-380-5.00006-6.
- [60] “Plus de 84 heures de coupure’: comment le régime iranien arrive à bloquer Internet,” [www.rtl.fr](http://www rtl fr). Accessed: Jan. 15, 2026. [Online]. Available: <https://www.rtl.fr/actu/international/plus-de-84-heures-de-coupe-comment-le-regime-iranien-arrive-a-bloquer-internet-7900587779>
- [61] “2026 Internet blackout in Iran,” *Wikipedia*. Jan. 14, 2026. Accessed: Jan. 15, 2026. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2026_Internet_blackout_in_Iran&oldid=1332970446

7. Annexes

7.1 Scripts Python et détails d'implémentation

1. Évolution de la LST moyenne

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

df = pd.read_csv("Tables//TABLEAU_COMPARATIF.csv", sep=";")

# Nettoyage / types
dff["Years"] = df["Year"].astype(int)

dff["Month"] = df["Month"].astype(str).str.strip()

dff["DateLabel"] = df["Year"].astype(str) + " " + df["Month"]

plt.figure()

for month in ["April", "July"]:
    sub = df[df["Month"] == month].sort_values("Years")
    plt.plot(sub["Years"], sub["MEAN"], marker="o", label=month)

plt.xlabel("Année")
plt.ylabel("LST moyenne (°C)")
plt.title("Évolution de la LST moyenne (April vs July)")
plt.xticks(sorted(df["Years"].unique()))
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()
```

2. Écart-type

```
df_sorted = df.sort_values(["Years", "Month"])

plt.figure()
plt.bar(df_sorted["DateLabel"], df_sorted["STD"])
plt.xlabel("Date")
plt.ylabel("Écart-type (°C)")
plt.title("Écart-type de la LST par date")
plt.xticks(rotation=45, ha="right")
plt.grid(True, axis="y")
plt.tight_layout()
plt.show()
```

3. Distribution par boxplot sur échantillon de pixels

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

samples = pd.read_csv("csv//LST_Simples_Points.csv", sep=";")

# liste des colonnes LST dans l'ordre que tu veux
cols = [
    "lst_2015_ap", "lst_2015_ju",
    "lst_2020_ap", "lst_2020_ju",
    "lst_2025_ap", "lst_2025_ju",
]

# convertir en numérique + enlever NaN
data = [pd.to_numeric(samples[c], errors="coerce").dropna().values for c in cols]
labels = ["2015 A", "2015 J", "2020 A", "2020 J", "2025 A", "2025 J"]

plt.figure()
plt.boxplot(data, labels=labels, showfliers=True)
plt.xlabel("Date")
plt.ylabel("LST (°C)")
plt.title("Distribution de la LST (échantillon de pixels)")
plt.grid(True, axis="y")
plt.show()
```

4. Relation NDVI–LST

```
# Relation NDVI–LST (April 2015)

import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

samples = pd.read_csv("LST_NDVI_samples2.csv", sep=";")

ndvi = pd.to_numeric(samples["ndvi_2015_ap"], errors="coerce")
lst = pd.to_numeric(samples["lst_2015_ap"], errors="coerce")

m = ndvi.notna() & lst.notna()
ndvi, lst = ndvi[m], lst[m]

plt.figure()
plt.scatter(ndvi, lst, s=8)
plt.xlabel("NDVI")
plt.ylabel("LST (°C)")
plt.title("Relation NDVI–LST (April 2015)")
plt.grid(True)
plt.show()

print("Corrélation Pearson (r) =", ndvi.corr(lst))
```

5. Relation NDVI–LST : saisonnière

```
# Relation NDVI–LST : April vs July (2015)

def plot_ndvi_lst(samples, ndvi_col, lst_col, label):
    ndvi = pd.to_numeric(samples[ndvi_col], errors="coerce")
    lst = pd.to_numeric(samples[lst_col], errors="coerce")
    m = ndvi.notna() & lst.notna()
    ndvi, lst = ndvi[m], lst[m]
    plt.scatter(ndvi, lst, s=8, label=f"{label} (r={ndvi.corr(lst):.2f})")

plt.figure()
plot_ndvi_lst(samples, "ndvi_2015_ap", "lst_2015_ap", "April 2015")
plot_ndvi_lst(samples, "ndvi_2015_ju", "lst_2015_ju", "July 2015")
plt.xlabel("NDVI")
plt.ylabel("LST (°C)")
plt.title("Relation NDVI–LST : April vs July (2015)")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()
```

6. Relation NDVI–LST : interannuelle

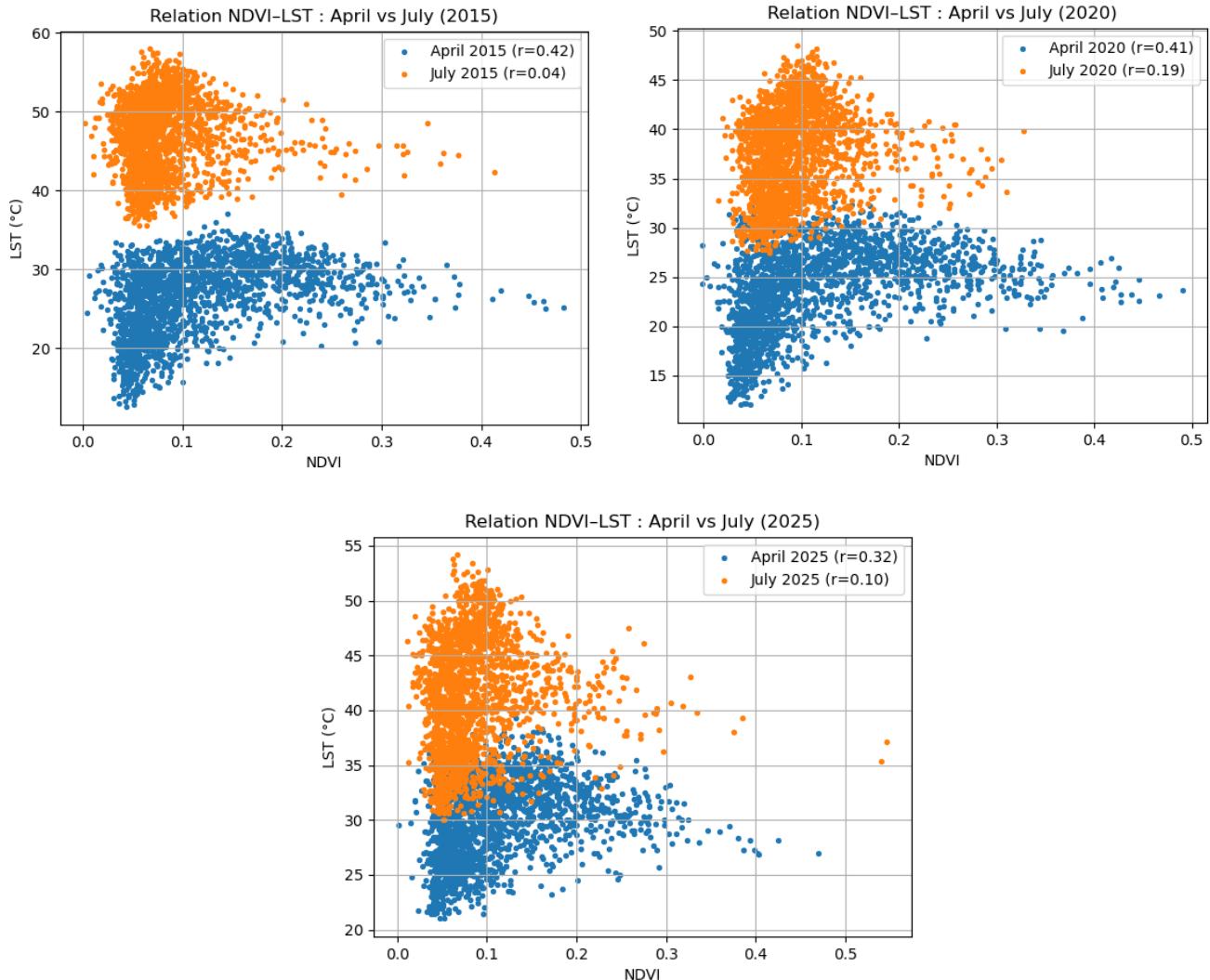
```
# Relation NDVI–LST : April (2015 vs 2020 vs 2025)

def plot_ndvi_lst(samples, ndvi_col, lst_col, label):
    ndvi = pd.to_numeric(samples[ndvi_col], errors="coerce")
    lst = pd.to_numeric(samples[lst_col], errors="coerce")
    m = ndvi.notna() & lst.notna()
    ndvi, lst = ndvi[m], lst[m]
    plt.scatter(ndvi, lst, s=8, label=f"{label} (r={ndvi.corr(lst):.2f})")

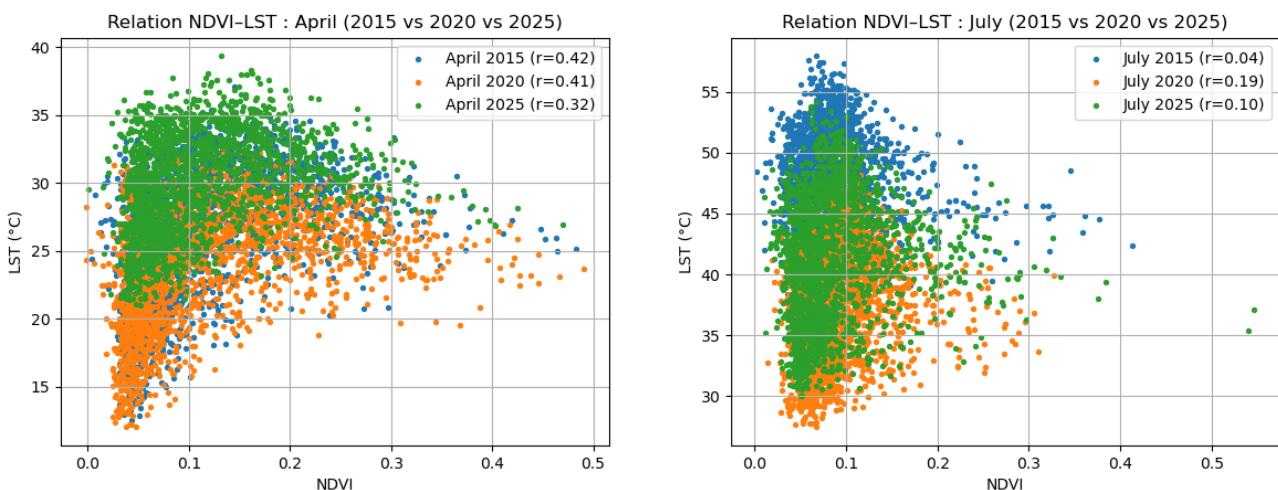
plt.figure()
plot_ndvi_lst(samples, "ndvi_2015_ap", "lst_2015_ap", "April 2015")
plot_ndvi_lst(samples, "ndvi_2020ap", "lst_2020_ap", "April 2020")
plot_ndvi_lst(samples, "ndvi_2025_ap", "lst_2025_ap", "April 2025")
plt.xlabel("NDVI")
plt.ylabel("LST (°C)")
plt.title("Relation NDVI–LST : April (2015 vs 2020 vs 2025)")
plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()
```

7.2 Graphiques supplémentaires

1. Relation NDVI-LST : saisonnière



2. Relation NDVI-LST : interannuelle



Les plages de NDVI et la superficie

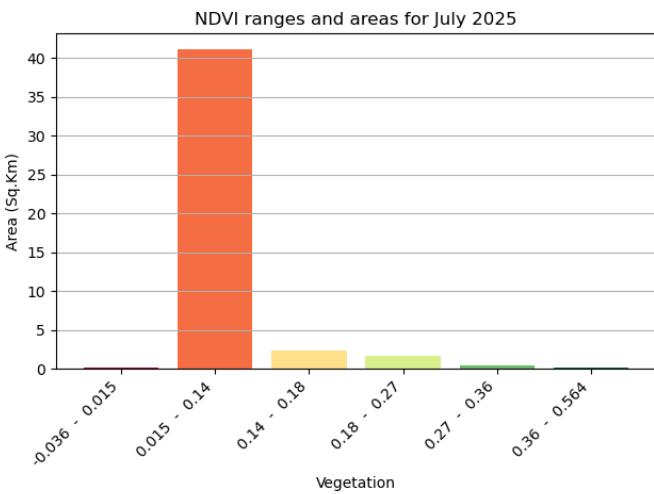
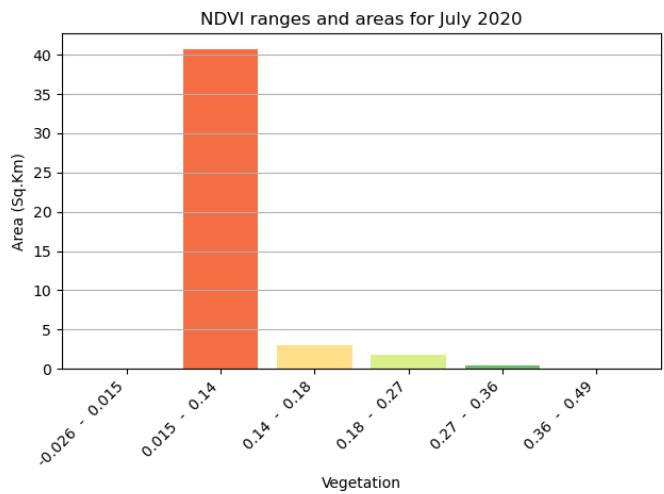
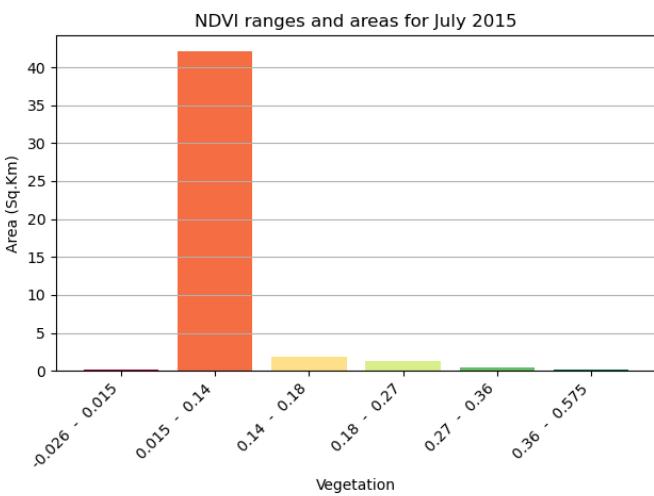
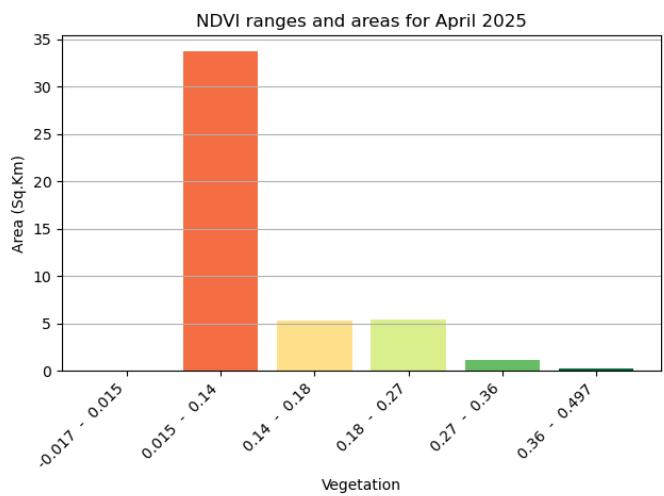
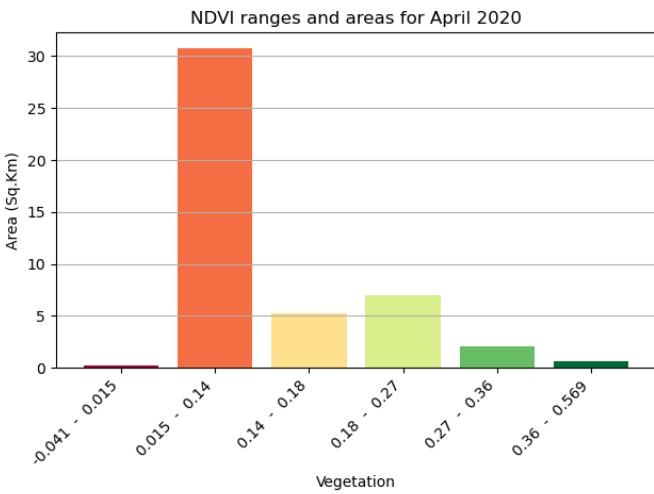
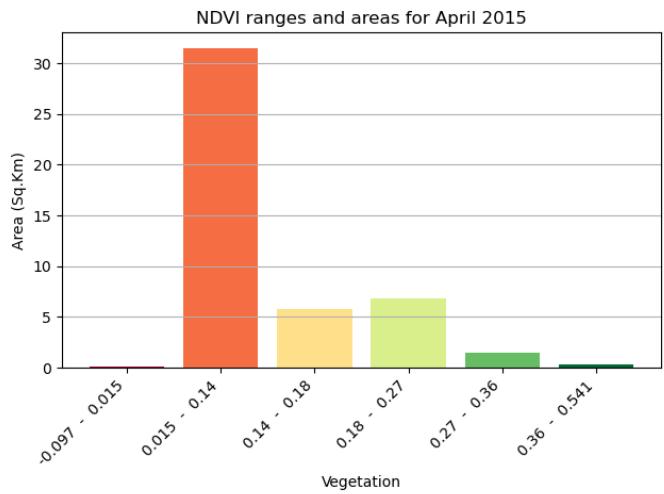


Table des figures :

Figure 1: Localisation de la zone d'étude: position de Sanandaj au Kurdistan en Iran	16
Figure 2: Flowchart traitement LST	19
Figure 3: NDVI de Sanandaj, avril 2015	23
Figure 4: NDVI de Sanandaj, juillet 2015.	23
Figure 5: NDVI de Sanandaj, avril 2020	24
Figure 6: NDVI de Sanandaj, juillet 2020	24
Figure 7: NDVI de Sanandaj, avril 2025	25
Figure 8: NDVI de Sanandaj, juillet 2025	25
Figure 9: Température de brillance (BT) de Sanandaj, avril 2015, en degrés Celsius	26
Figure 10: Température de brillance (BT) de Sanandaj, juillet 2015, en degrés Celsius	26
Figure 11: Température de brillance (BT) de Sanandaj, avril 2020, en degrés Celsius.....	27
Figure 12: Température de brillance (BT) de Sanandaj, juillet 2020, en degrés Celsius	27
Figure 13: Température de brillance (BT) de Sanandaj, avril 2025, en degrés Celsius.....	28
Figure 14: Température de brillance (BT) de Sanandaj, juillet 2025, en degrés Celsius	28
Figure 15: Émissivité de surface (LSE) de Sanandaj, avril 2015.....	29
Figure 16: Émissivité de surface (LSE) de Sanandaj, juillet 2015.....	29
Figure 17: Émissivité de surface (LSE) de Sanandaj, avril 2020.....	30
Figure 18: Émissivité de surface (LSE) de Sanandaj, juillet 2020.....	30
Figure 19: Émissivité de surface (LSE) de Sanandaj, avril 2025.....	31
Figure 20: Émissivité de surface (LSE) de Sanandaj, juillet 2025.....	31
Figure 21: Température de surface (LST) de Sanandaj, avril 2015, en degrés Celsius	32
Figure 22: Température de surface (LST) de Sanandaj, juillet 2015, en degrés Celsius.....	32
Figure 23: Température de surface (LST) de Sanandaj, avril 2020, en degrés Celsius	33
Figure 24: Température de surface (LST) de Sanandaj, juillet 2020, en degrés Celsius.....	33
Figure 25: Température de surface (LST) de Sanandaj, avril 2025, en degrés Celsius	34
Figure 26: Température de surface (LST) de Sanandaj, juillet 2025, en degrés Celsius.....	34
Figure 27: Différence saisonnière de la température de surface à Sanandaj en 2015, calculée comme LST juillet moins LST avril, en degrés Celsius	36
Figure 28: Différence saisonnière de la température de surface à Sanandaj en 2020, calculée comme LST juillet moins LST avril, en degrés Celsius	36
Figure 29: Différence saisonnière de la température de surface à Sanandaj en 2025, calculée comme LST juillet moins LST avril, en degrés Celsius	37
Figure 30: Différence interannuelle de la température de surface à Sanandaj en avril, calculée comme LST avril 2025 moins LST avril 2015, en degrés Celsius.	38
Figure 31: Différence interannuelle de la température de surface à Sanandaj en juillet, calculée comme LST juillet 2025 moins LST juillet 2015, en degrés Celsius.	38
Figure 32: Comparaison saisonnière intra année pour avril et juillet 2015.....	39
Figure 33: Comparaison saisonnière intra année pour avril et juillet 2020.....	40
Figure 34: Comparaison saisonnière intra année pour avril et juillet 2025.....	41
Figure 35: Comparaison temporelle interannuelle (2025 moins 2015) pour avril	42
Figure 36: Comparaison temporelle interannuelle (2025 moins 2015) pour juillet	43
Figure 37: Évolution de la LST moyenne à Sanandaj en avril et en juillet pour 2015, 2020 et 2025, en degrés Celsius	44
Figure 38: Écart type de la LST par date à Sanandaj pour 2015, 2020 et 2025, en degrés Celsius	45

Figure 39: Distribution des valeurs de température de surface (LST) à Sanandaj pour les six dates étudiées, estimée sur un échantillon de 2000 points extraits dans la zone d'étude, en degrés Celsius	46
Figure 40: Exemple de toiture à Sanandaj montrant une membrane bitumineuse avec surface aluminisée de type Isogam, pouvant influencer la réponse thermique des surfaces bâties.	47
Figure 41: Exemple de façade en pierre à Sanandaj, illustrant l'importance des propriétés optiques des matériaux de façade dans le comportement thermique.	48
Figure 42: Secteur nord-ouest de Sanandaj: extrait NDVI montrant une végétation relativement élevée pour 2015, une végétation intermédiaire pour 2020 et une forte diminution du couvert végétal pour 2025	48
Figure 43: Relation entre NDVI et LST à Sanandaj en avril 2015, points d'échantillonnage communs, corrélation de Pearson $r = 0,421$	49
Figure 44: Relation entre NDVI et LST à Sanandaj en juillet 2015, points d'échantillonnage communs, corrélation de Pearson $r = 0,036$	49
Figure 45: Relation entre NDVI et LST à Sanandaj en avril 2020, points d'échantillonnage communs, corrélation de Pearson $r = 0,410$	50
Figure 46: Relation entre NDVI et LST à Sanandaj en juillet 2020, points d'échantillonnage communs, corrélation de Pearson $r = 0,185$	50
Figure 47: Relation entre NDVI et LST à Sanandaj en avril 2025, points d'échantillonnage communs, corrélation de Pearson $r = 0,315$	51
Figure 48: Relation entre NDVI et LST à Sanandaj en juillet 2025, points d'échantillonnage communs, corrélation de Pearson $r = 0,095$	51
Figure 49: Relation entre classes de NDVI et température de surface (LST) à Sanandaj pour six dates (avril et juillet 2015, 2020 et 2025). Pour chaque date, la LST moyenne est calculée par classe NDVI à partir des mêmes points d'échantillonnage	52
Figure 50: Répartition surfacique de la température de surface (LST) par plages de température - avril 2015	53
Figure 51: Répartition surfacique de la température de surface (LST) par plages de température - juillet 2015	54
Figure 52: Répartition surfacique de la température de surface (LST) par plages de température - avril 2020	55
Figure 53: Répartition surfacique de la température de surface (LST) par plages de température - juillet 2020	55
Figure 54: Répartition surfacique de la température de surface (LST) par plages de température - avril 2025	56
Figure 55: Répartition surfacique de la température de surface (LST) par plages de température - juillet 2025	57
Figure 56: Comparaison de l'indice NDVI (à gauche) et de la température de surface (à droite) en juillet 2025 en périphérie de Sanandaj, région de Nanaleh	60

Table des tableaux :

Tableau 1: Caractéristiques techniques de Landsat 8	11
Tableau 2: Comparaison des Niveaux de Traitement (Level 1 vs Level 2).....	12
Tableau 3: Tableau comparaison saisonnière 2015	39

Tableau 4: Tableau comparaison saisonnière 2020	40
Tableau 5: Tableau comparaison saisonnière 2025	40
Tableau 6: Tableau comparaison temporelle avril (2015 - 2025)	41
Tableau 7: Tableau comparaison temporelle juillet (2015 - 2025)	42
Tableau 8: Statistiques de la température de surface (LST) à Sanandaj, calculées sur l'ensemble des pixels de la zone d'étude, en degrés Celsius.	43
Tableau 9: Tableau LST température ranges and areas for April 2015.....	53
Tableau 10: Tableau LST temperature ranges and areas for July 2015	54
Tableau 11: Tableau LST temperature ranges and areas for April 2020.....	54
Tableau 12: Tableau LST temperature ranges and areas for July 2020	55
Tableau 13: Tableau LST temperature ranges and areas for April 2025	56
Tableau 14: Tableau LST température ranges and areas for July 2025	56