

ANALYSE DU RÉCHAUFFEMENT TERRESTRE BASÉE SUR L'ARBRE DE DÉCISION ET LE PROCESSUS DE TRANSFORMATION SPATIALE, SUR UNE PÉRIODE DE 18 ANS

**Abdramane DEMBELE* , Mamadou DIALLO, Djéneba DIARRA
et Moussa KEITA**

*Ecole Nationale d'Ingénieurs ENI-ABT, Département de la Géodésie, 2410,
Av Vollenhoven, 242, Bamako, Mali*

(reçu le 17 Janvier 2022; accepté le 27 Mai 2022)

* Correspondance, e-mail : demabdra@yahoo.fr

RÉSUMÉ

L'enquête de perception des risques mondiaux (Global risk perception survey-GRPS) montre que les risques environnementaux dus aux réchauffements climatiques ont pris de l'importance ces dernières années. En particulier, l'état du réchauffement terrestre s'avère l'un des facteurs fondamentaux de la dégradation extrême de l'environnement. Ce travail est focalisé sur les techniques permettant d'évaluer et de caractériser les températures de la surface terrestre (TST) à travers des données MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sur une période de 18 ans. Cependant, l'arbre de décision (AD) et le processus de transformation spatiale (PTS), et la régression linéaire ont été utilisées comme méthodes principales pour statuer le réchauffement terrestre. Ainsi la progression des tranches de température, le taux de transition, la prédiction de la température de la surface terrestre, les effets sur les ressources en eaux souterraines ont été les résultats. Ceux-ci sont les plus importants pour la prise des décisions dans la gestion des ressources naturelles superficielles et souterraines.

Mots-clés : *température de la surface terrestre (TST), réchauffement terrestre, MODIS, taux de transition, arbre de décision.*

ABSTRACT

Analysis of global warming based on of the decision tree and the spatial transformation process, over a period of 18 years

The Global Risk Perception Survey (GRPS) shows that environmental risks due to global warming have increased in importance in recent years. In particular, the state of global warming is proving to be one of the fundamental factors in the extreme degradation of the environment. This work is focused on techniques for assessing and characterizing Land surface temperatures (LST) through Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data over an 18-year period. However, the decision tree (DT) and spatial transformation process (STP), and linear regression have been used as the primary methods to examine global warming. Thus, the progression of temperature slices, the transition rate, the prediction of the land surface temperature, the effects on groundwater resources were the results. Those that are very important for decision-making in the management of surface and underground natural resources.

Keywords : *land surface temperature (LST), global warming, MODIS, transition rate, decision tree.*

I - INTRODUCTION

Les dernières décennies ont enregistré beaucoup d'attention sur le réchauffement terrestre à grande échelle [1, 2]. De plus, a été accentuée l'avancement des sciences de la terre et de l'environnement dans l'analyse et la caractérisation de la température de la surface terrestre (TST) [1, 3]. L'une des principales forces motrices à l'origine de nombreuses anomalies extrêmes du sol au cours des dernières années que nombreuses régions ont subies est du au réchauffement terrestre [2, 4, 5]. Sur la base des données des stations météorologiques, de nombreuses études ont quantifié la température globale de la terre [6, 7]. Ensuite, plusieurs phénomènes et extrêmes climatiques ont été enregistrés au cours de la période 2011-2015 et la probabilité de réchauffement a été multipliée par dix ou plus, dans le cas de certaines températures extrêmement élevées [8 - 11]. D'une part, seules les anomalies de température ont été analysées par plusieurs études. Le delta intérieur du Niger (DIN), au centre du Mali, à travers les régions désertiques, représente l'une des zones chaudes de la plaque africaine [12, 13]. Le DIN fait partie d'une grande structure géologique (Continental Terminal, Précambrien, Quaternaire) qui a joué plusieurs rôles depuis l'orogénèse panafricaine et peut présenter un risque d'activités de plaques actuelles [14, 15]. Certaines portions de la région se

superposent à une zone d'anomalies gravimétriques positives [16]. Le parallélisme entre les directions gravitationnelle et structurale est particulièrement marqué à Tombouctou, Faguibine et la tranchée de Nara [17, 18]. En avril 2001, des rapports faisaient état d'une augmentation de l'activité thermique dans la région de Tombouctou [16]. Fumerolles chaudes et roches magmatiques dont la partie supérieure d'un système hydrothermal a été observée et considérée comme une activité volcanique [19]. De nos jours, la méthode de l'arbre de décision n'est utilisée que pour étudier le paysage naturel. En plus de nombreuses études sur la TST ont juste visualiser le réchauffement terrestre, mais la connaissance du taux de transition et la vitesse de transition fait défaut [20, 21]. Ainsi, l'objectif de cette recherche est d'utiliser les méthodes de l'arbre de décision et du PTS pour analyser et caractériser le réchauffement terrestre. Plus spécifiquement évaluer d'une part le déplacement multitemporelle de la TST, y compris sa transition et sa prédiction, et d'autre part estimer les effets du réchauffement sur les ressources en eaux souterraines et l'environnement.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Zone d'étude et données

La zone d'étude le Delta Intérieur du Niger (DIN) se localise au centre du Mali en se limitant latitudinalement entre 13° Nord et 18° Nord, puis longitudinalement entre 7° Ouest et 1° Ouest. Elle couvre une superficie d'environ 131886.607 km² et se fait traverser par le fleuve Niger de sud-ouest au nord-est (*Figure 1*). Elle s'étend sur une géologie complexe allant des alluvions anciennes au précambrien A de formation tabulaire supérieur (*Figure 10*). Ces dernières années ont été impactée par l'instabilité climatique [3, 15]. Sa température varie entre 12° et 29° C et se partageant le climat tropical et le climat semi-aride [8, 13]. En certain endroit la sécheresse caractérise l'agriculture de type extensif [15, 16]. Les précipitations annuelles moyennes sont comprises entre 150 et 750 mm [8, 13]. Données MODIS : Le Spectroradiomètre imageur à résolution modérée (MODIS) est une série d'instruments d'observation scientifique couplés à un satellite embarqué à bord de deux satellites (Terra et Aqua) de l'EOS (Earth Observing System) [27]. Les images s'étendent sur une période de 18ans allant de l'an 2000 à l'an 2017 (*Figure 3*). Elles définissent une résolution spatiale de 0.928 kilomètres sur le système de référence WGS94 et sont disponibles gratuitement sur les sites de l'USGS (United States Geological Survey) [28]. Le traitement et l'analyse de ces images ont été assurés par les logiciels ENVI 5.1, Arc GIS 10.5, XLSTAT.

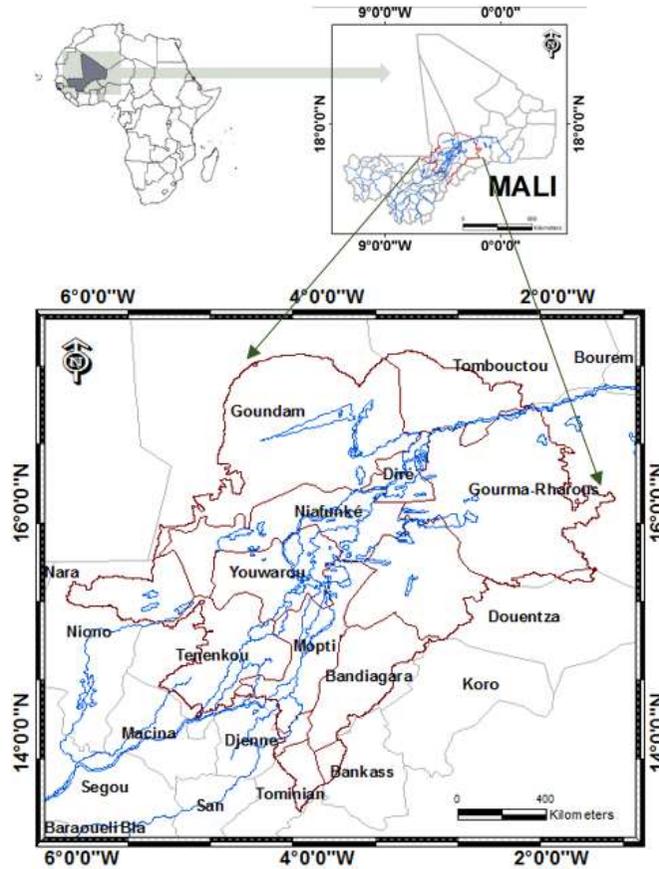


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude le Delta Intérieur du Niger (DIN)

II-2. Méthodes

Les méthodes de AD et du PST évaluent statistiquement le changement, le type et le processus de changement du TST ainsi que les effets du réchauffement terrestre sur l'environnement et les eaux souterraines. Comme le montre la *Erreur ! Source du renvoi introuvable.*, le niveau de pré-traitement comprend le découpage des données avec le contour de la zone d'étude suivi d'un filtrage des données MODIS à travers *l'Équation 1*) en degré Kelvin, puis la conversion en degré Celsius à l'aide de *l'Équation (2)*.

$$TST_K = DN_{(unit16)} * 0.02 \quad (1)$$

où, $TST(K)$ représente la température de la surface de la terre en degré Kelvin située dans la gamme 150-1310.7 (K) ; $D(unit16)$ Le nombre numérique représente l'ensembles de données scientifiques (scientific data sets-SDS) dans l'unité16 ; 0,02 représente le facteur d'échelle.

$$TST_C = (DN_{(unit16)} * 0.02) - 273.15 \quad (2)$$

où, TST_C Température de la surface terrestre en degrés Celsius ; $DN_{(unit16)}$.

Le nombre numérique représente les données SDS (ensembles de données scientifiques) dans unité16 qui multipliées par le facteur d'échelle 0,02 donnent une valeur comprise entre 150 et 1310,7 (K) [42]. Ensuite, Chaque image a été disséqué en 5 classes de température, du fait de la non-évolution de la distribution TST au-delà de 5 tranches. Autrement dit, le seuil de variation des classes sur lequel est bien détaillée la répartition du TST est limité à 5 classes (**Figure 5**). Cette technique regroupe les pixels des mêmes valeurs TST en K classes pour une distance minimale et égalise les intervalles des tranches TST. Du point de vue formel, la partition optimale C_k^* des observations en K classes est donc définie comme suit (**Équation 3**).

$$C_k^* = \underset{C \in C_k}{\text{Argmin}} \sum_{k=1}^K \sum_{i \in C_k} d^2(x_i, x_{C_k}) \quad (3)$$

où, C_k est l'ensemble des partitions possibles des observations en K classes ; d est la distance euclidienne ; x_{C_k} barycentre de chaque classe C_1, \dots, \dots, C_K .

- Ainsi, une prévision du TST moyen au cours des prochaines années jusqu'en 2100 a été déterminée par la régression linéaire établie suite à la relation année et TST moyenne. Sur la base de ces tranches de température, une analyse de la valeur intrinsèque du TST a été réalisée pour déterminer les anomalies de température produites au cours des dix-huit années.
- La méthode de l'arbre de décision est utilisée pour établir statistiquement le taux de changements de la TST et son état d'évolution. Cela inclut l'utilisation des tranches de température de chaque année et de la suivante.
- Une fois le processus établi, les taux de la matrice de transition pour chacune des tranches TST ont été calculés interannuellement.
- Et par la suite ont été déterminés les transformations spatiales responsables des changements dans la configuration de l'environnement, ainsi que leur cadence de séquence entre les tranches de température.
- Enfin, la matrice de transition, les transformations spatiales responsables ainsi que leur taux de séquence ont été utilisés pour analyser les effets du réchauffement terrestre sur les ressources en eau et l'environnement de la région.

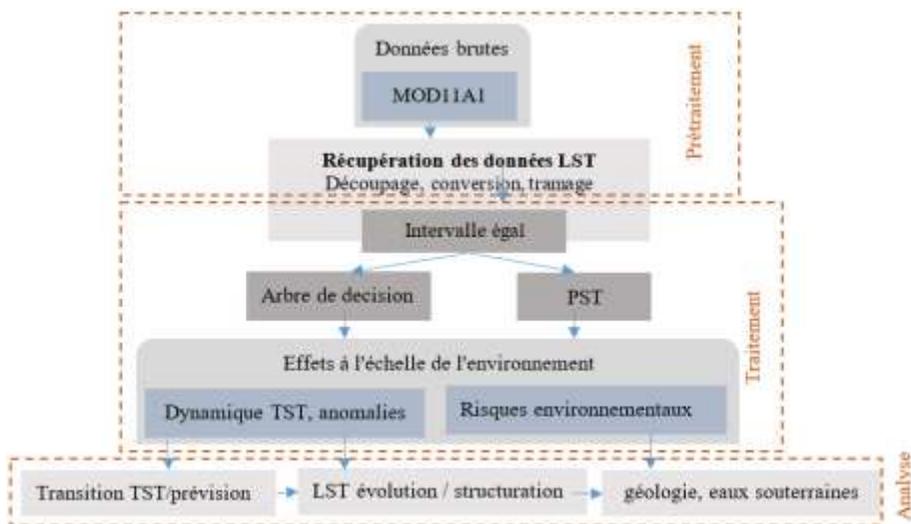


Figure 2 : Diagramme du processus méthodologique

III - RÉSULTATS ET ANALYSE

III-1. Analyse numérique du TST

III-1-1. Statut du TST en vue des surfaces

D'après l'évolution globale de la température sur la **Figure 3**, la TST augmente du sud-ouest au nord-est ce qui met en évidence certains endroits caractéristiques au sein des zones « Dunes-sableuses, argiles et latérites » dans la zone de Goundam [14, 29]. Certains de ces lieux caractéristiques situés dans les lacs faguibine, kanango et Gouber issus des travaux ultérieurs, ont déjà été marqués par des aléas volcaniques [15, 16]. Durant ces dix-huit années, les moyennes des tranches de températures maximales et minimales "43,00°C à 48,94°C et 19,21°C à 25,15°C" occupent les plus petites surfaces, tandis que les plus grandes surfaces sont occupées par la tranche de température "37,05 °C à 43,00 °C". Au centre des alluvions récentes a été détectée la tranche de température moyenne minimale "19,21°C à 25,15°C" en raison de l'existence des cours d'eau. Des tranches de température "25,15°C à 31,10°C et 31,10°C à 37,05°C " sont présentes en majeure partie sur les alluvions récentes principalement dans la partie végétale vers le sud de la zone d'étude.

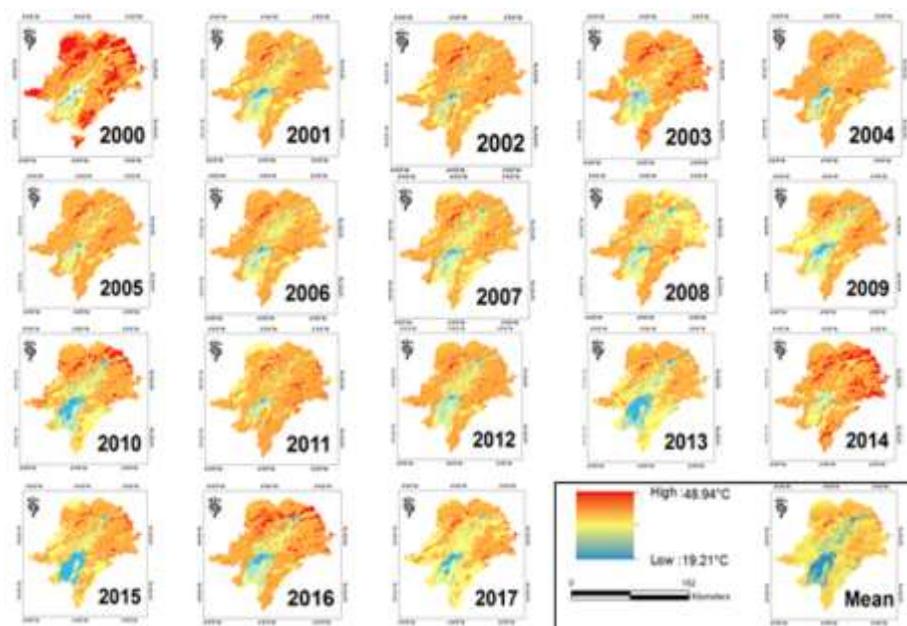


Figure 3 : *Changement de la température de surface des terres (TST) de 2000 à 2017*

La plus grande des zones d'occupation (79,19 %) a été observée sur l'année 2005 et occupée par la tranche "37,05 °C à 43,00 °C", tandis que la plus petite (0,21 %) occupée par les "19,21 °C à 25,15 °C" a été observé sur l'année 2014 (**Figure 5**). Durant cette période (2000 à 2017), l'année 2013 a enregistré les surfaces les plus chaudes avec 55,03 °C comme température maximale, tandis que la température minimale 8,33 °C a été enregistrée en 2000 (**Figure 4**). D'après les statistiques des surfaces moyennes, la tranche "37,05 °C à 43,00 °C" conserve la plus grande surface avec 64,59 %, tandis que les tranches minimales et maximales "19,21°C à 25,15 °C" et "43,00 °C à 48,94° C" occupent les surfaces les plus petites respectivement avec 2,02 % et 4,02 %, ce qui implique une extension de la désertification. Ainsi, la température moyenne augmente d'année en année avec une progression annuelle de 1,89°C, et en plus, la surface occupée par la tranche la plus élevée "43,00 °C à 48,94 °C" est passée de 25,60 % en 2000 à 1,51 % en 2017. Cela signifie de fortes transitions entre les surfaces des tranches locales de températures d'années différentes. Par conséquent, sur toutes les images au même endroit ont été observées certaines surfaces indiquant les zones les plus chaudes, comme le lac Faguibine.

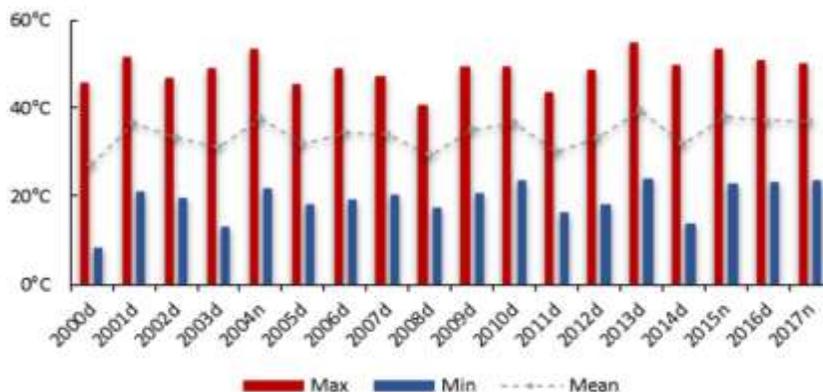


Figure 4 : Température de surface des terres sur la période (2000 - 2017), 2000d : décembre 2000 ; 2004n : novembre 2004

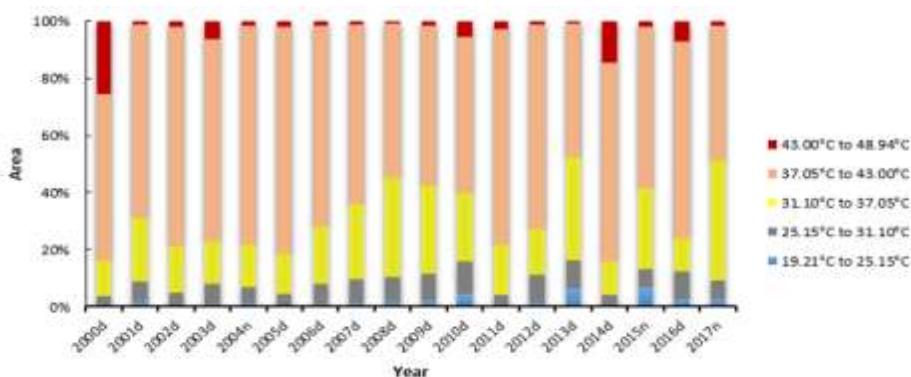


Figure 5 : Taux d'occupation des tranches de température sur la période 2000 à 2017. 2000d : décembre 2000 ; 2004n : novembre 2004

De 2000 à 2017, les anomalies sur les températures maximales et minimales indiquent une tendance aléatoire sur le Maximum de 2000 à 2008 ; et une tendance à la hausse de 2008 à 2017 (**Figure 6**). La décennie 2008 à 2017 a été la plus chaude avec une élévation de température considérablement accélérée et a tendance à être continue. Considérant les températures moyennes aux niveaux de chaque année tout au long de la période 2000-2017, il convient de noter que la hausse des températures minimales a été plus rapide et plus régulière que la hausse des températures maximales qui s'est avérée ralentie par ses variations aléatoires.

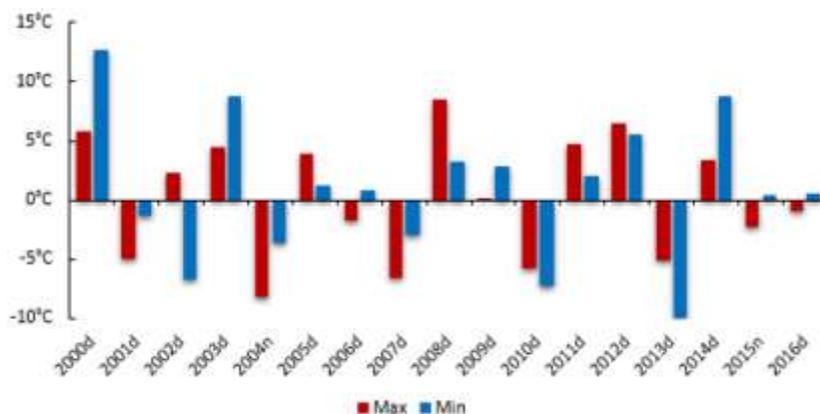


Figure 6 : Anomalies annuelles moyennes de température minimale et maximale

III-1-2. Progression des tranches de température à l'échelle environnementale

L'évolution de la TST entre 2000 et 2017 montre une diminution de l'étendue de la surface des tranches de température les plus élevées en même temps une augmentation de la température maximale. En effet, les tranches maximales « 37,05 °C à 43,00 °C et 43,00 °C à 48,94 °C » qui, en 2000, étaient les matrices dominantes de l'environnement respectivement avec 25,60 % et 58,11 % (**Figure 7**), ont subi une régression respectivement de -0,64 % et -1,24 % vers le nord. En revanche, la tranche « 31,10 °C à 37,05 °C » a connu une forte augmentation spatiale sur la même période, passant de 12,72 % de la superficie totale enquêtée en 2000 à 42,25 % en 2017, soit une augmentation annuelle respective de 1,74 % qui en fait la matrice dominante en température de l'environnement. Les surfaces totales des tranches minimales "19,21°C à 25,15°C et 25,15°C à 31,10°C" ont connu de légères augmentations spatiales de 0,44 % et 3,14 % respectivement jusqu'à 2,57 % et 6,47 % sur la même période (2000 à 2017), avec un taux d'accroissement annuel de 0,13 % et 0,20 % de ces tranches minimales respectives. Globalement, les plages de hautes températures se sont réduites au profit des tranches moyennes et basses. Cela montre une ouverture des tranches moyennes dans la région ; donc l'effet se fera sentir dans le futur.

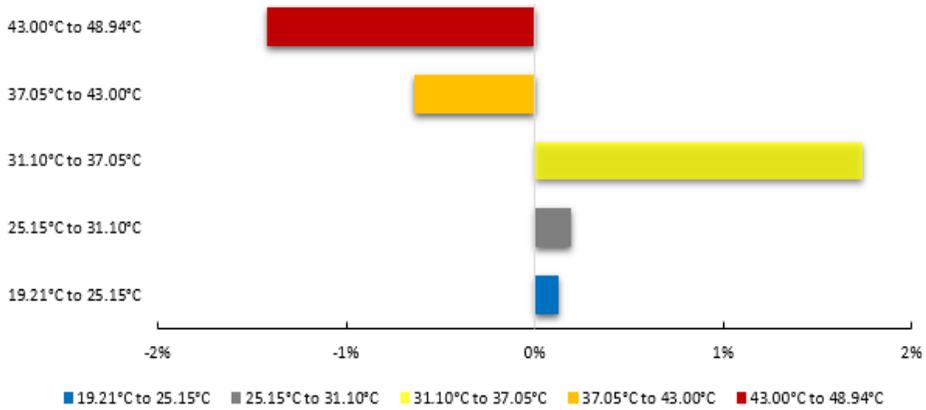


Figure 7 : Taux d'évolution annuel moyen des tranches de température de 2000 à 2017

La **Figure 8a** montre la force de liaison établie par la corrélation entre années et TST moyenne. Bien que la force de liaison entre ces entités soit faible, il est possible d'utiliser les relations établies par l'équation de régression linéaire pour prédire le TST de la zone d'étude en fonction des années. Comme montre la **Figure 8b**, toutes les observations sont dans la norme avec une valeur absolue de résidus standardisés inférieure à 2. Compte tenu de l'intervalle de 5 ans, la température moyenne attendue de 2020 à 2100 a été calculée dans le tableau 5.1 via l'équation linéaire (**Équation 4**). La variabilité de son TST moyen s'élève à 2,85°C.

$$TST\ moyenne\ ^\circ C = -523.69451 + 0.27770 * \text{année}; \quad R^2 = 0.1902 \quad (4)$$

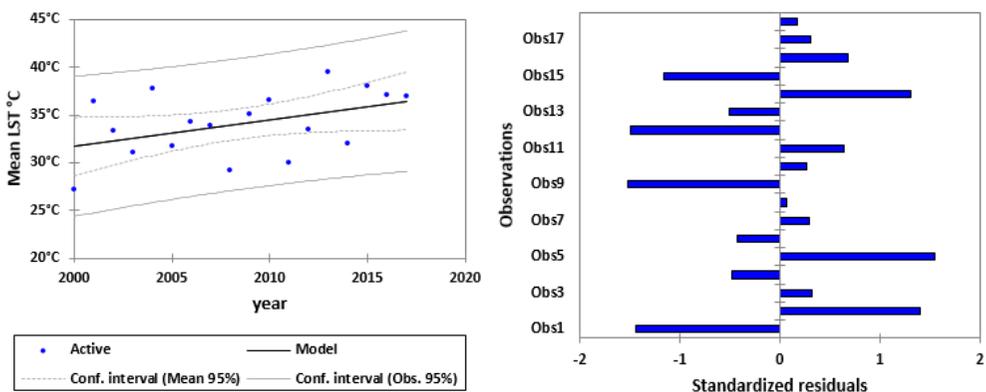


Figure 8 : (a) Relation entre TST moyenne et années, (b) Résidus standardisés à l'intérieur de la norme

Tableau 1 : Les valeurs de la moyenne TST attendues pour les années à venir de 2020 à 2100

Année	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060	2065	2070	2075
T °C	37.26	38.65	40.04	41.43	42.82	44.21	45.60	46.98	48.37	49.76	51.15	52.54
Année	2065	2070	2075	2080	2085	2090	2095	2100				
T °C	49.76	51.15	52.54	53.93	55.31	56.70	58.09	59.48				

III-2. Effets du changement TST sur l'environnement

Le réchauffement terrestre affectant la région induit des effets néfastes sur l'environnement et les ressources en eau. Par conséquent, la transition ou le changement du réchauffement terrestre entre les différents secteurs de la région a été évaluée ci-dessous.

III-2-1. Transition de la température de la surface terrestre (TST)

Considérant la TST transitée, par évaluation des surfaces des tranches de température entre chacune des années de l'an 2000 à l'an 2017, 42,03 % de 58,11 % des surfaces occupées par la quatrième tranche de température « 30,93° à 38,46 ° » en 2000 sont restées intactes dans la quatrième tranche « 39,5°C à 45,65 °C » en 2001, tandis que 0,05 % de « 30,93 °C à 38,46 °C » en 2000 sont convertis en « 45,65 °C à 51,81 °C » (tranche maximale de 2001), puis 0,34 % et 15,39 % ont été entièrement convertis respectivement en « 27,19°C à 33,34°C et 33,34°C à 39,5 °C » en 2001 (**Tableau 2** et suite). Enfin, les tranches minimales « 8,33 °C à 15,86 °C » de 2000, avec un taux de permanence de 0,28 % dans les tranches minimales de 2001 « 21,03 ° à 27,19 ° », constituent les tranches les moins stables du milieu. La période de 2000 à 2001 est caractérisée par trois grands types de dynamiques: une stabilité (50,60 % de l'espace), une dynamique de rétrécissement des basses températures (46,37 % de l'espace), et une ouverture des Hautes températures (2,63 %) exprimant des degrés variables (« 8,33 °C à 15,86 °C » en « 27,19 °C à 33,34 °C » : 0,15 % ; « 15,86 °C à 23,39 °C » en « 33,34 °C à 39,5 °C » et « 39,5 °C à 45,65 °C » : respectivement 0,45 % et 0,02 %, « 23,39 °C à 30,93 °C » en « 39,5 °C à 45,65 °C » : 1,96 %. Ces dynamiques sont également observées sur l'ensemble des dix-huit années de 2000-2001 à 2016-2017, mais dans des proportions différentes (**Tableau 2** et suite en annexe), déterminant ainsi une transition assez forte de la tranche de température moyenne et au-delà de 2000 vers la moyenne des tranches de température moyennes et au-delà. Ainsi de suite sur l'année suivante jusqu'en 2017. A l'échelle globale de l'étude (de 2000 à 2017) (**Tableau 2** et suite en annexe) sans passer par les années intermédiaires, la tranche "30,93 ° à 38,46 ° " a diminuée d'environ 0,16 % au profit de la tranche maximale " 44,88 °C à 50,15 °C " de 2017. En effet, sur les

58,11 % des surfaces occupées par la tranche "30,93 °C à 38,46 °C " en 2000, 26,67 % sont restés intacts avec la tranche "39,61 ° à 44,88 ° " de 2017 ; 30,50 % sont devenus la tranche "34,33 °C à 39,61 °C " et 0,53 % ont été complètement convertis en « 29,06 °C à 34,33 °C ». La proportion de la portion « 23,39 ° à 30,93 ° » de 2000 est passée de 12,72 % à 58,08 % de la tranche « 34,33 ° à 39,61 ° », soit une augmentation de 64,88 %. Cette tranche "34,33 °C à 39,61 °C " est désormais la nouvelle matrice d'un TST auparavant dominé par la tranche "30,93 °C à 38,46 °C ". La même tendance progressive est observée dans la tranche "15,86 °C à 23,39 °C " de 2000 avec un taux de 7,05 % au détriment de tranches minimales. En effet, sur les 58,08 % de la superficie occupée par la tranche « 34,33 °C à 39,61 °C » en 2006, 30,50 % provenaient de la tranche « 30,93 °C à 38,46 °C » et 20,21% provenaient de la tranche maximale « 38,46 °C à 45,99 °C » en 2000. Sur la même période, 35,03 % des zones n'ont pas changée de classe (stabilité), tandis que 1,84 % des zones ont évolué en termes de reconstitution de la tranche maximale par un processus d'augmentation de température, et 62,77 % des zones ont subi une modification des tranches TST. L'augmentation de la température devient le phénomène le plus important avec un rétrécissement de la zone des tranches maximales "44,88 °C à 50,15 °C " de l'année 2017 et un élargissement de la zone de la tranche "39,61 °C à 44,88 °C ". À partir de ces taux des températures transités, a été observée une transition considérable entre 2000 et 2017, c'est-à-dire de la plage de température moyenne et au-delà (en l'an 2000), à la plage de température moyenne et au-delà (en l'an 2017). Des deux formes de transition de température observées, il est déterminé dans l'ensemble une forte transition dans la tranche de température moyenne et au-delà, de l'an 2000 vers l'an 2017. Ainsi le réchauffement s'étend sur plus de la moitié de la région.

III-2-2. Etat d'évolution du TST et la dynamique de la structure spatiale

À partir des deux images de 2000 et 2001, il a été déterminé entre les années 2000 et 2001, que la tranche de température maximale moyenne "43,00°C à 48,94°C" a subi une diminution du nombre de taches parallèlement à une diminution de la superficie totale (**Tableau 5** et suite en annexe). Sur la base de la technique de l'arbre de décision regroupant les évolutions suivantes, le processus de transformation dominant de cette tranche "43,00°C à 48,94°C" a connu une attrition (disparition de taches). La diminution du nombre de taches est associée à une très forte diminution qui apparaît dans la zone de la tranche maximale. En revanche, la création de nouvelles taches est le processus de transformation dominant dans les tranches de température moyenne « 19,21 °C à 25,15 °C », « 25,15 °C à 31,10 °C », « 31,10 °C à 37,05 °C » et "37,05 °C à 43,00 °C", avec une augmentation du nombre de taches mais aussi de la surface totale sur cette période (**Tableau 5** et suite en annexe). Entre les années 2001 et 2002, le processus d'attrition est observé dans les tranches "19,21 °C à

25,15 °C", "25,15 °C à 31,10 °C" et "31,10 °C à 37,05 °C", tandis que le processus de création a concerné les tranches "37,05°C à 43,00°C" et "43,00°C à 48,94°C", l'augmentation du nombre de taches en 2001 s'accompagnant d'une augmentation de la surface totale de ces tranches. Quant aux tranches minimales ("19,21°C à 25,15°C" et "25,15°C à 31,10°C") et à la tranche maximale "43,00°C à 48,94°C", la diminution du nombre de taches et de la surface en 2003 par rapport à 2002, suggère un processus d'attrition des taches. Par conséquent, durant toute la période de 2000 à 2017, les processus de transformation spatiale (PST) sont également observés avec une séquence de création et d'attrition de taches mais dans des proportions différentes (**Tableau 5** en annexe). En résumé, les processus de transformation spatiale dominants constituent 53,33 % de la création de taches (formation de nouvelles taches) contre 46,66 % d'attrition de taches exprimée à différents niveaux (**Figure 9**). Ainsi, les tranches de température maximales "43,00°C à 48,94°C" ont subi plus de disparition des taches (attrition) de 7,78 % jusqu'à 12,22 % d'où le rétrécissement de sa surface jusqu'à 4,02 %. Ainsi, l'influence de certains secteurs est constatée sur les valeurs LST au niveau des tranches de température maximale « 43,00°C à 48,94°C ». Les plages de températures minimales ont gagné plus d'espace au détriment de la tranche maximale en créant de nouvelles taches. Plus les zones occupées par la plage de température maximale sont restreintes, plus l'espace est ouvert pour les plages de température minimales jusqu'à la moyenne avec une augmentation de la température au niveau de ces espaces. D'où la propagation et l'imposition des effets néfastes du changement climatique sur l'environnement et dans notre cas sur les ressources en eau.

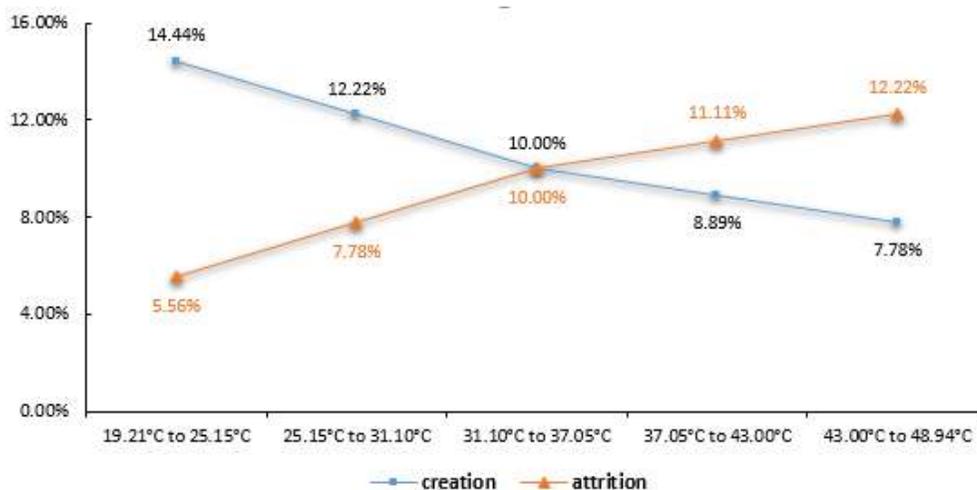


Figure 9 : Évolution des processus de transformation spatiale (PTS)

III-2-3. L'impact de la variabilité climatique sur le régime hydrologique

Le niveau de crue maximum à partir de la relation entre les débits mensuels moyens mesurés à Koulikoro a été calculé de 1923 à 2005 [30, 31]. Sur la base des mesures quotidiennes du niveau d'eau, la région de Mopti reçoit le pic de la crue en 1929, puis Akka et Dire vers 1957. De là, une baisse progressive du niveau d'eau jusqu'en 1984 (année sèche catastrophique) est observée, ce qui réduit la superficie inondée au cours des années qui ont précédé de 78000 km² à 22000 km². Entre 1994 et 2012, les crues maximales n'ayant jamais atteint les pics précédents, varient de manière très aléatoire avec de légères régressions des niveaux de pointe [32, 33]. Les situations de crue maximale sont revenues aux alentours des années 70 au début de la sécheresse jusqu'à 1993, mais restent plus précoces que pendant les années plus humides avant 1970 (au moins 1,5 mois) [34 - 36]. Le volume cumulé à la sortie (exutoire) du DIN en région de Diré durant la période du 1er juin 2015 au 30 avril 2016, est de 27,79 109 m³. Ce volume est supérieur à celui de 2014/2015 (25,74 109 m³) et inférieur à celui de 2013/2014 (32,87 109 m³) et à celui de la moyenne statistique de 1924 à 2012 (30,38 109 m³) [37]. L'effet du réchauffement terrestre représente l'un des facteurs potentiels de la baisse du niveau d'eau dans les différents secteurs, il s'observe également sur la **Figure 10** et les statistiques du TST à travers la variation progressive de ses valeurs.

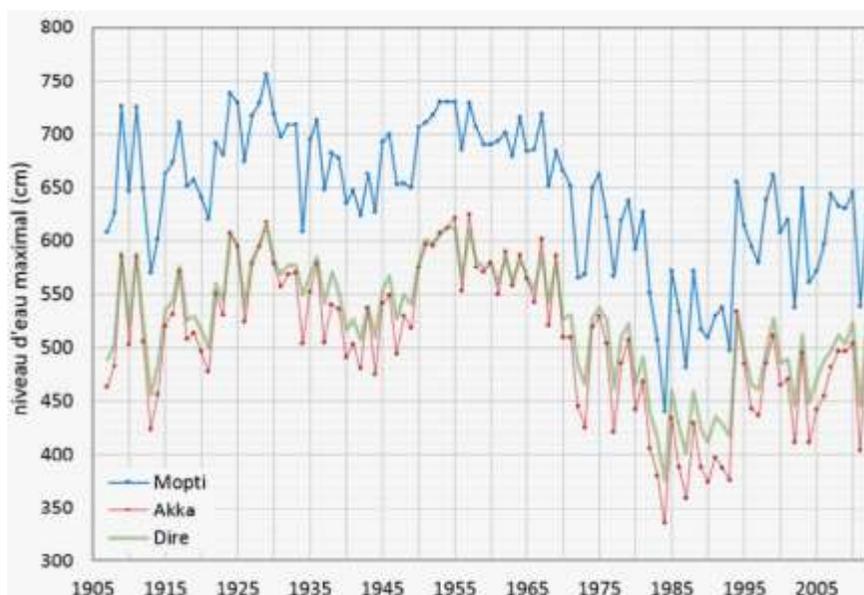


Figure 10 : La variation annuelle du niveau d'eau maximal dans le delta intérieur du Niger (Source : L. Zwarts, F. S. Hoekema, 2013)

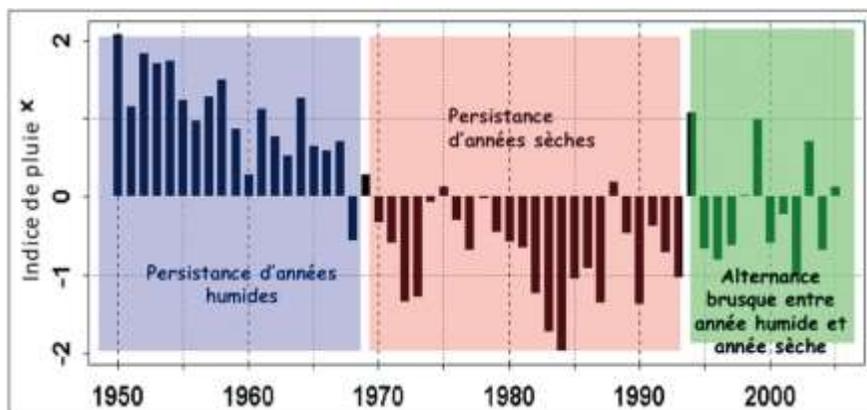


Figure 11 : *Indice de pluie (IPS) du Sahel (période 1950-2006)*
(Source : bulletin spécial CILLS/AGRHYMET)

III-2-4. Caractérisation des aquifères et des eaux souterraines en vue du réchauffement terrestre

La caractéristique TST par la forme est en outre construite sur la base d'une modélisation continue et lisse. La **Figure 10 a** illustre le format 3D de la moyenne de dix-huit (18) ans. La morphologie de la modélisation est bien décrite sur la géologie (lithologie) [29, 38]. Les valeurs TST moyennes diversifiées de « 19,21°C à 48,94°C » montrent à partir de la géologie et de la configuration paysagère une caractérisation appréciable (**Figure 10b**) des formes morphologiques (concave, crête et plat). Les trois régions numérotées ont révélé que les valeurs TST des zones les plus chaudes sont représentées par les crêtes des montagnes (les plus élevées), tandis que les températures les plus basses sont illustrées par des cavités concaves, et suivies des températures moyennes qui sont illustrées par des formes plates. En conséquence, la modélisation de la première région se présente sous une forme concave pour le plan d'eau et entouré d'une zone humide (températures les plus basses) (**Figure 10a**). Cet ensemble d'eaux et alentours se situe entre "19,21°C à 31,10°C" et se localise sur les aquifères superficiels qui sont des formations récentes d'alluvions (**Figure 10b**). Ces aquifères renfermant la stratigraphie quaternaire, jouent alors un rôle d'infiltration important du fait de sa non consolidation [39, 40]. Bien que la diversification de la géologie influence également les valeurs du TST, la zone de mise en évidence de la tranche à basse température de la région concave augmente à mesure que la masse d'eau diminue en raison des effets du réchauffement climatique. La deuxième région se présente comme une partie plate entre "31,10 °C à 43,00 °C" principalement au sud-ouest dans l'arrangement des alluvions anciennes et des formations terminales continentales, au sud-est dans la stratigraphie tabulaire/pliée

précambrien et à une petite partie au nord sur les dunes et la zone sablonneuse. Ils sont dotés de réserves d'eau d'un autre milieu à travers des fissures profondes, de sorte que ces aquifères reçoivent plus de forages que tout autre système d'aquifère et se situent pour la plupart dans la partie Sud-Est [29]. La troisième région révèle une morphologie de crête représentant la tranche de température la plus élevée comprise entre "43,00°C et 48,94°C" et la plus grande partie est située dans la partie nord de la zone d'étude. Ces zones sont occupées par des aquifères généralisés dans la lithologie des dunes mixtes, sableuses, argileuses et latéritiques. Ils sont caractérisés par la perméabilité des types intergranulaires et par un aquifère continu et contiennent une énorme quantité d'eau souterraine en réserve [41].

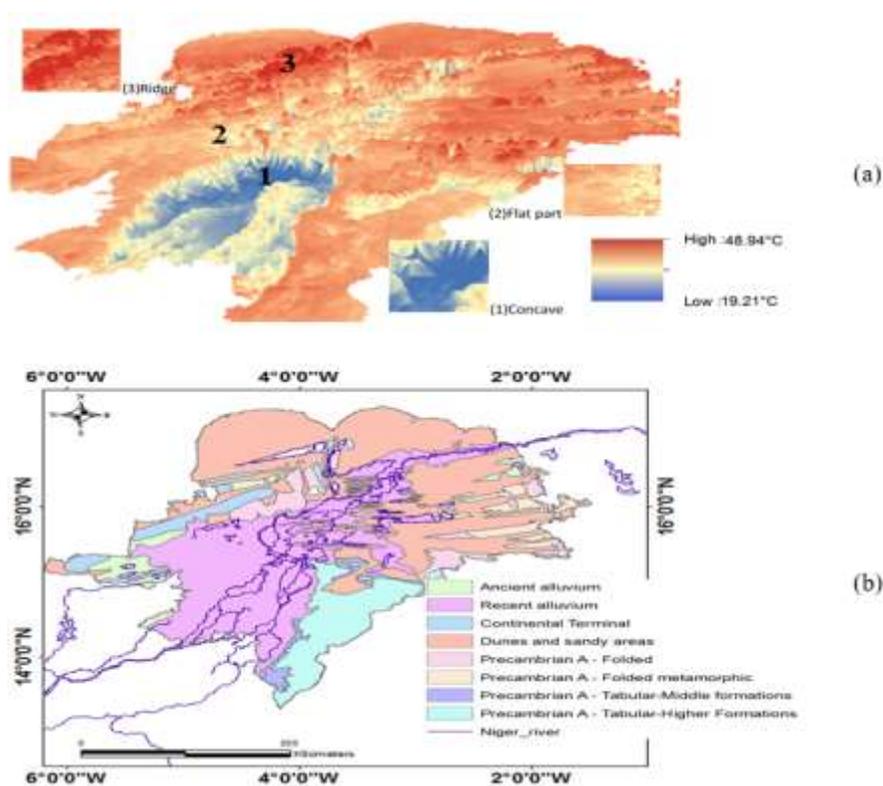


Figure 12 : (a) Modélisation du LST moyen et (b) La lithologie (Dembélé, et al, 2017)

Tous ces systèmes aquifères, continuent aujourd'hui à recevoir davantage de forages pour compenser les besoins en ressources en eau dus à l'exploitation intensive des nappes phréatiques et à la diminution ou l'assèchement des sources d'eau (Lac Korientzé, Lac Débo, Lac Takara, Lac Niangay, Do lac, lac Garou, lac Haribongo, lac Kabara, lac Tanda, lac Gouber, lac Fati, lac Horo,

lac Tele, lac Kamango et lac Fiquibine) par l'effet du réchauffement terrestre. Ensuite, ce phénomène de continuité du réchauffement terrestre tend à augmenter les besoins en ressources en eau en affectant les différents systèmes aquifères existant dans la zone d'étude.

- ***Vulnérabilité des zones en vue du réchauffement terrestre***

L'un des axes prioritaires des gestionnaires est d'évaluer le stress climatique entraînant l'abaissement du niveau des aquifères dû à l'exploitation croissante de la ressource en considérant les conditions climatiques extérieures. D'après des études de l'observatoire du Sahara du Sahel (OSS) en 2017, l'abaissement du niveau de la nappe menacé par une accélération significative des vues sur le réchauffement climatique fait apparaître différentes zones vulnérables dont certaines en danger **Figure 11**. L'attention portée à la prise en charge de ces zones doit être davantage surveillée car elles définissent les zones prioritaires pour la gestion de l'eau. Globalement, le système d'aquifère d'Ilullemeden-Taoudéni / Tanezrouft (SAIT) reste très peu vulnérable à plus de 80 % à la baisse des niveaux piézométriques [41]. Considérant les statistiques générées dans la zone d'étude tel qu'illustré à la **Figure 12**, 33,82 % de la zone est considérée comme peu vulnérable et se situe majoritairement dans la partie nord-ouest de la zone d'étude. Les zones vulnérables détectées au centre dans le sens sud-nord occupent 26,34 %, puis 24,94 % de la surface est occupée par les zones très vulnérables, dont la plupart sont à l'est, et les zones moyennement vulnérables occupent 5,44 % de la surface **Figure 12**.

Enfin, les zones à forte vulnérabilité (0,62 %) et les zones à très faible vulnérabilité (2,94 %) se situent respectivement dans la partie sud-ouest et la partie est de la zone d'étude. La zone s'étendant de la zone "vulnérable" à la zone "très vulnérable" apparaît surexploitée par la population en raison du réchauffement climatique, alors que les zones moins vulnérables et les zones de faible vulnérabilité avec une occupation moins peuplée apparaissent suffisamment préservées de cette vulnérabilité. Ainsi la variation des niveaux des nappes phréatiques face au changement climatique du point de vue pluviométrique, a montré par le Projet (Observatoire du Sahara et du Sahel) de 2017 qu'une diminution exceptionnelle des précipitations a été observée depuis la fin des années 1950 et au cours des trois dernières décennies de la période 1961 à 2004 [42, 43]. Les isohyètes de la normale 1981-2010 se caractérisent par une légère remontée vers le Nord-Est par rapport à la normale 1961 - 1990 [41]. Ainsi, sous l'effet du réchauffement terrestre entraînant, d'une part la diminution des précipitations et d'autre part, l'exploitation intensive des nappes phréatiques, la vulnérabilité des ressources en eaux souterraines dans la zone d'étude se font de plus en plus ressentir à l'est et centre en particulier autour du fleuve Niger.

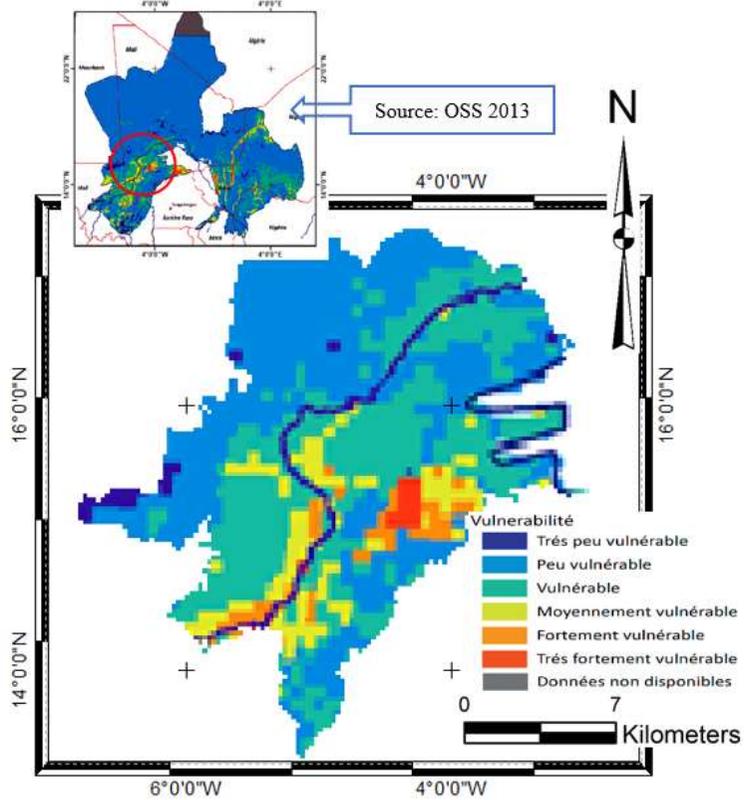


Figure 13 : Zones vulnérables en eau du au réchauffement terrestre

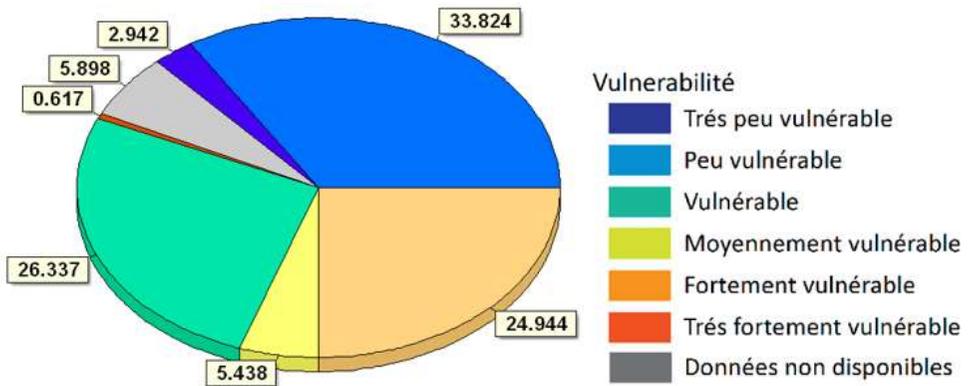


Figure 14 : Statistiques de vulnérabilité des eaux souterraines pour la zone d'étude

IV - DISCUSSION

Le réchauffement terrestre est une menace potentielle pour la planète et fait de la recherche l'objet d'un champ pluridisciplinaire. Les méthodes d'investigation sur le réchauffement occupent une place importante. Nombreuses études ont utilisé l'arbre de décision (AD) pour étudier le paysage de l'environnement [47 - 49]. De même, des études antérieures se sont concentrées sur l'utilisation de la représentation de visualisation spatiale du réchauffement terrestre pour évaluer leurs changements. Cependant les statistiques et les caractérisations font défaut de ces études. Pour cela, nous proposons la méthode de l'AD et celle du processus de transformation spatiale (PTS) pour traiter et analyser le changement de la TST sur l'environnement et les résultats sont utilisés pour évaluer les effets du réchauffement sur les ressources en eaux souterraines. Comparées aux méthodes d'analyse de la TST effectuées dans les études antérieures, nos méthodes mettent en évidence d'importants mécanismes de relations. Ces mécanismes de relations permettent d'évaluer statistiquement avec plus de détails les changements du TST à savoir : L'occupation des surfaces par les tranches TST, le taux transition TST (*Figure 2*), l'état de l'évolution du TST (*Figure 3*), la dynamique structurelle du LST (voir sections III.2.1) et enfin estimer et caractériser les effets sur l'environnement et les ressources en eaux souterraine.

Sur les dix-huit années, les surfaces les plus petites sont occupées par les tranches de températures maximales " $43,00^{\circ}\text{C}$ à $48,94^{\circ}\text{C}$ (4,02 %) et $19,21^{\circ}\text{C}$ à $25,15^{\circ}\text{C}$ (2,02 %)", tandis que les plus grandes surfaces sont occupées par la tranche de température " $37,05^{\circ}\text{C}$ à $43,00^{\circ}\text{C}$ " (64,59 %). D'où l'extension d'un réchauffement graduel provoquant la désertification. De plus la progression annuelle de la TST est de $1,89^{\circ}\text{C}$ avec un passage de la tranche maximale " $43,00^{\circ}\text{C}$ à $48,94^{\circ}\text{C}$ " de 25,60% en 2000 à 1,51 % en 2017. Cela signifie de fortes transitions entre les surfaces des tranches locales de températures d'années différentes. Dans l'ensemble, 53,33 % de création de taches contre 46,66 % d'attrition de tache constituent le PTS. La disparition des taches (attrition) sur la moyenne des tranches de température maximale de 7,78 % à 12,22 % entraîne une diminution de sa surface jusqu'à 4,02 %. Compte tenu de l'évolution de la température entre les années, une dynamique de tendance aléatoire sur la période 2000-2008 et une tendance à la hausse sur la période 2008-2017 a été observée. Une prédiction jusqu'à 2100 du TST moyen a été déterminée sur la base d'une régression linéaire donnant un taux de croissance de $2,85^{\circ}\text{C}$ tous les 5 ans. Globalement, la période de 2000-2001 à 2016-2017 a été caractérisée par trois grands types de dynamiques de température : la stabilité (50,60 % de l'espace), une dynamique de rétrécissement des basses températures (46,37 % de l'espace), et une ouverture de températures élevées

(2,63 %) s'exprimant à des degrés divers (voir section III.2.1). Suite à l'efficacité de nos méthodes, ces détails nous permettent de caractériser le paysage géologique en fonction de l'état de réchauffement terrestre (*Figure 10*). Ils sont également utilisés pour estimer la vulnérabilité des ressources en eau due à l'exploitation intensive des ressources en eaux souterraines sous les effets du réchauffement terrestre (*Figure 12*).

V - CONCLUSION

La présente étude met en évidence la pertinence des méthodes de l'arbre de décision (AD) et le processus de transformation de surfaces (PTS) dans l'analyse et la caractérisation du réchauffement terrestre. Ces méthodes ont profondément résolu le problème de pouvoir analyser et de caractériser le réchauffement terrestre. La fiabilité des méthodes de l'AD et de la PTS dans l'étude de la température des surfaces terrestres (TST) est vérifiée par les différents mécanismes de relations appliquées. À travers l'AD ont été déterminés :

- l'occupation surfacique des tranches de températures
- le Taux de transition des quantités de réchauffement et la prévision de la TST

Suite à l'application de la PTS ont été déterminés également :

- le processus spatial responsable des changements dans la configuration du réchauffement de l'environnement
- la progression de la TST dans la zone
- l'état d'évolution de la TST

Les caractéristiques combinées de l'arbre de décision AD et de la PTS déterminent les effets du réchauffement sur l'environnement et ses ressources en eaux souterraines. Comparer aux méthodes d'autres études d'investigation sur le réchauffement, nos méthodes analysent en profondeur et efficacement le réchauffement terrestre en étudiant le Taux de changement et l'état d'évolution du TST ainsi que d'en estimer et d'en caractériser les effets du réchauffement sur l'environnement et ses ressources en eaux souterraines.

RÉFÉRENCES

- [1] - D. W. HILLGER and J. D. CLARK, “Principal Component Image Analysis of MODIS for Volcanic Ash. Part I : Most Important Bands and Implications for Future GOES Imagers,” *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 41, N° 10 (2002) 985 - 1001 p., doi: 10.1175/1520-0450(2002)041<1003:PCIAOM>2.0.CO;2
- [2] - C. C. and S. COMMITTEE, “Climate Change and Resource Sustainability An Overview for Actuaries Climate Change and Sustainability Committee,” *Can. Inst. Actuar.*, N° August (2015) 9 p.
- [3] - D. W. HILLGER and J. D. CLARK, “Principal Component Image Analysis of MODIS for Volcanic Ash. Part II : Simulation of Current GOES and GOES-M Imagers,” *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 41, N° 10 (2002) 1003 - 1010 p., doi: 10.1175/1520-0450(2002)041<1003 : PCIAOM>2.0.CO;2
- [4] - W. C *et al.*, “Influence of Urban Heating on the Global Temperature Land Average Using Rural Sites Identified from MODIS Classification,” *Geoinformatics Geostatistics An Overv.*, Vol. 1, N° 2 (2013) 1 - 6, doi: 10.4172/gigs.1000104
- [5] - K. M. ARCHIE, R. CHAPMAN and S. FLOOD, “Climate change response in New Zealand communities : Local scale adaptation and mitigation planning,” *Environ. Dev.*, Vol. 28, N° August (2017-2018) 19 - 31, doi: 10.1016/j.envdev.2018.09.003
- [6] - A. FRANGOU, R. J. LADLE, A. C. M. MALHADO and R. J. WHITTAKER, “Wildlife in a Warming World,” *A World Sci.*, Vol. 8, N°1 (2010) 2 - 9 p., doi: <http://dx.doi.org/>
- [7] - D. COUMOU, A. ROBINSON and S. RAHMSTORF, “Increase of record-breaking extremes in a warming world,” *8ième Congr. Int. AEC*, N° August (2015) 1 - 50 p.
- [8] - World Meteorological Organization, “The global climate 2011-2015: heat records and high impact weather,” *World Meteorological Organization website*, (2016)
- [9] - O. WEBER *et al.*, “The Global Risks Report 2016 11th Edition,” *World Econ. Forum*, N° (2016) 1 - 103 p., doi : 10.1017/CBO9781107415324.004
- [10] - world World Economic Forum-Committed to improving the state of the, “The Global Risks Report 2018 13th Edition,” *Natl. Univ. Singapore Oxford Martin Sch. Univ. Oxford Whart. Risk Manag. Decis. Process. Center, Univ. Pennsylvania*, N° (2018) 1 - 80 p., [Online]. Available : <http://www.mmc.com/content/dam/mmc-web/Global-Risk-Center/Files/the-global-risks-report-2018.pdf>

Annexes

- [11] - WEF and A. COLLINS, "The Global Risks Report 2019 14th Edition Insight Report," N° (2019) 80 p., [Online]. Available : http://wef.ch/risks2019%0Ahttp://wef.ch/risks2017%0Ahttp://wef.ch/risks2019%0Ahttp://www3.weforum.org/docs/WEF_GRR18_Report.pdf%0Ahttps://www.weforum.org/reports/the-global-risks-report-2018%0Ahttp://www3.weforum.org/docs/WEF_GRR18_Report.pdf%0Ahttp://www
- [12] - B. MAO, K *et al.*, "Global surface temperature change analysis based on MODIS data," *Adv. Sp. Res.*, Vol. 59, N° (2017) 503 - 512 p.
- [13] - M. FRIESE, "L ' adaptation au changement climatique: L ' exemple du Lac Tele (Adaptation to climate change : The example of Lac Tele)," *Bamako*, N° (2011) 1 - 100 p.
- [14] - A. INGER, O. DIONE, M. JAROSEWICH-HOLDER and J.-C. OLIVRY, "Le Bassin du fleuve Niger Vers une vision de developpement durable (The Niger River Basin Towards a vision of sustainable development)," *Banq. Mond.*, N° (2006) 1 - 172 p.
- [15] - T. EL ABBASS *et al.*, "Arguments géophysiques et géologiques en faveur de manifestations volcaniques récentes dans la région du lac Faguibine (Mali) (Geophysical and geological arguments in favor of recent volcanic manifestations in the region of Lake Faguibine (Mali))," *Géodynamique*, Vol. 316, N° 2 (1993) 1303 - 1310 p.
- [16] - H. SVENSEN, D. K. DYSTHE, E. H. BANDLIEN, S. SACKO, H. COULIBALY and S. PLANKE, "Subsurface combustion in Mali: Refutation of the active volcanism hypothesis in West Africa," *Geology*, Vol. 31, N°7 (2013) 581 - 584 p., doi : 10.1130/0091-7613(2003)031<0581:SCIMRO>2.0.CO;2
- [17] - R. CHUDEAU, "La dépression du Faguibine (Faguibine Depression)," *Ann. Géographie*, t. 27, N°145 (1918). doi <https://doi.org/10.3406/geo.1918.4154>, N° (2018) 43 - 60 p.
- [18] - L. ZWARTS, P. VAN BEUKERING, B. KONE and E. WYMENGA, "The Niger, a lifeline," *Wetl. Int.*, (2005) 1 - 169 p.
- [19] - L. VILLATTE, "Chapitre II Evolution des rôles , fonctions et usages du lac Faguibine selon la variabilité de la ressource hydraulique (Chapter II Evolution of the roles, functions and uses of Lake Faguibine according to the variability of the hydraulic resource)," http://cari.asso.free.fr/Fichiers/Lac%20Faguibine/chapitre%20II-1_p30-41.pdf, N° (1973) 30 - 41 p.
- [20] - A. MARZOUKI and M. LAYELMAM, "Apport des images MODIS dans l ' analyse et suivie du phéno mène de la désertification dans les hauts plateaux de l ' oriental (Contribution of MODIS images in the analysis and monitoring of the phenomenon of desertification in the high plateaus of the eas)," *Univ. Mohammed Prem. - Oujda Fac. des Lettres des Sci. Hum.*, (2014) 1 - 37 p., doi : 10.13140/2.1.3594.4327

- [21] - J. AGUILAR-LOME, R. ESPINOZA-VILLAR, J. ESPINOZA, J. ROJAS-ACUÑA, B. LEO and W. LEYVA-MOLINA, "Elevation-dependent warming of land surface temperatures in the Andes assessed using MODIS LST time series (2000 – 2017)," *Int J Appl Earth Obs Geoinf.*, Vol. 77, N° January (2019) 119 - 128 p., doi : 10.1016/j.jag.2018.12.013
- [22] - C. RES, M. HULME, R. DOHERTY, T. NGARA, M. NEW and D. LISTER, "African climate change : 1900 – 2100," *Clim. Res.*, Vol. 17, N° (2001) 145 - 168 p.
- [23] - C. CENSIER, J. C. OLIVRY and J. P. BRIQUET, "Les apports detritiques terrigenes dans la cuvette lacustre du niger entre mopti et kona (republique du mali)," *Gd. Bassins Fluviaux, Paris*, N° (1993) 305 - 315 p.
- [24] - C. PIQUET, "Géodynamique d'un hydrosysteme tropical peu anthropisé le bassin supérieur du Niger et son delta intérieur (Geodynamics of a tropical hydrosystem with little anthropisation of the upper Niger basin and its inner delta)," *Univ. Montpellier II "Sciences Tech. du Languedoc,"* N° (2004) 1 - 470 p.
- [25] - M. THIBAUT, "Modelisation Hydrodynamique couplee 1D-2D du delta Interieur du fleuve Niger," N° (2013) 1 - 41 p.
- [26] - D. TINE *et al.*, "Contribution of Sentinel-2/Landsat-8 OLI Images to Extracting Vegetation Cover and Wetlands Area in Urban Zones: Case of the Dakar Region (Senegal)," *J. Geogr. Inf. Syst.*, Vol. 13, N°04 (2021) 523 - 537 p., doi: 10.4236/jgis.2021.134029
- [27] - NASA-National Aeronautics and Space Administration, "Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)," *USGS-United States Geological Survey*, (2018)
- [28] - Land Processes Distributed Active Archive Center (LPDAAC), "MODIS Overview," https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis, (2018)
- [29] - A. DEMBELE and X. YE, "Spatial analysis of linear structures in the exploration of groundwater," *ISPRS Int. J. Geo-Information*, Vol. 6, N° 11 (2017), doi: 10.3390/ijgi6110335
- [30] - (DCTD) Département de la Coopération Technique pour le Développement (Hydrogeological Synthesis of MALI), "Synthese Hydrogeologique du MALI (Hydrogeological Synthesis of MALI)," *Proj. MLI/85/005*, (1990) 1 - 360 p.
- [31] - L. ZWARTS and F. S. HOEKEMA, "ATLAS Les plaines inondables du Delta Intérieur du Niger," (2013), [Online]. Available : www.altwym.nl
- [32] - Y. SANGARE, S. MAHE, G. PATUREL et J.-E. BANWURA, "Bilan hydrologique du fleuve Niger en Guinée de 1950 à 2000 (Hydrological balance of the Niger river in Guinea from 1950 to 2000)," *Sud Sci. Technol.*, Vol. 9, N° (2002) 21 - 33 p.

- [33] - L. ZWARTS and F. S. HOEKEMA, "les plaines inondables du Delta Intérieur du Niger (The flood plains of the Inner Niger Delta)," *Wetl. Int. Mali, Altenbg. Wymenga Ecol. Onderz. bv*, Vol. R1908, N° (2013) 19 p.
- [34] - A. ZARE, "Variabilité climatique et gestion des ressources naturelles dans une zone humide tropicale: une approche intégrée appliquée au cas du delta intérieur du fleuve Niger (Mali) (Climate variability and management of natural resources in a tropical wetland : an," *2iE*, (2015) 1 - 213 p.
- [35] - FASIL EJIGU EREGNO, CHONG-YU XU and NILS-OTTO KITTERØD, "Modeling hydrological impacts of climate change in different climatic zones," *Int. J. Clim. Chang. Strateg. Manag.*, (2013) 1 - 15 p., doi: 10.1108/IJCCSM-04-2012-0024
- [36] - G. PROJET, *Hydroclimatologie Et Impacts Du Changement Climatique Sur Les Aquiferes*, (2017)
- [37] - NIGER BASIN AUTHORITY, "Hydrologic Bulletin, April 2016," *Niger- HYCOS Proj.*, (2016) 1 - 10 p.
- [38] - E. DUBOIS, M. LAROCQUE, S. GAGN and M. BRAUN, "Climate Change Impacts on Groundwater Recharge in Cold and Humid Climates : Controlling Processes and Thresholds," (2022)
- [39] - A. O. MAHE. G, LIENOU. G, "BFP Niger WP2 Water availability and access," *IRD Montpellier, Fr. Univ. Yaounde, Cameroun. Univ. Iagos, Niger.*, (2011) 1 - 77 p.
- [40] - A. CHESHMEHZANGI, "The Analysis of Global Warming Patterns from 1970s to 2010s," *Atmos. Clim. Sci.*, Vol. 10, N° 03 (2020) 392 - 404 p., doi: 10.4236/acs.2020.103022
- [41] - G. PROJET, "hydroclimatologie et impacts du changement climatique sur les aquiferes," *Sahara Sahel Obs.*, (2017) 1 - 34 p.
- [42] - L. ZWART, "Le Delta Intérieur du Niger s ' assèchera -t-il du fait du changement climatique et de l ' utilisation de l ' eau en amont ?," *Wetl. Int.*, Vol. R1556, (2010) 41 p.
- [43] - transports Ministere de L'equipement et des, "Programme d'Action National d'Adaptation aux Changements Climatiques (PANA) Mali (National Action Program for Adaptation to Climate Change (PANA) Mali)," *MaliMeteo. Glob. Environ. Facil. UNDP*, (2007) 1 - 100 p.
- [44] - ABDARAMANE DEMBELE & al., "Characterization of the spatio-temporal evolution of deforestation: case of the inner Niger delta, Mali," *Rev. Ivoir. Sci. Technol*, Vol. 38, N°1 (2021) 410 - 433 p.
- [45] - L. JUSTICE, C. GIGLIO, L. BOSCHETTI et al., "Algorithm Technical Background Document MODIS Fire Products," N° (2006) 1 - 50 p., [Online]. Available: Version 2.3, EOS ID# 2741. http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod14.pdf(accessed 20 January 2009)
- [46] - J. LUNETTA, R. S. KNIGHT, J. F. EDIRIWICKREMA et al., "Landcover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data," *Remote Sens. Environ.*, Vol. 105, N° (2006) 142 - 154 p.

Tableau 2 : La matrice de transition des surface TST de la période 2000 à 2017

Year	2001						
	T-Slice °C	21.03 to 27.19	27.19 to 33.34	33.34 to 39.5	39.5 to 45.65	45.65 to 51.81	Total
2000	8.33 to 15.86	0.283 %	0.153 %	0.004 %	0.000 %	0.000 %	0.44 %
	15.86 to 23.39	0.627 %	2.030 %	0.435 %	0.024 %	0.000 %	3.14 %
	23.39 to 30.93	0.352 %	4.159 %	6.198 %	1.963 %	0.000 %	12.72
	30.93 to 38.46	0.006 %	0.337 %	15.388 %	42.083 %	0.052 %	58.11
	38.46 to 45.99	0.010 %	0.420 %	23.813 %	1.262 %	0.000 %	25.60
	Total	1.28 %	7.10 %	45.84 %	45.33 %	0.05 %	100.01

Year	2002						
	T-Slice °C	19.71 to 25.13	25.13 to 30.56	30.56 to 35.98	35.98 to 41.41	41.41 to 46.83	Total
2001	21.03 to 27.19	0.656 %	0.866 %	0.066 %	0.056 %	0.001 %	1.68 %
	27.19 to 33.34	0.043 %	3.270 %	2.777 %	0.988 %	0.020 %	7.13 %
	33.34 to 39.5	0.001 %	0.124 %	11.333 %	10.998 %	0.016 %	22.51
	39.5 to 45.65	0.001 %	2.041 %	64.466 %	0.803 %	0.000 %	67.37
	45.65 to 51.81	0.001 %	0.222 %	1.087 %	0.000 %	0.000 %	1.31%
	Total	0.70 %	6.52 %	79.73 %	12.85 %	0.04 %	100.00

Year	2003						
	T-Slice °C	12.99 to 20.21	20.21 to 27.44	27.44 to 34.66	34.66 to 41.89	41.89 to 49.11	total
2002	19.71 to 25.13	0.098 %	0.520 %	0.014 %	0.006 %	0.002 %	0.72 %
	25.13 to 30.56	0.283 %	3.077 %	0.700 %	0.041 %	0.001 %	4.24 %
	30.56 to 35.98	0.120 %	1.943 %	7.538 %	6.561 %	0.003 %	16.34
	35.98 to 41.41	0.245 %	1.649 %	6.536 %	63.414 %	4.401 %	76.72
	41.41 to 46.83	0.002 %	0.014 %	0.020 %	0.411 %	1.542 %	1.99%
	Total	0.75 %	7.20 %	14.81 %	70.43 %	5.95 %	100.01

Year	2004						
	T-Slice °C	21.83 to 28.18	28.18 to 34.53	34.53 to 40.87	40.87 to 47.22	47.22 to 53.57	Total
2003	12.99 to 20.21	0.256 %	0.180 %	0.086 %	0.239 %	0.009 %	0.77 %
	20.21 to 27.44	0.748 %	3.634 %	1.391 %	1.476 %	0.004 %	7.26 %
	27.44 to 34.66	0.006 %	1.648 %	6.490 %	6.682 %	0.046 %	14.89
	34.66 to 41.89	0.002 %	0.065 %	6.844 %	63.407 %	0.550 %	70.95
	41.89 to 49.11	0.000 %	0.003 %	0.078 %	5.164 %	0.871 %	6.13 %
	total	1.01 %	5.53 %	14.89 %	76.97 %	1.48 %	100.00

Year	2005						
2004	T-Slice °C	18.21 to 23.64	23.64 to 29.07	29.07 to 34.49	34.49 to 39.92	39.92 to 45.35	Total
	21.83 to 28.18	0.351 %	0.779 %	0.002 %	0.000 %	0.001 %	1.14 %
	28.18 to 34.53	0.042 %	2.847 %	2.678 %	0.062 %	0.007 %	5.65 %
	34.53 to 40.87	0.023 %	0.337 %	9.214 %	5.465 %	0.004 %	15.08
	40.87 to 47.22	0.008 %	0.076 %	2.317 %	73.096 %	1.057 %	76.62
	47.22 to 53.57	0.008 %	0.567 %	0.935 %	0.000 %	0.000 %	1.51 %
	Total	0.43 %	4.61 %	15.15 %	78.62 %	1.07 %	100.00
Year	2006						
2005	T-Slice °C	19.41 to 25.37	25.37 to 31.34	31.34 to 37.3	37.3 to 43.27	43.27 to 49.23	Total
	18.21 to 23.64	0.379 %	0.038 %	0.003 %	0.000 %	0.000 %	0.43 %
	23.64 to 29.07	0.499 %	3.455 %	0.094 %	0.001 %	0.000 %	4.06 %
	29.07 to 34.49	0.007 %	3.572 %	9.644 %	0.985 %	0.000 %	14.23
	34.49 to 39.92	0.001 %	0.148 %	10.088 %	68.507 %	0.383 %	79.19
	39.92 to 45.35	0.002 %	0.007 %	0.024 %	1.028 %	1.013 %	2.08 %
	Total	0.89 %	7.22 %	19.85 %	70.52 %	1.40 %	99.99

Chaque valeur du tableau correspond à une fraction de la superficie convertie en température de surface terrestre (TST), entre l'année et la suivante (exemple = 2000 et 2001), de la tranche de température (T-Tranche) indiquée sur la ligne vers le T-Tranche en tête de colonne. Par exemple, 0,153 % exprime la fraction de la surface TST appartenant à la tranche « 8,33 à 15,86 » en 2000 et qui a été convertie à la tranche « 27,19 à 33,34 » en 2001. Les valeurs en gras indiquent la permanence de la classe. Au-dessus de la diagonale se trouvent la dynamique des surfaces les plus chaudes.

Tableau 3 : La matrix de transition des surface TST de la période 2000 à 2017 (suite du Tableau 2)

Year	2007						
2006	T-Slice °C	20.31 to 25.74	25.74 to 31.17	31.17 to 36.59	36.59 to 42.02	42.02 to 47.45	Total
	19.41 to 25.37	0.721%	0.178%	0.000%	0.000%	0.000%	0.91%
	25.37 to 31.34	0.537%	6.144%	0.517%	0.005%	0.000%	7.24%
	31.34 to 37.3	0.002%	1.971%	15.038%	2.839%	0.000%	19.87%
	37.3 to 43.27	0.002%	0.057%	10.513%	59.549%	0.377%	70.58%
	43.27 to 49.23	0.003%	0.494%	0.912%	0.000%	0.000%	1.41%
	Total	1.27%	8.84%	26.98%	62.39%	0.38%	100.01%
Year	2008						

2007	T-Slice °C	17.37 to 22.07	22.07 to 26.78	26.78 to 31.48	31.48 to 36.19	36.19 to 40.9	Total
	20.31 to 25.74	0.959%	0.266%	0.002%	0.002%	0.000%	1.28%
	25.74 to 31.17	0.662%	6.040%	1.378%	0.022%	0.000%	8.37%
	31.17 to 36.59	0.034%	2.071%	16.176%	7.703%	0.000%	26.14%
	36.59 to 42.02	0.022%	0.316%	17.279%	44.742%	0.341%	62.90%
	42.02 to 47.45	0.001%	0.012%	0.023%	0.764%	0.495%	1.30%
	Total	1.68%	8.70%	34.86%	53.23%	0.84%	99.99%

Year	2009						
2008	T-Slice °C	20.69 to 26.44	26.44 to 32.19	32.19 to 37.95	37.95 to 43.7	43.7 to 49.45	Total
	17.37 to 22.07	1.275%	0.368%	0.013%	0.008%	0.003%	1.72%
	22.07 to 26.78	0.993%	6.526%	0.926%	0.252%	0.013%	8.79%
	26.78 to 31.48	0.002%	2.190%	16.643%	16.116%	0.024%	35.02%
	31.48 to 36.19	0.011%	13.034%	39.480%	0.983%	0.000%	53.60%
	36.19 to 40.9	0.000%	0.355%	0.514%	0.000%	0.000%	0.87%
	total	2.28%	22.47%	57.58%	17.36%	0.04%	100.00%

Year	2010						
2009	T-Slice °C	23.53 to 28.72	28.72 to 33.91	33.91 to 39.11	39.11 to 44.3	44.3 to 49.49	Total
	20.69 to 26.44	2.106%	0.187%	0.010%	0.000%	0.000%	2.31%
	26.44 to 32.19	2.251%	6.508%	0.533%	0.016%	0.000%	9.31%
	32.19 to 37.95	0.010%	4.582%	15.530%	10.559%	0.103%	30.84%
	37.95 to 43.7	0.048%	7.876%	43.482%	4.512%	0.000%	55.98%
	43.7 to 49.45	0.011%	0.026%	0.590%	0.931%	0.000%	1.56%
	Total	4.43%	19.18%	60.14%	16.02%	0.10%	100.00%

Year	2011						
2010	T-Slice °C	16.33 to 21.82	21.82 to 27.31	27.31 to 32.79	32.79 to 38.28	38.28 to 43.77	Total
	23.53 to 28.72	0.539%	2.446%	0.899%	0.476%	0.000%	4.45%
	28.72 to 33.91	0.018%	0.894%	4.940%	5.347%	0.056%	11.35%
	33.91 to 39.11	0.000%	0.037%	5.864%	17.966%	0.114%	24.03%
	39.11 to 44.3	0.000%	5.624%	47.460%	1.398%	0.000%	54.55%
	44.3 to 49.49	0.076%	4.482%	1.062%	0.000%	0.000%	5.63%
	Total	0.63%	13.48%	60.23%	25.19%	0.17%	100.01%

Year	2012						
2011	T-Slice °C	18.33 to 24.37	24.37 to 30.42	30.42 to 36.46	36.46 to 42.51	42.51 to 48.55	total
	16.33 to 21.82	0.401%	0.147%	0.000%	0.000%	0.000%	0.56%
	21.82 to 27.31	0.493%	2.854%	0.033%	0.000%	0.000%	3.40%

	27.31 to 32.79	0.130%	4.220%	5.495%	7.667%	0.000%	17.63%
	32.79 to 38.28	0.053%	2.766%	10.230%	61.759%	0.599%	75.65%
	38.28 to 43.77	0.002%	0.034%	0.057%	1.946%	0.717%	2.76%
	Total	1.08%	10.02%	15.81%	71.37%	1.32%	100.00%

Tableau 4 : La matrix de transition des surface TST de la période 2000 à 2017 (suite du Tableau 2)

Year	2013						
2012	T-Slice °C	23.89 to 30.12	30.12 to 36.35	36.35 to 42.57	42.57 to 48.8	48.8 to 55.03	Total
	18.33 to	1.028%	0.080%	0.021%	0.008%	0.000%	1.17%
	24.37 to	5.272%	4.265%	0.482%	0.043%	0.003%	10.11
	30.42 to	0.080%	5.266%	9.734%	0.756%	0.004%	15.89
	36.46 to	0.003%	0.244%	25.624%	45.361%	0.154%	71.48
	42.51 to	0.026%	0.748%	0.586%	0.000%	0.000%	1.36%
	total	6.41%	10.60%	36.45%	46.17%	0.16%	100.01

Year	2014						
2013	T-Slice °C	13.97 to 21.16	21.16 to 28.35	28.35 to 35.55	35.55 to 42.74	42.74 to 49.93	Total
	23.89 to	0.183%	3.124%	2.783%	0.295%	0.001%	6.54%
	30.12 to	0.010%	0.340%	5.707%	3.538%	0.015%	9.90%
	36.35 to	0.000%	0.231%	2.266%	31.823%	1.028%	35.91
	42.57 to	0.068%	0.713%	33.158%	12.714%	0.000%	46.91
	48.8 to	0.086%	0.644%	0.000%	0.000%	0.000%	0.73%
	Total	0.35%	5.05%	43.92%	48.37%	1.04%	99.99

Year	2015						
2014	T-Slice °C	22.79 to 28.89	28.89 to 35	35 to 41.1	41.1 to 47.21	47.21 to 53.31	Total
	13.97 to	0.184%	0.024%	0.001%	0.000%	0.000%	0.21%
	21.16 to	3.050%	0.363%	0.318%	0.132%	0.000%	3.87%
	28.35 to	3.692%	3.697%	2.859%	1.343%	0.015%	11.62
	35.55 to	0.055%	1.631%	24.758%	42.842%	0.182%	69.57
	42.74 to	0.010%	0.029%	0.183%	12.792%	1.685%	14.73
	Total	6.99%	5.74%	28.12%	57.11%	1.88%	100.00

Year	2016						
------	------	--	--	--	--	--	--

2015	T-Slice °C	23.19 to 28.76	28.76 to 34.33	34.33 to 39.89	39.89 to 45.46	45.46 to 51.03	total
	22.79 to	2.065%	4.655%	0.267%	0.010%	0.000%	7.00%
	28.89 to	0.197%	3.513%	2.186%	0.036%	0.002%	5.94%
	35 to 41.1	0.110%	1.258%	7.942%	18.987%	0.068%	28.42
	41.1 to	0.076%	0.330%	1.715%	48.918%	5.598%	56.73
	47.21 to	0.003%	0.003%	0.484%	1.415%	0.000%	1.92%
	total	2.45%	9.76%	12.59%	69.37%	5.67%	100.01

Year	2017						
2016	T-Slice °C	23.79 to 29.06	29.06 to 34.33	34.33 to 39.61	39.61 to 44.88	44.88 to 50.15	Total
	23.19 to	1.650%	0.468%	0.259%	0.091%	0.000%	2.47%
	28.76 to	0.875%	5.020%	3.516%	0.336%	0.000%	9.75%
	34.33 to	0.015%	0.896%	10.354%	0.812%	0.000%	12.09
	39.89 to	0.011%	0.030%	28.061%	40.136%	0.169%	68.49
	45.46 to	0.046%	5.842%	1.813%	1.292%	0.000%	7.19%
	Total	2.60%	12.26%	44.00%	42.67%	0.17%	99.99

Year	2017						
2000	T-Slice °C	23.79 to 29.06	29.06 to 34.33	34.33 to 39.61	39.61 to 44.88	44.88 to 50.15	Total
	8.33 to	0.387%	0.047%	0.006%	0.000%	0.000%	0.44%
	15.86 to	1.355%	1.158%	0.553%	0.064%	0.000%	3.14%
	23.39 to	0.391%	4.491%	6.804%	1.001%	0.009%	12.72
	30.93 to	0.001%	0.525%	30.501%	26.685%	0.159%	58.11
	38.46 to	0.006%	3.970%	20.217%	1.307%	0.000%	25.60
	total	2.14%	10.19%	58.08%	29.06%	0.17%	100.01

Tableau 5 : Processus de transformation spatiale (PTS) des surface TST de 2000 - 2017

Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
2001-2000	19.21°C to 25.15°C	1500	1635.45	44327.81	3.82	creation
	25.15°C to 31.10°C	4895	5262.69	204850.30	2.27	creation
	31.10°C to 37.05°C	12140	12913.38	473701.63	1.77	creation
	37.05°C to 43.00°C	12776	12220.36	-176579.67	1.16	creation
	43.00°C to 48.94°C	-28516	-32031.88	-546300.06	0.05	attrition

Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
------	----------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-----------

2002-2001	19.21°C to 25.15°C	-1150	-1266.21	-38533.41	0.43	attrition
	25.15°C to 31.10°C	-3486	-3812.08	-118236.16	0.59	attrition
	31.10°C to 37.05°C	-7434	-8139.56	-44749.38	0.73	attrition
	37.05°C to 43.00°C	11220	12321.28	135570.00	1.14	creation
	43.00°C to 48.94°C	812	896.57	65948.96	1.52	creation
Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
2003-2002	19.21°C to 25.15°C	49	66.04	14457.14	1.07	creation
	25.15°C to 31.10°C	3579	3983.53	40360.65	1.71	creation
	31.10°C to 37.05°C	-1869	-1910.20	-218598.65	0.91	attrition
	37.05°C to 43.00°C	-7537	-7599.74	-46617.17	0.92	attrition
	43.00°C to 48.94°C	4935	5460.37	210398.03	3.08	creation
Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
2004-2003	19.21°C to 25.15°C	455	487.98	961.76	1.48	creation
	25.15°C to 31.10°C	-1878	-2123.37	20460.39	0.78	attrition
	31.10°C to 37.05°C	369	250.58	232682.89	1.01	creation
	37.05°C to 43.00°C	7492	7477.97	-15434.03	1.08	creation
	43.00°C to 48.94°C	-5505	-6093.16	-238671.01	0.25	attrition
Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
2005-2004	19.21°C to 25.15°C	-849	-936.34	-26601.70	0.38	attrition
	25.15°C to 31.10°C	-1913	-2096.46	-44618.07	0.72	attrition
	31.10°C to 37.05°C	-1026	-1119.16	-44745.63	0.94	attrition
	37.05°C to 43.00°C	3064	3399.93	60982.87	1.03	creation
	43.00°C to 48.94°C	686	752.03	54982.53	1.38	creation
Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
2006-2005	19.21°C to 25.15°C	571	632.88	15063.87	2.12	creation
	25.15°C to 31.10°C	3827	4192.50	73320.59	1.78	creation
	31.10°C to 37.05°C	6792	7433.91	62891.28	1.40	creation
	37.05°C to 43.00°C	-10369	-11375.19	-84196.94	0.89	attrition
	43.00°C to 48.94°C	-817	-884.10	-67078.80	0.68	attrition
Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
2007-2006	19.21°C to 25.15°C	452	488.27	20028.17	1.41	creation
	25.15°C to 31.10°C	1355	1492.38	22028.36	1.16	creation
	31.10°C to 37.05°C	7540	8275.36	27750.79	1.32	creation
	37.05°C to 43.00°C	-9260	-10111.29	-52103.44	0.89	attrition
	43.00°C to 48.94°C	-128	-144.72	-17703.88	0.92	attrition

Le processus de transformation spatiale(PTS) a été calculé et son état d'évolution est déterminé par l'arbre de décision proposé par (Bogaert, et al.2004). Donc, connaissant n (nombre de tache), a (superficie) et p (périmètre), on applique la différence entre l'année et la précédente (exemple= 2001 et 2000) pour déterminer l'état PTS. LST-Mean-Slice = Tranche moyenne de la température de surface terrestre (TST)

Tableau 6 : Processus de transformation spatiale (PTS) des surface TST de 2000 - 2017(suite du Tableau 5)

Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
2008-2007	19.21°C to 25.15°C	515	582.09	8974.75	1.34	creation
	25.15°C to 31.10°C	450	547.79	33265.40	1.05	creation
	31.10°C to 37.05°C	10465	11711.78	18157.52	1.34	creation
	37.05°C to 43.00°C	-11534	-12272.64	-41916.45	0.85	attrition
	43.00°C to 48.94°C	-524	-569.03	-18481.23	0.67	attrition
Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
2009-2008	19.21°C to 25.15°C	717	776.17	17921.70	1.34	creation
	25.15°C to 31.10°C	669	690.84	28703.16	1.06	creation
	31.10°C to 37.05°C	-4863	-5516.56	-33614.59	0.88	attrition
	37.05°C to 43.00°C	3105	3137.79	-37227.44	1.04	creation
	43.00°C to 48.94°C	834	911.76	24217.16	1.80	creation
Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
2010-2009	19.21°C to 25.15°C	2580	2821.79	12820.51	1.93	creation
	25.15°C to 31.10°C	2475	2688.99	-20264.99	1.22	creation
	31.10°C to 37.05°C	-8135	-8984.65	-136105.28	0.78	attrition
	37.05°C to 43.00°C	-1588	-1893.17	21893.94	0.97	attrition
	43.00°C to 48.94°C	4901	5367.04	121655.83	3.61	creation
Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
2011-2010	19.21°C to 25.15°C	-4679	-5129.80	-67990.11	0.13	attrition
	25.15°C to 31.10°C	-9581	-10483.49	-187719.42	0.30	attrition
	31.10°C to 37.05°C	-7744	-8437.57	53269.70	0.73	attrition
	37.05°C to 43.00°C	25235	27835.27	213736.73	1.39	creation
	43.00°C to 48.94°C	-3454	-3784.40	-11296.90	0.49	attrition
Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
2012-2011	19.21°C to 25.15°C	721	804.35	34475.79	2.09	creation
	25.15°C to 31.10°C	8054	8848.26	255001.58	2.97	creation
	31.10°C to 37.05°C	-2118	-2296.92	49775.50	0.90	attrition
	37.05°C to 43.00°C	-5130	-5509.10	-241275.13	0.94	attrition
	43.00°C to 48.94°C	-1691	-1846.59	-97977.73	0.49	attrition

Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
2013-2012	19.21°C to 25.15°C	6465	7083.33	83946.75	5.59	creation
	25.15°C to 31.10°C	-224	-274.32	-17825.37	0.98	attrition
	31.10°C to 37.05°C	24121	26410.53	25690.55	2.26	creation
	37.05°C to 43.00°C	-29366	-32388.93	-36272.55	0.66	attrition
	43.00°C to 48.94°C	-746	-830.61	-55539.38	0.54	attrition

Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
2014-2013	19.21°C to 25.15°C	-7620	-8349.29	-131721.11	0.03	attrition
	25.15°C to 31.10°C	-7310	-7954.07	-268147.22	0.39	attrition
	31.10°C to 37.05°C	-29357	-32039.99	-416945.18	0.32	attrition
	37.05°C to 43.00°C	26385	29879.32	299305.00	1.48	creation
	43.00°C to 48.94°C	16653	18464.03	517508.50	20.18	creation

Tableau 7 : Processus de transformation spatiale (PTS) des surface TST de 2000 - 2017 (suite du Tableau 2)

Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
2015-2014	19.21°C to 25.15°C	8185	8954.18	100142.90	33.33	creation
	25.15°C to 31.10°C	2547	2729.27	175158.77	1.53	creation
	31.10°C to 37.05°C	20389	22153.20	382319.50	2.45	creation
	37.05°C to 43.00°C	-14496	-16941.72	-198736.03	0.82	attrition
	43.00°C to 48.94°C	-15229	-16894.93	-458885.14	0.13	attrition

Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
2016-2015	19.21°C to 25.15°C	-5454	-5973.21	-38828.74	0.35	attrition
	25.15°C to 31.10°C	4590	5026.95	55761.89	1.64	creation
	31.10°C to 37.05°C	-19665	-21531.74	-227287.17	0.43	attrition
	37.05°C to 43.00°C	14137	15526.38	-13065.89	1.21	creation
	43.00°C to 48.94°C	6346	6951.63	223419.92	3.75	creation

Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
2017-2016	19.21°C to 25.15°C	118	131.22	-15926.67	1.04	creation
	25.15°C to 31.10°C	-3950	-4328.02	-91867.28	0.66	attrition
	31.10°C to 37.05°C	36323	39769.84	288187.47	3.49	creation
	37.05°C to 43.00°C	-25598	-28080.73	42564.71	0.69	attrition
	43.00°C to 48.94°C	-6841	-7492.31	-222958.22	0.21	attrition

Year	LST-Mean-Slice	$n_2 - n_1$	$a_2 - a_1$	$P_2 - P_1$	a_2 / a_1	STP state
------	----------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-----------

2017-2000	19.21°C to 25.15°C	2576	2808.90	33519.42	5.84	creation
	25.15°C to 31.10°C	4099	4391.38	160232.57	2.06	creation
	31.10°C to 37.05°C	35928	38942.22	492380.95	3.32	creation
	37.05°C to 43.00°C	-11464	-14374.20	-169371.51	0.81	attrition
	43.00°C to 48.94°C	-28284	-31768.31	-516761.43	0.06	attrition