PROGRAMME D'AIDE À LA RECHERCHE TECHNOLOGIQUE (PART)

IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES ÎLOTS DE FRAÎCHEUR URBAINS

PART 2011A058

Présenté à :

Mme Solange Bernier
Direction du soutien aux établissements
Direction générale des affaires
universitaires et collégiales
Ministère de l'Éducation,
du Loisir et du Sport

Par :

CERFO
Centre d'enseignement et de recherche
en foresterie de Sainte-Foy inc.

Samuel Lafleur-Careau, B.Sc.
Jalal Khaldoune, géographe, Ph.D.
Frank Grenon, biol., Ph.D.

Décembre 2012

© CERFO 2012-19

Mots-clés : conservation, îlots, fraîcheur, chaleur, WorldView, températures, végétation

Référence à citer :
S. Lafleur-Careau, J. Khaldoune, F. Grenon. 2012. Identification et caractérisation des îlots de fraîcheur urbains. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport PART. 33 pages + 1 annexe.

Ce projet est financé par le Programme d'aide à la recherche technologique (PART) du ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport du Québec.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES ..... **II**

LISTE DES TABLEAUX ..... **II**

INTRODUCTION ..... **III**

1. MISE EN CONTEXTE DU PROJET **1**
2. OBJECTIFS DU PROJET **2**
3. MATÉRIEL ET MÉTHODES **2**
4. PRINCIPALES ÉTAPES DU PROJET **4**
5. DONNÉES UTILISÉES POUR LA CONSTRUCTION DU MODÈLE **6**
5.1. Sous-échantillonnage du territoire d'étude *6*
5.2. Choix des données satellitaires utilisées *6*
5.2.1. Image WorldView 7
5.3. Description de la variable dépendante du modèle *7*
5.4. Description des variables explicatives *8*
5.4.1. Données climatiques 10
5.4.2. Indice de végétation normalisé (NDVI) 11
5.4.3. Indice d'imperméabilité des surfaces 12
5.4.4. Classification de l'occupation du sol 13
5.5. Échantillonnage *18*
6. ÉLABORATION DU MODÈLE **19**
6.1. Portrait général des variables utilisées *19*
6.2. Vérification de la colinéarité entre les variables *19*
6.3. Construction du modèle *20*
7. VALIDATION DU MODÈLE **22**
8. APPLICATION DU MODÈLE À L'ENSEMBLE DU TERRITOIRE D'ÉTUDE **23**
8.1. Données WorldView utilisées *23*
8.2. Production d'une carte de températures relatives de surface *23*
8.3. Description des plages de température *24*
8.3.1. Méthode utilisée 24
8.4. Cartographie de température relative *24*
9. BILAN DES LIMITES MÉTHODOLOGIQUES DE L'ÉTUDE **28**
10. PISTES D'AMÉLIORATIONS POSSIBLES **29**
11. RETOMBÉES SUR LE COLLÈGE **30**

REMERCIEMENTS **31**

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES **32**

ANNEXE **34**

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation du site d'étude, La Cité-Limoilou à Québec 3
Figure 2. Principales étapes suivies lors de l'élaboration de la carte de températures de surface 5
Figure 3. Schéma général du jeu de données utilisées comme variables explicatives du modèle de prédiction de la température de surface à partir de l'image WorldView-2 (2 m) 9
Figure 4. Localisation du parcours des stations mobiles utilisées pour la mesure de la température de surface au niveau du site d'étude 10
Figure 5. Carte de l'indice de végétation (NDVI) calculé à partir de l'image WorldView-2 (2 m) 11
Figure 6. Carte de l'indice d'imperméabilité pour le secteur d'étude calculé à partir de l'image WorldView-2 (2 m) 13
Figure 7. Température mesurée par les stations mobiles en fonction de la température prédite pour les 757 points d'échantillonnage utilisés lors de la construction du modèle 22
Figure 8. Carte de températures de surface pour La Cité-Limoilou, ville de Québec (carte générale et zooms) 26

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Spécifications techniques du capteur optique de WorldView-2 6
Tableau 2. Classes d'occupation du sol et catégories considérées 14
Tableau 3. Matrices de confusion pour chaque classe d'occupation du sol 16
Tableau 4. Portrait général des variables 19
Tableau 5. Présentation des valeurs de rho pour évaluer la colinéarité 20
Tableau 6. Présentation des valeurs des coefficients pour les variables retenues dans le modèle final 21

INTRODUCTION

Selon l'Agence de la santé et des services sociaux de Montréal, des épisodes de chaleur accablante peuvent provoquer différents problèmes de santé, surtout chez les personnes âgées et les jeunes enfants âgés de 0 à 4 ans. Ces épisodes surviennent plus fréquemment en milieu urbain en raison de la présence d'îlots de chaleur et seront plus fréquents dans un contexte de changements climatiques [1].

Un îlot de chaleur urbain se définit comme une zone en milieu urbain où la différence de température de surface[1] observée est supérieure à la température des zones rurales environnantes pour la même période. En effet, en milieu urbain, la densification de la population et l'urbanisation ont pour effet d'accroître la proportion de surfaces minéralisées (ex. : asphalte, béton, etc.) qui absorbent la chaleur aux dépends des surfaces végétalisées (espaces verts).

L'occupation du territoire et les matériaux qui le composent ont un impact direct sur la température de surface. Certains auteurs ont démontré que les températures des centres urbains peuvent atteindre jusqu'à 12°C de plus que celles des régions limitrophes [2]. Cependant, plusieurs études ont démontré qu'à mesure que le nombre d'arbres dans un secteur augmente, la température de l'air ambiant diminue plus rapidement [3] [4] [5] [6] [7]. La température maximale de l'air ambiant dans les milieux urbanisés peut être réduite d'environ 0,04 à 0,2°C par pourcentage additionnel de couverture arborée [8]. Cet intervalle de valeurs s'explique par le choix des essences d'arbres et leurs caractéristiques respectives (taille, densité du couvert, etc.). Il est possible d'atteindre une moyenne d'environ 1°C de réduction par 10 % de couverture arborescente jusqu'à concurrence d'environ 7°C [9] [10] [11] [12].

À l'échelle de l'arbre individuel, il est démontré que certains arbres situés à des endroits stratégiques peuvent avoir un rôle non négligeable sur le bilan thermique d'un secteur. Par exemple, l'ombre d'arbres individuels ou de petits groupes d'arbres sur des surfaces gazonnées permet de réduire la température maximale de l'air ambiant d'environ 0,7 à 1,3°C par rapport à des zones ouvertes [8]. De plus, certains scientifiques rapportent qu'un arbre mature (ex. : érable de 75 ans et de 30 cm de diamètre) transpirant 450 litres d'eau par jour a un effet refroidissant équivalant à celui de cinq climatiseurs fonctionnant 20 heures par jour [13] [14]. Grâce à ce processus, un arbre individuel crée, sous son ombre, une zone où la température peut être diminuée d'environ 0,7 à 1,3°C [15].

[1] Température d'exposition des habitants dans une ville influencée par l'occupation du territoire et autres facteurs météorologiques. En été, elle est supérieure à la température observée aux stations météorologiques.

Depuis 2009, l'Institut national de Santé publique du Québec (INSPQ) [16] s'est penché sur la problématique des îlots de chaleur urbains afin de se prémunir d'un cadre d'intervention pour protéger les populations à risque lors de températures excessives (canicules). Pour ce faire, un portrait des principaux îlots de chaleur présents dans les centres urbanisés du Québec a été produit par le CERFO [17] pour l'INSPQ. Cet institut a produit une cartographie de ces îlots et la rend disponible sur le Web[2].

Cette carte permet aux décideurs d'orienter des plans d'action visant à réduire les risques pour la santé de la population vulnérable lors d'épisodes de chaleur accablante.

Or, la résolution spatiale[3] de cette carte (20 mètres) ne permet pas de considérer le pouvoir rafraîchissant de certains arbres ou d'agglomérations d'arbres. Elle ne permet pas non plus d'identifier avec précision des zones végétalisées urbaines où la température se rapproche des zones rurales environnantes. Ces « îlots de fraîcheur » ne peuvent donc pas être localisés ni caractérisés afin de connaître leur contribution au rafraîchissement local.

Par ailleurs, une firme de consultants en design urbain et aménagement du territoire nous a indiqué que la conservation ou l'implantation d'îlots de fraîcheur fait dorénavant partie du coffre à outils des urbanistes. Il s'agit de prioriser la préservation des zones où la présence de végétation empêche la formation d'îlots de chaleur ou de végétaliser des zones près des îlots de chaleur afin d'en réduire les impacts. Il y a donc un besoin d'identifier les îlots de fraîcheur et de cibler les endroits favorables à l'implantation et au maintien de ceux-ci.

C'est dans ce contexte que le CERFO a réalisé, dans le cadre du programme PART, un projet conciliant la foresterie urbaine et la santé publique. Pour ce faire, une méthode a été développée pour identifier les îlots de fraîcheur par imagerie satellitaire, et ce, au mètre près. Les résultats de cette méthode permettront, entre autres, aux firmes spécialisées en aménagement du territoire, en urbanisme et en design urbain de disposer d'un outil plus détaillé pour identifier, protéger et implanter des îlots de fraîcheur en milieu urbain.

Bien que la carte des îlots de fraîcheur/chaleur ait été produite à l'échelle de 20 m [17], il n'y a, à notre connaissance, que très peu de travaux qui se sont attardés à identifier des îlots de fraîcheur à une échelle fine et à les caractériser en termes forestiers. Le caractère novateur du projet se

[2] http://132.203.82.168/dev/Projets/PaccSante/index.html

[3] Aptitude d'un capteur à distinguer des objets rapprochés dans l'espace. Plus spécifiquement, la résolution spatiale d'un capteur de télédétection correspond à la dimension du pixel des images produites par celui-ci.

retrouve donc dans le fait de fournir à des firmes de design urbain une méthode pour identifier des îlots de fraîcheur existants et les caractériser de manière forestière. Ces caractéristiques serviront à prioriser les boisés à conserver. Dans le cas de l'implantation d'un nouveau boisé, elles serviront de cibles à atteindre pour que le boisé serve d'îlot de fraîcheur.

1. MISE EN CONTEXTE DU PROJET

En ville, lorsque la proportion de surfaces minéralisées qui absorbent la chaleur est importante, il se peut que la température de surface de ces zones soit plus élevée que dans les zones environnantes. On nomme ce phénomène un îlot de chaleur. Des épisodes de chaleur accablante peuvent provoquer différents problèmes de santé, surtout chez les personnes âgées et les jeunes enfants âgés de 0 à 4 ans. Ces épisodes surviennent plus fréquemment dans des îlots de chaleur.

Il existe présentement une méthode qui permet de localiser les îlots de chaleur avec une précision de l'ordre de 20 mètres. Des études ont cependant démontré qu'un petit groupe d'arbres ou des arbres individuels stratégiquement placés peuvent réduire significativement la température de surface près des bâtiments. Lorsque la surface végétalisée est suffisamment importante et contribue au rafraîchissement local, on parle alors d'îlot de fraîcheur urbain. Cependant, peu de travaux se sont penchés sur l'identification et la caractérisation des îlots de fraîcheur en milieu urbain. Or, les méthodes actuelles pour déterminer les températures de surface n'ont pas une précision suffisante pour localiser ces îlots.

Ainsi, le CERFO propose de développer une méthode pour identifier et caractériser les îlots de fraîcheur urbains au mètre près à l'aide d'images satellitaires à haute résolution spatiale.

Le projet consiste à prédire les températures de surface à l'aide d'une image à haute résolution spatiale (1,8 m) et à déterminer un seuil pour identifier les îlots de fraîcheur. Suite à l'identification, les caractéristiques forestières de la végétation présente dans les îlots seront déterminées. Celles-ci serviront à prioriser les boisés à conserver. Dans le cas de l'implantation d'un nouveau boisé, elles serviront de cibles à atteindre pour que le boisé serve d'îlot de fraîcheur.

À travers ce projet, le CERFO développe une expertise en foresterie urbaine, domaine en émergence. Il sera ainsi possible d'accéder à une nouvelle clientèle reliée à la foresterie urbaine qui intègre une façon de lutter contre les îlots de chaleur dans les zones à risque.

Les retombées seront importantes pour le Cégep de Sainte-Foy car les résultats seront diffusés aux enseignants et aux étudiants du programme de Technologie forestière. Dans ce programme, on met peu l'accent sur la foresterie urbaine et la télédétection et le projet sera l'occasion d'intéresser les enseignants à ces sujets.

2. OBJECTIFS DU PROJET

Le principal objectif du projet était de :

- Développer une méthode permettant de cartographier et de caractériser en termes forestiers les îlots de fraîcheur urbains à l'arbre près à partir d'une image satellitaire à haute résolution spatiale.

Plus spécifiquement, le projet consistait à :

- Identifier et acquérir des données pertinentes à la cartographie des îlots de fraîcheur à une échelle de travail fine.
- Proposer une méthode pour la prédiction des températures de surface à partir d'une image satellitaire à haute résolution spatiale.
- Localiser les îlots de fraîcheur urbains (au mètre près) pour un territoire pilote (quartier La Cité-Limoilou de la ville de Québec).
- Valider la localisation sur le terrain et caractériser les îlots de fraîcheur en termes forestiers.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Afin de circonscrire les coûts reliés au projet, il est proposé de réaliser une analyse des îlots de fraîcheur à une échelle fine sur un territoire pilote. À cet effet, un arrondissement de la ville de Québec (La Cité-Limoilou) a été retenu. La carte suivante illustre le territoire d'étude (figure 1).

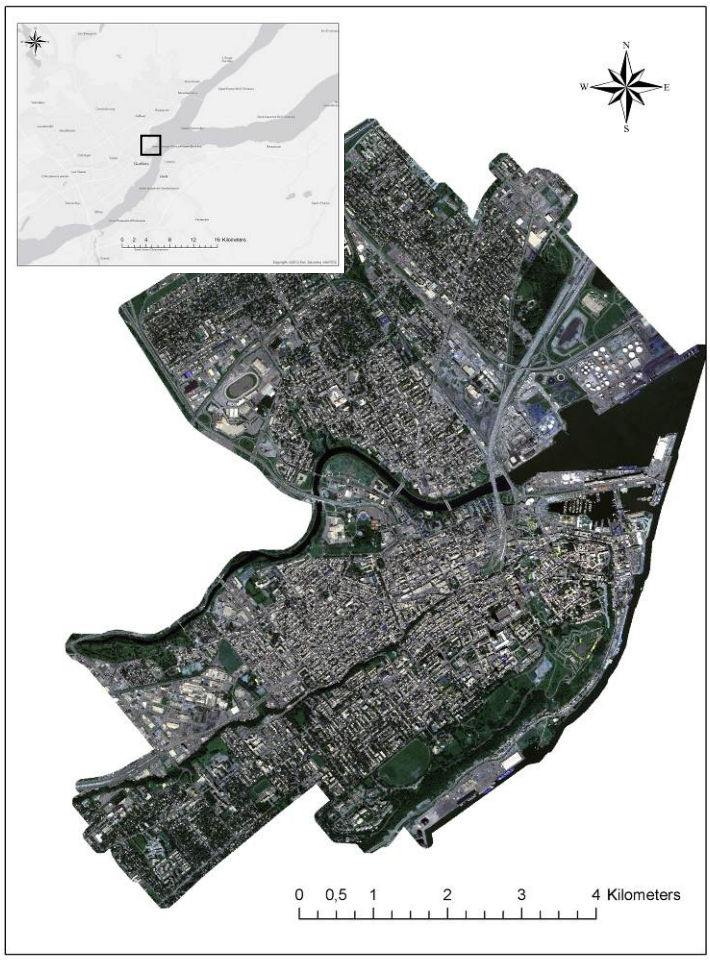


Figure 1. Localisation du site d'étude, La Cité-Limoilou à Québec

Le territoire pilote a été sélectionné en raison de la diversité des situations rencontrées et de sa proximité avec le CERFO. En effet, on y retrouve de grands espaces verts (les Plaines d'Abraham), des quartiers de bungalows résidentiels (nord de Limoilou), des quartiers fortement densifiés avec très peu d'espaces végétalisés (St-Roch), des quartiers densément peuplés avec présence de végétation (Montcalm) et même des zones industrielles à l'est et à l'ouest de l'arrondissement. Cette diversité permettra de tester la robustesse de notre méthode selon les différentes occupations du territoire.

4. PRINCIPALES ÉTAPES DU PROJET

En 2009, l'Institut national de Santé publique du Québec (INSPQ) a produit une cartographie des îlots de chaleur à l'échelle du Québec urbain (densité > 400 habitants/km^2) basée sur le calcul de la température de surface [16].

Un deuxième modèle permettant de prédire la température au sol pour l'ensemble des zones habitées de plus de 400 habitants par km^2 avait été développé par le CERFO pour le compte de l'INSPQ en 2012 [17]. Dans le cadre du projet actuel, il a été convenu initialement que l'on utiliserait ce modèle, construit à partir d'images SPOT-5 (résolution spatiale de 20 m), pour prédire la température de surface à partir d'images WorldView-2 (résolution spatiale de 1,8 m). L'utilisation d'images SPOT et Landsat pour générer une carte de températures de surface a déjà fait l'objet de projets de recherche (Bhang et Seok-Soon, 2009). Le territoire pilote fait partie du territoire couvert. En faisant l'acquisition de cette donnée, il sera possible d'identifier les zones où l'effet rafraîchissant des petits groupes d'arbres ou des arbres individuels est masqué dans la cartographie des îlots de chaleur à une échelle grossière.

La cartographie des îlots de chaleur/fraîcheur à partir du modèle développé par le CERFO [17] a ouvert la possibilité de tester certaines améliorations possibles du modèle initial [16], notamment en ce qui concerne certaines variables explicatives telles que les classes d'occupation du sol et certains indices utilisés. Dans ce contexte, il a été décidé de tester *a priori* les mêmes variables explicatives que celles qui ont été retenues dans le modèle de Boulfroy *et al.* (2012), et de vérifier si l'ajout ou la suppression d'autres variables ciblées permettrait d'améliorer le pouvoir prédictif du modèle. La figure 1 présente les principales étapes suivies lors de l'élaboration du modèle. Chaque étape sera par la suite décrite dans le détail :

- Préparation du jeu de données utilisé pour construire le modèle (variables explicatives et température mesurée au sol);
- Élaboration du nouveau modèle;
- Validation statistique du nouveau modèle;
- Application du modèle sur l'ensemble du territoire d'étude.

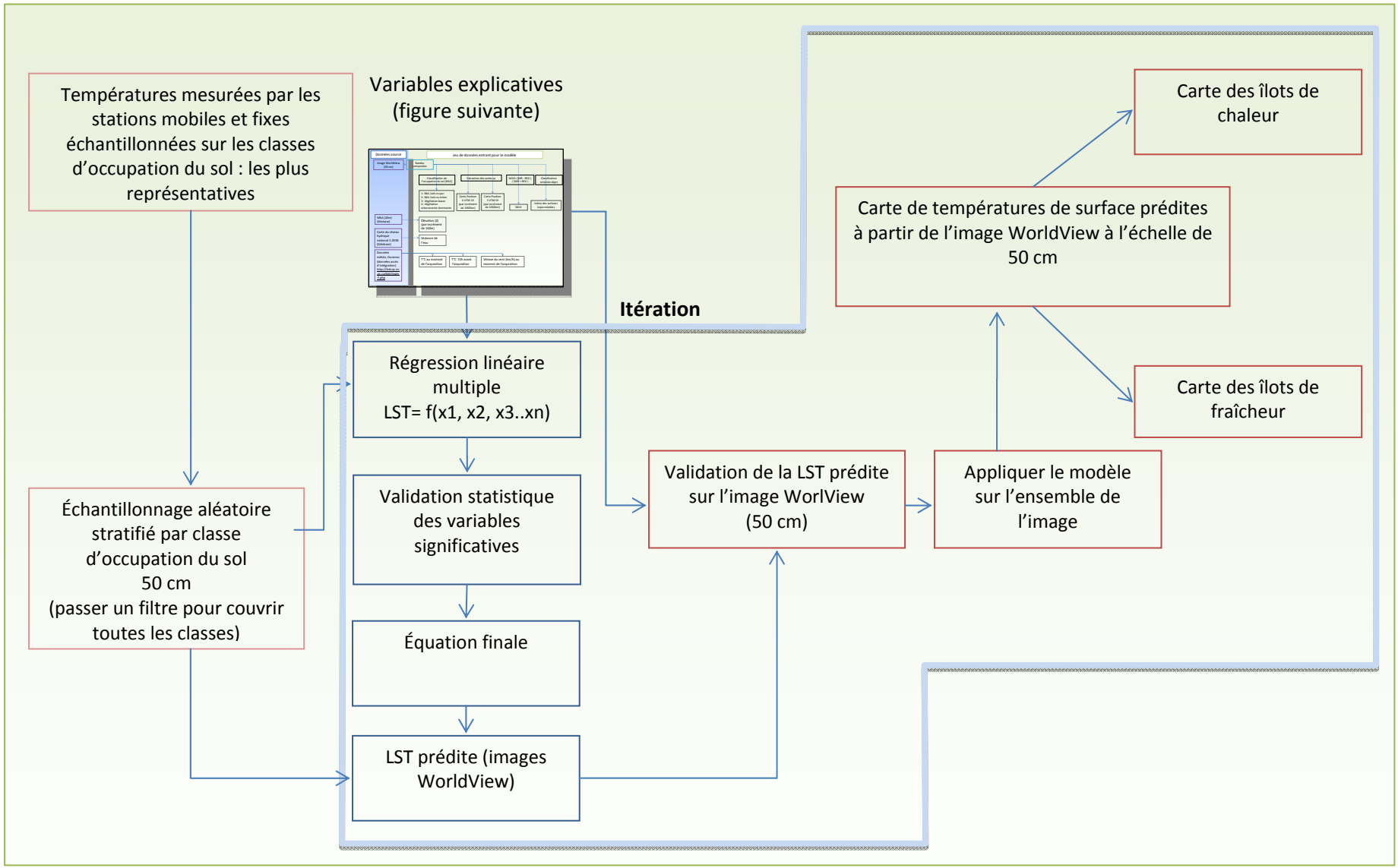


Figure 2. Principales étapes suivies lors de l'élaboration de la carte de températures de surface

5. DONNÉES UTILISÉES POUR LA CONSTRUCTION DU MODÈLE

5.1. SOUS-ÉCHANTILLONNAGE DU TERRITOIRE D'ÉTUDE

Le modèle prédictif a été construit à partir d'un sous-échantillonnage du territoire d'étude. Parmi l'ensemble des points d'échantillonnage couvrant le territoire d'étude, une sélection de secteurs représentant l'ensemble de l'hétérogénéité du tissu urbain retrouvé à Québec a été réalisée (domaine Maizerets, Plaines d'Abraham, quartier Limoilou). Le choix des secteurs a également été fait en s'assurant qu'ils couvrent l'ensemble de l'étendue géographique du secteur d'étude.

5.2. CHOIX DES DONNÉES SATELLITAIRES UTILISÉES

Deux jeux de données satellitaires ont été utilisés pour construire le modèle de prédiction de la température de surface :

- La bande panchromatique du capteur optique de WorldView-2;
- Les 4 bandes du capteur optique de WorldView-2 (tableau 3).

Tableau 1. Spécifications techniques du capteur optique de WorldView-2

Mode	Bande spectrale	Résolution
Panchromatique	0,45 - 0,800 µm	0,5 m x 0,5 m

Mode	Bande	Bande spectrale	Résolution
Multispectral	1	0,770 - 0,895 µm (proche IR 1)	1,84 x 1,84 m
	2	0,630 - 0,690 µm (rouge)	
	3	0,510 - 0,580 µm (vert)	
	4	0,450 - 0,510 µm (bleu)	

5.2.1. Image WorldView

L'utilisation d'une image WorldView-2 représente l'une des principales améliorations au modèle développé par Boulfroy *et al*. (2012). En effet, le modèle initial a été construit à partir d'images SPOT-5, générant alors une cartographie des îlots de chaleur selon une résolution spatiale de 20 m. En utilisant une image WorldView-2, la résolution de la cartographie issue du modèle passe de 20 m à 2 m. Le choix de l'image WorldView-2 a également été conditionné par la disponibilité de cette dernière, à un moindre coût, contrairement à des images acquises par d'autres capteurs optiques (QuickBird, Ikonos, etc.), dont la résolution aurait pu être encore plus fine, mais dont l'acquisition aurait été plus dispendieuse. Lors de la mise en place de la proposition, l'image WorldView-2 s'est avérée être le choix le plus judicieux.

L'image WorldView-2 a été utilisée pour caractériser certaines variables explicatives du modèle, notamment la présence de végétation. L'image WorldView-2 retenue a donc été acquise le 5 août 2011, soit pendant la période où la végétation est en feuilles. Une attention particulière était portée au choix de l'image acquise dans des conditions atmosphériques favorables, soit une absence de couverture nuageuse.

5.3. DESCRIPTION DE LA VARIABLE DÉPENDANTE DU MODÈLE

Pour être en mesure d'identifier des îlots de fraîcheur, il faudra utiliser une méthode pour calculer les températures de surface à partir d'une image satellitaire à haute résolution spatiale. Le modèle proposé tient compte de la température ambiante aux stations météorologiques, de la vitesse du vent, de l'occupation du territoire, du moment de l'année, de la distance par rapport à un cours d'eau et de la situation géographique d'une image. Ce modèle a été produit à partir d'images provenant du satellite SPOT-5 et la carte résultante a été produite à l'échelle de 20 mètres. Il ne permet donc pas de connaître l'impact des petits groupes d'arbres ni des arbres individuels sur le rafraîchissement local.

Pour localiser les îlots de fraîcheur pour le territoire pilote, les températures de surface ont été mesurées *in situ* par des stations mobiles selon un tracé pour couvrir un large territoire comprenant toutes les classes d'occupation de sol choisies pour développer le modèle. Les différentes températures mesurées ont été comparées avec l'occupation du territoire, c'est-à-dire qu'on a déterminé si les températures les plus faibles se situaient vraiment dans des zones végétalisées ou s'il y avait des zones non végétalisées avec des températures faibles brouillant

l'analyse. Cette deuxième situation amène un risque supplémentaire quant à la précision des résultats de la méthode. Il faudra peut-être considérer d'autres éléments physiques à titre d'îlots de fraîcheur comme des milieux bâtis qui génèrent de l'ombre sur certaines zones.

5.4. DESCRIPTION DES VARIABLES EXPLICATIVES

Les variables explicatives retenues pour l'élaboration du nouveau modèle prédictif sont celles qui figuraient déjà dans le modèle développé par Boulfroy *et al.* (2012), soit :

- des données climatiques;
- l'indice de végétation normalisé (NDVI);
- la distance par rapport à l'eau;
- le positionnement en X et Y;

Une nouvelle variable a été ajoutée concernant la classification de l'occupation du sol, passant de 4 à 5 classes.

La figure 3 présente l'ensemble des données qui ont été testées dans le nouveau modèle.

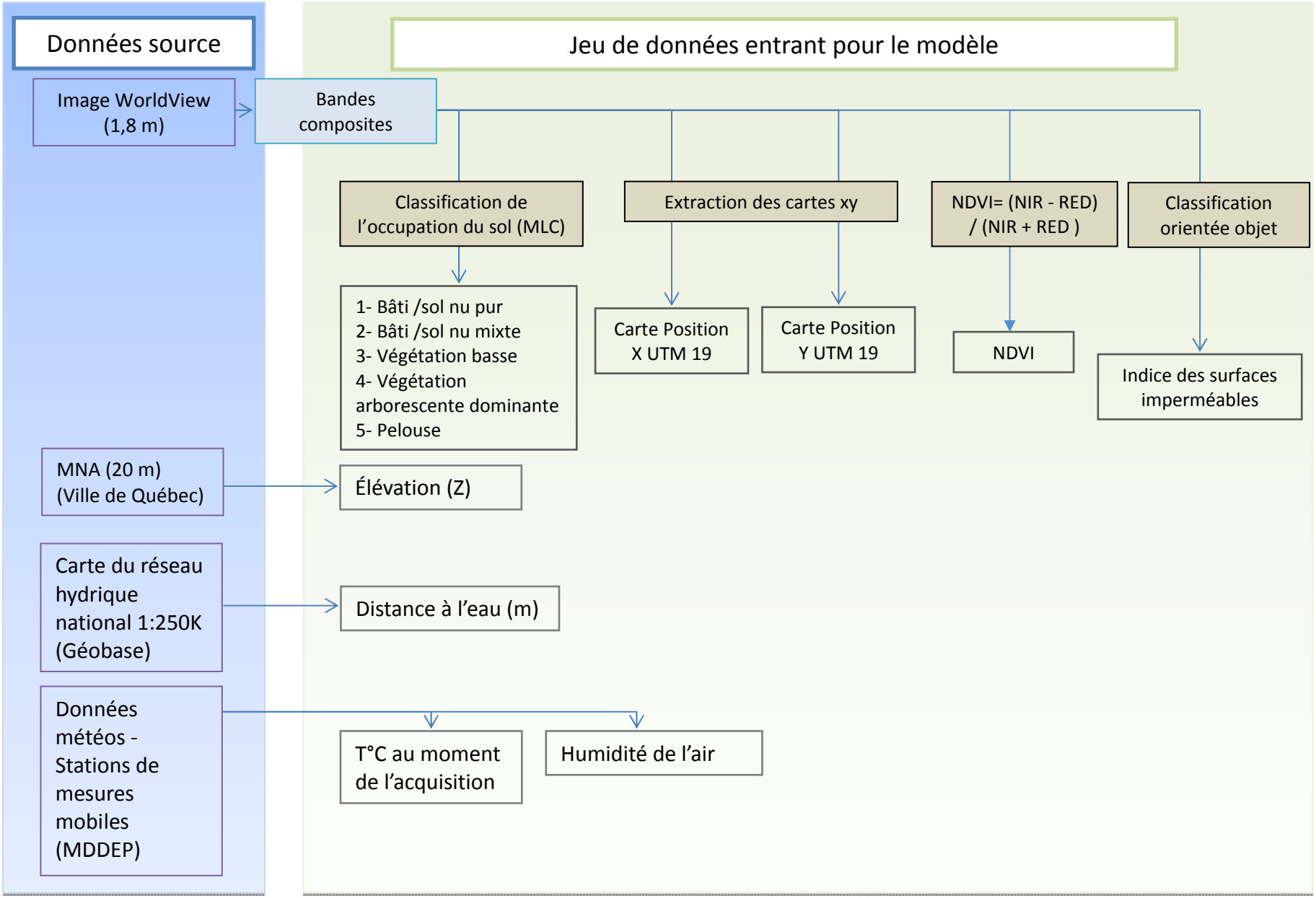


Figure 3. Schéma général du jeu de données utilisées comme variables explicatives du modèle de prédiction de la température de surface à partir de l'image WorldView-2 (2 m)

5.4.1. Données climatiques

Pour calculer les températures de surface, les données de stations météorologiques mobiles ont été considérées. Les températures ont été prélevées dans les mêmes conditions climatiques que celles du jour de l'acquisition de l'image WorldView-2.

Les données climatiques utilisées sont des valeurs moyennes calculées à partir des stations météorologiques mobiles couvrant un échantillon de chaque classe de l'occupation du sol (figure 4).

Les données climatiques ont été fournies par le Dr. Onil Bergeron du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP).

Figure 4. Localisation du parcours des stations mobiles utilisées pour la mesure de la température de surface au niveau du site d'étude

5.4.2. Indice de végétation normalisé (NDVI)

Le NDVI utilisé pour estimer la quantité de végétation présente est le rapport normalisé de la différence entre la réflectance proche infrarouge et la réflectance acquise dans la bande spectrale rouge du capteur optique de WorldView-2.

$$\text{NDVI} = \frac{\text{proche infrarouge - rouge}}{\text{proche infrarouge + rouge}}$$

Les valeurs de NDVI peuvent varier de -1 à +1. En présence de végétation, elles sont généralement comprises entre 0,1 et 0,7. Les valeurs supérieures de l'indice correspondent à la présence d'une couverture végétale dense et en bonne santé, alors que les nuages et la neige entraînent des valeurs de NDVI proches de 0 (figure 5).

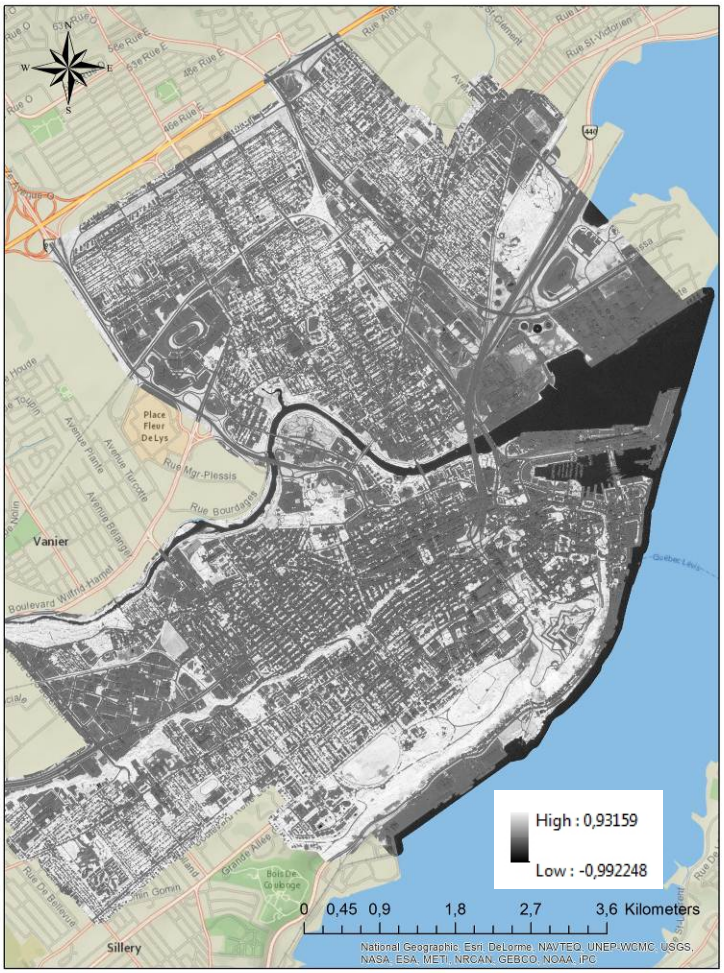


Figure 5. Carte de l'indice de végétation (NDVI) calculé à partir de l'image WorldView-2 (2 m)

5.4.3. Indice d'imperméabilité des surfaces

Le calcul de l'imperméabilité des surfaces informe sur le degré d'anthropisation d'une région, mais aussi sur la quantité de matériaux ayant une forte masse thermique. En effet, les surfaces imperméables, principalement en raison de leur masse élevée, ont une forte capacité à capter et à stocker l'énergie provenant du rayonnement solaire. Les surfaces imperméables sont principalement des surfaces anthropiques comme les routes, les trottoirs, les cours et allées pavées, ou les stationnements. Elles sont toutes couvertes par de l'asphalte, de la brique, de la pierre ou du ciment. Les toitures, qui sont principalement fabriquées de bardeaux d'asphalte, de tôle ou de cèdre, et le sol nu compacté par le développement urbain sont aussi fortement imperméables.

Le calcul des surfaces imperméables est estimé à partir des données des bandes 2, 3 et 4 de l'image WorldView-2, c'est-à-dire la bande rouge (0,61 - 0,68 µm), la bande du proche infrarouge (0,78 - 0,89 µm) et celle du moyen infrarouge (MIR) (1,58 - 1,75 µm).

Sur la scène WorldView-2 à l'étude, une ou plusieurs régions d'intérêt correspondant aux surfaces imperméables dites pures ont été identifiées manuellement en utilisant les données des bandes 2, 3 et 4 ainsi que l'imagerie à haute résolution spatiale disponible dans Google Maps. Ces régions d'intérêt correspondent généralement à des stationnements avec peu ou pas de peinture, à de grandes intersections routières ou à des pistes d'aéroport composées d'asphalte ou de bitume. Les régions d'intérêt ont été reportées dans le logiciel ENVI 4.8 et un démixage spectral partiel a ensuite été appliqué sur les scènes, dans le but de déterminer l'abondance des composantes spectrales correspondant aux surfaces imperméables dans chaque pixel. Le démixage est dit partiel car il ne concerne que la fraction de surface imperméable du pixel. Il optimise la réponse des composantes spectrales connues et supprime les valeurs inconnues, selon la signature spectrale de la région d'intérêt. Il fournit un moyen rapide d'identifier les matériaux spécifiques, en se basant sur la similitude des régions d'intérêt préalablement identifiées concernant l'imperméabilité des surfaces.

Les résultats développés par cette méthode ont finalement été appliqués à chaque pixel de la scène. Les valeurs de pixel s'étendent de 0 à 255 et correspondent à la fraction de surface imperméable. Il est possible de transposer ces valeurs pour obtenir un pourcentage d'imperméabilité, et ce, sur chaque pixel de 2 mètres de côté (figure 6).

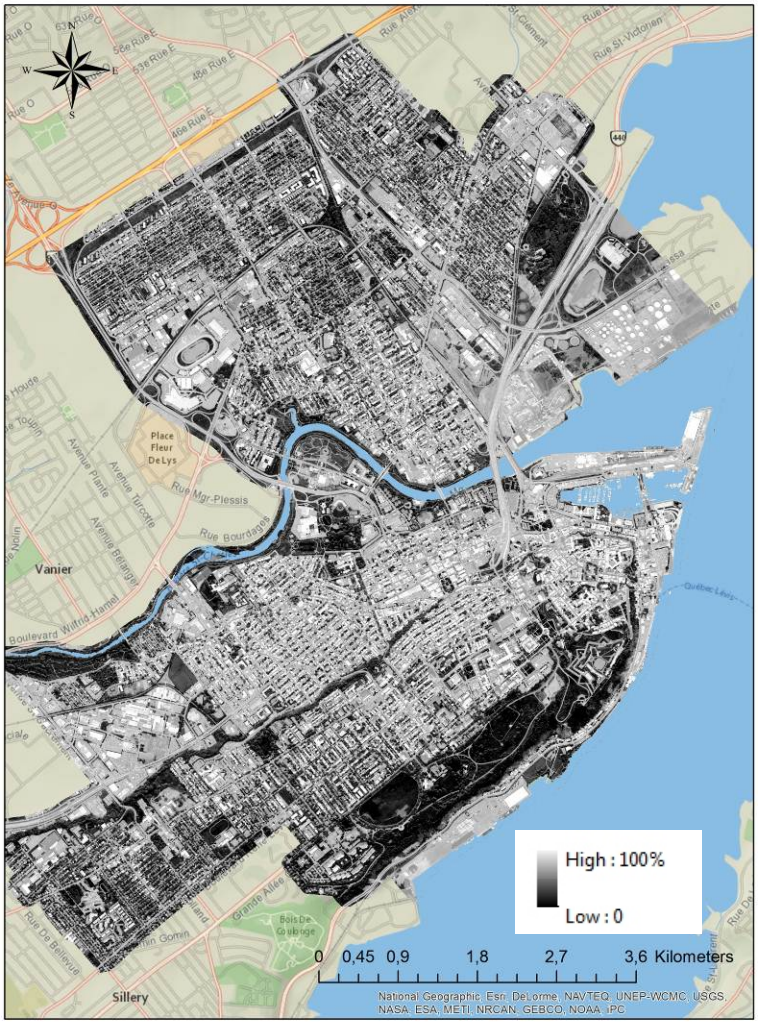


Figure 6. Carte de l'indice d'imperméabilité pour le secteur d'étude calculé à partir de l'image WorldView-2 (2 m)

5.4.4. Classification de l'occupation du sol

La ville de Québec a fourni des données d'un inventaire géoréférencé de l'ensemble des arbres du domaine public ainsi que les données descriptives relatives à ces arbres. Cet inventaire permet de localiser seulement les arbres du domaine public. En ce sens, un complément d'information devra être acquis afin de caractériser les arbres situés en terrain privé. Pour ce faire, une classification de la végétation à partir de notre image satellitaire à haute résolution sera effectuée. Cette dernière permettra de définir les caractéristiques principales de la végétation en place : le type de couvert forestier (feuillu, mélangé, résineux) ainsi que la densité des groupements d'arbres (dense, ouverte, clairsemée). Cette classification devra être validée lors de visites sur le terrain.

La classification de l'occupation du sol a été améliorée par rapport à celle utilisée par Kestens *et al.* (2011) et Boulfroy *et al*. (2012). Ainsi, alors que le modèle initial ne distinguait que l'eau, les zones de végétation denses et le reste (sol nu et bâti), le nouveau modèle considère cinq classes d'occupation du sol (tableau 2).

Tableau 2. Classes d'occupation du sol et catégories considérées

Nº	Classe	Signification
1	Zone urbaine pure	Chaussée, toits de maisons, d'édifices, de grandes surfaces, espaces de stationnement, pistes d'atterrissage[4], etc.
2	Zone urbaine mixte	Maisons et édifices avec présence d'arbres
3	Zone pelouse	Terrains de sport (golf, soccer, baseball, etc.), terrains ouverts, espaces gazonnés, etc.
4	Zone basse végétation	Parcs : jardins communautaires, aires récréatives, etc.
5	Forêt	Zones végétalisées dominées par les arbres

La classification de l'occupation du sol a été réalisée sur l'image WorlView-2. L'approche utilisée pour la classification du territoire est « le maximum de vraisemblance ». Cette méthode tient compte des fichiers de signature spectrale des bandes composites B2, B3 et B4. Le résultat est une image-thème sur laquelle se retrouvent les classes définies par les signatures (chaque classe est codée sous une valeur numérique). La classification par maximum de vraisemblance utilise le « seuil gaussien » défini dans chaque fichier signature pour déterminer si un pixel donné fait partie ou non d'une classe. Le seuil correspond au rayon (en unité d'écart-type) d'une hyperellipse et est assigné à la classe. Il est possible d'attribuer une importance différente à une classe, ce qui permet de résoudre le problème de recoupement entre celles-ci en favorisant une classe au dépend d'une autre. Si le pixel n'est associé à aucune classe, il est codé « non classé » et la valeur zéro lui est attribuée. On suppose que les classes ont une distribution gaussienne et que les signatures sont bien sélectionnées.

Afin d'évaluer la précision de la classification réalisée, une matrice de confusion peut être utilisée [18]. Pour chaque classe d'occupation du sol, elle indique le pourcentage de pixels de l'ensemble de référence qui se classe correctement ainsi que la répartition des pixels, dont la classe résultante

[4] Il s'est avéré que cette classe inclut, dans certains cas, des champs labourés sans végétation en raison de leur signature spectrale qui s'apparente à celle des zones urbaines pures.

qui diffère de la classe de référence. On peut ainsi analyser les sources de confusion entre les classes.

Pour ce faire, un échantillonnage aléatoire de 79 points de contrôle a été réalisé pour chaque classe d'occupation du sol localisée dans 4 secteurs différents (nord, sud, ouest et est) dans des zones de concentration d'au moins 9 pixels identiques et contigus. La validation visuelle a été réalisée avec l'image WorldView-2. L'analyse consistait à examiner l'affichage des erreurs de commission et d'omission et la précision de la classification globale. De ces pourcentages, une mesure de performance connue sous le nom de Kappa a été calculée [19].

L'indice de Kappa a été utilisé pour évaluer la précision de la classification sus-décrite adoptée. D'après Pontius (2000) [20], l'indice de Kappa (*k*) est utilisé pour valider et estimer la précision dans le schéma de classification de l'occupation du sol. Sa formule est la suivante :

$$P_0 - P_c / P_p - P_c \qquad (1)$$

- où P_0 est égal au pourcentage de classification des éléments de l'occupation du sol réel obtenu; il est égal au quotient de la somme des chiffres de la diagonale de la matrice par rapport au total du nombre d'observations;
- où Pc est l'estimation de la probabilité d'obtenir une classification correcte. Pour calculer Pc, on procède de la façon suivante : on réalise les produits marginaux des valeurs des colonnes et des rangées au niveau de chaque cellule de la matrice, puis la somme des valeurs de la diagonale divisée par le total des produits de chaque cellule de la matrice.

Ainsi, la formule (1) peut s'écrire :

$$k = P_0 - P_c / 1 - P_c \qquad (2)$$

Les valeurs de Kappa vont de -1 à 1; une valeur de zéro indique que l'effet de classification est à accord égal de chance, et une valeur de 1 indique une classification parfaitement efficace sans la contribution d'un accord de chance. Toute valeur négative indique une mauvaise classification dans laquelle un accord de chance est plus important que l'effet de classification. Par conséquent, une valeur Kappa de 0,75 ou plus indique un très bon classement [21]. Le tableau 3 contient la table de contingence complète des 5 classes d'occupation du sol pour l'ensemble des 4 secteurs choisis.

Tableau 3. Matrices de confusion pour chaque classe d'occupation du sol

	Points de contrôle pour la classe : **zone urbaine pure**			
	Zone urbaine pure	Non-zone urbaine pure	Total	Précision (%)
Zone urbaine pure	77	2	79	97
Non- zone urbaine pure	2	77	79	97
Total	79	79	158	

Erreur d'omission 3 %
Erreur de confusion 3 %
Précision totale 97 %
Kappa 0,95

	Points de contrôle pour la classe : **zone urbaine mixte**			
	Zone urbaine mixte	Non-zone urbaine mixte	Total	Précision (%)
Zone urbaine mixte	71	8	79	90
Non-zone urbaine mixte	8	71	79	90
Total	79	79	158	

Erreur d'omission 10 %
Erreur de confusion 10 %
Précision totale 90 %
Kappa 0,80

	Points de contrôle pour la classe : **zone pelouse**			
	Zone pelouse	Non-zone pelouse	Total	Précision (%)
Zone pelouse	70	9	79	89
Non-zone pelouse	9	70	79	89
Total	79	79	158	

Erreur d'omission 11 %
Erreur de confusion 11 %
Précision totale 89 %
Kappa 0,77

	Points de contrôle pour la classe : **zone basse végétation**			
	Zone basse végétation	Non-zone basse végétation	Total	Précision (%)
Zone basse végétation	75	4	79	95
Non-zone basse végétation	4	75	79	95
Total	79	79	158	

Erreur d'omission 5 %
Erreur de confusion 5 %
Précision totale 95 %
Kappa 0,90

	Points de contrôle pour la classe : **forêt**			
	Forêt	Non-forêt	Total	Précision (%)
Forêt	78	1	79	98
Non-forêt	1	78	79	98
Total	79	79	158	

Erreur d'omission 2 %
Erreur de confusion 2 %
Précision totale 98 %
Kappa 0,97

La précision moyenne de la classification globale était de 92 % pour l'ensemble des 5 classes d'occupation du sol choisies. Selon les résultats de classification, la classe « zone forêt » a une précision de classification moyenne de 98 %, avec seulement un point mal classé, tandis que la classe « zone pelouse » présente une faible précision de 89 %, où 9 points des 79 échantillons ont été mal classées. Ceci peut être expliqué par la présence d'ombre qui peut masquer l'information pour une classe donnée.

En utilisant l'indice de Kappa, dont la valeur moyenne est de 0,84, on peut conclure que les résultats de cette analyse sont statistiquement très satisfaisants.

5.5. ÉCHANTILLONNAGE

Un échantillonnage aléatoire stratifié dans chacune des 5 classes d'occupation du sol a été réalisé en considérant une distance minimale de 20 m entre 2 pixels échantillonnés, de manière à éviter la cooccurrence des points d'échantillonnage. Le but était de s'assurer que 2 pixels qui seraient associés au même pixel initial provenant de l'image WorldView, dont la taille est de 2,5 m (après ré-échantillonnage par un filtre gaussien 5x5) ne soient pas retenus. L'échantillonnage a été stratifié par classe d'occupation du sol. Finalement, 757 pixels ont été retenus pour l'élaboration du modèle de température de surface.

6. ÉLABORATION DU MODÈLE

L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé à l'aide du logiciel SAS 9.3.

6.1. PORTRAIT GÉNÉRAL DES VARIABLES UTILISÉES

Le portrait général des variables (moyenne, écart-type, minimum, maximum) pour les 757 points échantillonnés est présenté au tableau 4.

Tableau 4. Portrait général des variables

Variables[5]	ID	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Température de surface	LST	27.2	0.7	26.0	28.8
Distance par rapport à un cours d'eau (km)	D_EAU_KM	1.52	1.11	0.04	3.79
NDVI	NDVI	0.2754	0.2525	-0.6069	0.8191
Indice d'imperméabilité	PCT_IMPER	58.7	25.6	0.0	100.0
Classes d'occupation du sol	classif			1	5

6.2. VÉRIFICATION DE LA COLINÉARITÉ ENTRE LES VARIABLES

La colinéarité entre les variables a été évaluée à l'aide d'une matrice de corrélation de Pearson pour les variables continues (tableau 5).

La valeur seuil couramment utilisée pour établir la présence d'une colinéarité est un rho>0,70 (soit un R^2>0,50). Seuls le NDVI et l'indice d'imperméabilité des surfaces (IS) dépassent ce seuil. Cette corrélation était attendue puisqu'ils reflètent tous les deux un certain degré d'urbanisation. En effet, on s'attend à de fortes valeurs de NDVI et à de faibles valeurs d'IS en région peu urbanisée, et au contraire en milieu urbain. Par contre, plusieurs auteurs rapportent que la relation entre la température de surface et le NDVI est non linéaire (Yuan and Bauer, 2007). En effet, lorsque les valeurs de NDVI sont inférieures à 0,6 (moyen à faible), la relation entre le NDVI et la température de surface serait non significative. Sachant que l'on retrouve les valeurs de moins de 0,6 dans les secteurs plus urbanisés, il est proposé d'inclure dans le modèle

[5] L'échelle de certaines variables a été corrigée afin que les valeurs se situent entre 1 et 1000. Le facteur de correction est affiché entre parenthèses.

la variable de l'indice d'imperméabilité, qui apporterait une contribution au modèle dans les cas où le NDVI ne serait plus significatif.

Enfin, la vérification d'interactions potentielles entre l'indice d'imperméabilité et les autres variables oblige à considérer cet indice dans l'équation comme variable simple du modèle.

Dans le cas des classes d'occupation du sol, comme il s'agit de variables catégoriques, la colinéarité a été testée par analyse de variance avec chacune des variables continues. Après évaluation, aucune variable ne présentait une relation ayant un $R^2>0,50$. Les deux variables les plus corrélées à la classification de l'occupation du sol sont le NDVI (0,13) et le pourcentage d'imperméabilité (0,12).

Tableau 5. Présentation des valeurs de rho pour évaluer la colinéarité

Variables	LST	NDVI	PCT_IMPER	D_EAU_KM
LST	1	-0.52718	0.50698	-0.16624
NDVI	-0.52718	1	-0.93603	-0.20941
PCT_IMPER	0.50698	**-0.93603**	1	0.21649
D_EAU_KM	-0.16624	-0.20941	0.21649	1

6.3. CONSTRUCTION DU MODÈLE

La modélisation a été faite selon une approche par Anova. Un modèle complet incluant toutes les interactions a été testé puis les termes non significatifs ont été retirés un à un afin d'obtenir un modèle où seules les variables significatives ont été conservées.

La structure du modèle complet retenu est :

```
LST= NDVI + D_EAU_KM + CLASSIF
```

La variable PCT_IMPER et ses interactions n'étant pas significatives, elles ont été retirées du modèle final. Les coefficients associés à chaque variable dans le modèle final (Estimate) sont ceux présentés au tableau 6.

Tableau 6. Présentation des valeurs des coefficients pour les variables retenues dans le modèle final

Effets fixes	CLASSIF	Estimate	StdErr	DF	tValue	Probt
Intercept		27.5625	0.05855	750	470.77	<.0001
NDVI		-1.2411	0.07723	750	-16.07	<.0001
D_EAU_KM		-0.164	0.01692	750	-9.69	<.0001
CLASSIF	**1**	0.2265	0.0678	750	3.34	0.0009
CLASSIF	**2**	-0.00201	0.05994	750	-0.03	0.9732
CLASSIF	**3**	0.4818	0.06353	750	7.58	<.0001
CLASSIF	**4**	0.4547	0.05186	750	8.77	<.0001
CLASSIF	**5**	0	.	.	.	.

Parmi l'ensemble des variables explicatives testées, le NDVI et l'occupation du sol sont les paramètres qui semblent jouer un rôle majeur dans la prédiction de la température de surface, comme le montre la valeur de leur coefficient (champ Estimate).

L'homoscédasticité et la normalité des résidus ont été évaluées de manière graphique et aucune variable n'aurait bénéficié d'une transformation.

Le modèle obtenu a un pseudo R^2 (coefficient de détermination ou degré d'ajustement du modèle entre les valeurs prédites et observées) de 0,44 et un RMSE (erreur quadratique moyenne) de 0,75˚C.

7. VALIDATION DU MODÈLE

Le modèle théorique obtenu a été validé à partir de points d'échantillonnage non utilisés pour la construction du modèle (figure 7). Pour cela, des valeurs prédites ont été obtenues par itération pour l'ensemble des données de l'échantillon. À chaque itération, 90 % des données ont servi à prédire le 10 % restant utilisé pour la validation. La validation du modèle montre également un coefficient de corrélation (R^2) de 0,44 entre les valeurs observées et prédites. Quant à l'erreur quadratique moyenne (RMSE) de validation, elle est de 0,74˚C. La relation linéaire entre les valeurs observées et prédites présente une pente de 1 et une ordonnée à l'origine qui n'est pas significativement différente de zéro.

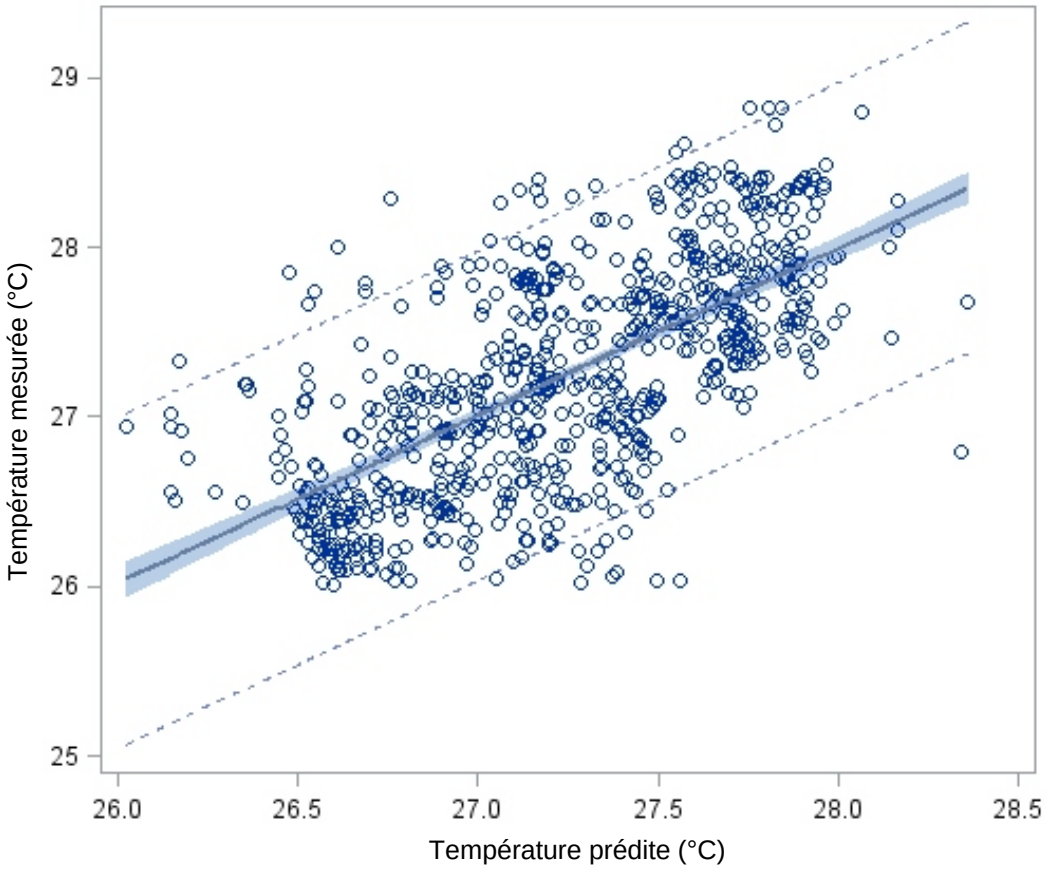


Figure 7. Température mesurée par les stations mobiles en fonction de la température prédite pour les 757 points d'échantillonnage utilisés lors de la construction du modèle

8. APPLICATION DU MODÈLE À L'ENSEMBLE DU TERRITOIRE D'ÉTUDE

8.1. DONNÉES WORLDVIEW UTILISÉES

Une image WorldView-2 a été utilisée pour couvrir l'ensemble du territoire d'étude. L'image WorldView-2 retenue a été, rappelons-le, acquise le 5 aout 2011 pendant la période où la végétation est en feuilles, et où il y a absence complète de nuages.

Cette image WorldView-2 présente donc l'avantage d'être beaucoup plus récente que les images SPOT-5 utilisées dans le modèle développé par Kestens *et al.* (2011) et Boulfroy *et al.* (2012), dont les années de prise d'image allaient de 1987 à 2010. Considérant que le paysage urbain change très vite, en particulier dans un contexte de développement domiciliaire important, l'utilisation d'images plus récentes constitue une grande amélioration de la cartographie des îlots de chaleur produite.

8.2. PRODUCTION D'UNE CARTE DE TEMPÉRATURES RELATIVES DE SURFACE

Pour chaque pixel des portions de la scène WorldView-2 couvrant le territoire d'étude, l'ensemble des variables explicatives a été calculé. Le modèle développé a ensuite été appliqué à chaque pixel et une cartographie de la température de surface prédite a ainsi été générée pour l'ensemble de la scène. La carte résultante de la température relative de surface permet de localiser, avec une précision aux 2 m près, les zones les plus chaudes (îlots de chaleur) et les zones les plus froides (îlots de fraîcheur) en milieu habité.

Étant donné que le modèle a été développé à partir des données de température mesurées à des dates différentes de la date d'acquisition de l'image satellitaire, il est essentiel de ne pas considérer la température prédite à l'échelle d'un pixel comme une valeur absolue, qui peut être comparée à celle de tous les autres pixels du territoire d'étude. La donnée de température prédite doit impérativement être considérée comme une valeur relative calculée au sein d'une même scène, permettant de distinguer les zones potentiellement les plus chaudes des zones potentiellement les plus fraîches.

8.3. DESCRIPTION DES PLAGES DE TEMPÉRATURE

8.3.1. Méthode utilisée

À l'échelle de la scène utilisée, cinq plages de températures relatives ont été définies, dans le but de distinguer les zones les plus fraîches (îlots de fraîcheur) des zones les plus chaudes (îlots de chaleur). Le seuillage utilise la méthode de Jenks du logiciel ArcGIS, qui est une méthode inductive consistant à choisir les seuils qui maximisent la variance interclasse et minimisent la variance intraclasse. Si la distribution comporte des discontinuités (zones de faible densité des valeurs), celles-ci seront nécessairement détectées par la méthode de Jenks, qui constitue une variante rigoureuse de la méthode bien connue des « seuils naturels ». Notons que plusieurs tests de nombres de plages ont été réalisés, de manière à comparer les éléments que l'on retrouve dans chaque plage. Le contenu de chaque plage de température provient d'une analyse visuelle de l'occupation du sol utilisant la bande panchromatique de l'image WorldView (50 cm) après l'application de la technique de *pan-sharpening* qui permet de fondre les 4 canaux couleur basse résolution (2 m) avec le canal panchromatique haute résolution pour obtenir une image couleur haute résolution (50 cm). Ces tests ont permis de confirmer que l'utilisation de 5 niveaux était le choix optimal pour définir les zones les plus chaudes correspondant à une concentration élevée de surfaces imperméables et recoupant les zones identifiées comme des îlots de chaleur dans l'analyse de Boulfroy *et al.* (2011), mais avec une précision plus fine. Avec un découpage en 5 plages, il est également apparu qu'il était possible de distinguer, parmi les 2 niveaux les plus frais, les zones boisées des zones végétalisées plus ouvertes.

D'autres méthodes de seuillage ont également été essayées (écart-type, intervalle égal, intervalle géométrique) mais n'ont pas été aussi concluantes que la méthode de Jenks.

8.4. CARTOGRAPHIE DE TEMPÉRATURE RELATIVE

La figure 8 présente le résultat de la cartographie de la température relative de surface au sol pour les secteurs de La Cité-Limoilou. En zoomant, on peut comparer, pour une même zone :

- b) l'ancienne cartographie des îlots de chaleur produite par Boulfroy *et al.* (2011) (b) sur a) fond d'images issues de Google Maps;
- c) la cartographie de températures de surface prédites à partir de l'image WorldView-2 (résolution spatiale à 2 m près).

On remarque que la nouvelle cartographie permet une caractérisation plus précise des îlots de chaleur que l'ancienne carte produite à partir des images SPOT-5. On remarque également que la cartographie de la température réelle issue des images SPOT-5 présente un portrait moyen de la température au sol, dont les nuances sont clairement visibles sur la carte issue de l'image WorldView-2.

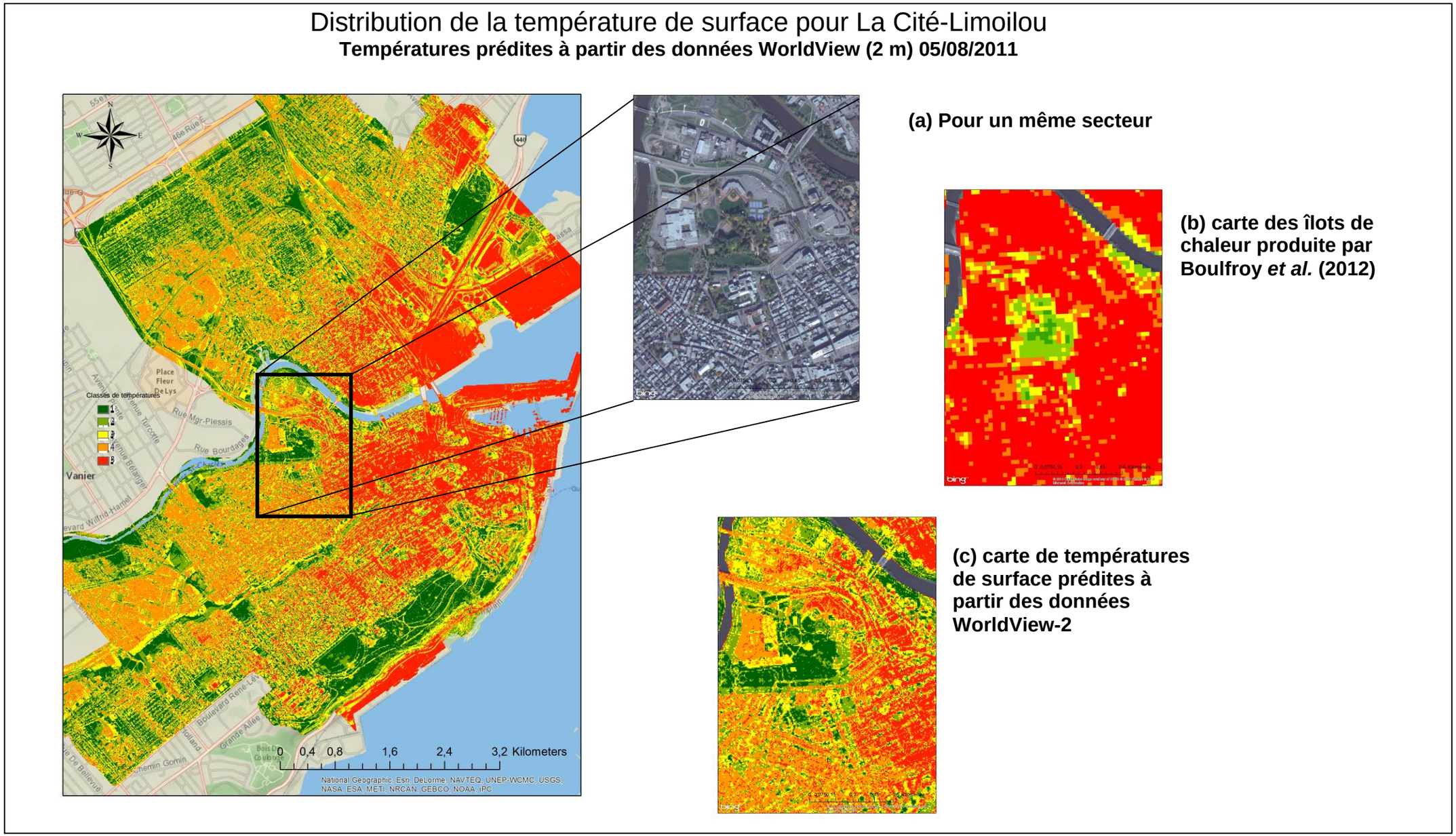


Figure 8. Carte de températures de surface pour La Cité-Limoilou, ville de Québec (carte générale et zooms)

9. BILAN DES LIMITES MÉTHODOLOGIQUES DE L'ÉTUDE

Le cadre méthodologique suivi pour l'élaboration du nouveau modèle de prédiction de la température de surface était très clairement défini au démarrage du projet et comportait certaines limites qui ont été acceptées comme un compromis satisfaisant; il s'agissait en effet d'adapter le modèle de Boulfroy *et al.* (2012) et de tester les mêmes variables que celles utilisées dans ce dernier, en utilisant une imagerie satellitaire à plus haute résolution que les images SPOT-5. **Les variables explicatives utilisées dans le nouveau modèle prédictif ont donc été choisies *a priori*, en se référant au modèle de Kestens *et al.* (2011).** L'amélioration du pouvoir prédictif du modèle de température devait provenir principalement de l'augmentation de la résolution du type d'image satellitaire utilisé.

De plus, il est essentiel de garder en tête que l'objectif poursuivi par ce modèle n'était pas de produire une cartographie précise de températures absolues, mais une **cartographie de températures relatives, permettant de localiser les zones potentiellement les plus chaudes et les plus fraîches.**

Dans ce contexte, il a été décidé de **ne pas normaliser la température issue des images Landsat**, qui a été utilisée comme variable dépendante dans le modèle prédictif. En effet, il n'y avait aucune certitude que le temps investi pour cet exercice aurait permis d'améliorer l'exactitude prédictive du modèle.

10. PISTES D'AMÉLIORATIONS POSSIBLES

Dans le contexte du projet actuel, dont l'objectif était de produire un outil opérationnel et utilisable pour toutes les municipalités du Québec, la carte produite à partir du nouveau modèle constitue une amélioration importante par rapport à la cartographie issue du modèle de Kestens *et al.* (2011) et de Boulfroy *et al.* (2012).

Certaines recherches ou certains essais n'ont pu être réalisés, étant donné les limites financières du projet. Dans un contexte qui serait davantage de l'ordre de la recherche, certaines améliorations pourraient être tentées, comme l'**utilisation de l'image panchromatique haute résolution (50 cm)** pour améliorer la résolution de l'image WorldView-2. Dans le cadre du présent travail, l'image panchromatique n'a pas été utilisée, en raison de l'importance du temps de traitement qu'elles impliquent. L'utilisation de cette donnée a par contre été testée pour la validation de la carte d'occupation du sol. Les résultats obtenus sont très encourageants et la carte de températures prédites a une résolution bien plus fine. L'utilisation d'une résolution de 50 cm peut donc améliorer significativement la classification des îlots de chaleur/fraîcheur à l'échelle des zones urbaines au Québec, mais implique un travail de traitement d'images supplémentaire non négligeable, lorsqu'il faut le réaliser à l'échelle de tout le Québec urbain.

11. RETOMBÉES SUR LE COLLÈGE

Le programme de Technologie forestière (190.B0) est offert au Cégep de Sainte-Foy et mène les étudiants qui s'y inscrivent à l'obtention d'un diplôme technique et à la profession de technologue forestier. Ces étudiants ont de plus en plus le besoin d'intégrer les nouvelles technologies dans leurs apprentissages en vue d'exercer leur futur métier. D'ailleurs, les cours « Géomatique forestière » et « Photo-interprétation forestière I et II » conduisent les étudiants à comprendre, assimiler et intégrer la cartographie forestière dans les différentes tâches qu'ils devront accomplir. Il sera donc possible d'effectuer le transfert des connaissances acquises dans ce projet à tous les étudiants du programme puisque ces cours sont obligatoires pour l'obtention du diplôme.

Puisque les sujets de la foresterie urbaine et de la télédétection sont très peu exploités dans le programme de Technologie forestière, deux activités sont planifiées afin d'initier les étudiants à ces notions par l'entremise des résultats du projet. La première activité consistera à introduire les étudiants aux notions fondamentales de télédétection à partir des images et des données obtenues grâce au projet. Le laboratoire d'une durée d'une heure trente permettra à l'étudiant d'acquérir des connaissances de base en télédétection et d'approfondir sa compréhension et ses habiletés avec un système d'information géographique. La seconde activité amènera les étudiants à intégrer ces nouvelles notions en travaillant sur un jeu de donnée et en appliquant la méthodologie développée dans le projet. La diffusion de ce projet alliant technologie novatrice et foresterie urbaine au sein du département aidera à l'avenir à générer un intérêt de la part des professeurs à intégrer ce volet dans les cours appropriés ou dans des activités périscolaires, permettant ainsi au plus grand nombre d'étudiants possible de prendre contact avec cette dimension de leur profession.

Le CERFO organise des « midis-conférences » en collaboration avec le Département des technologies du bois et de la forêt. Les résultats du projet seront présentés aux professeurs en foresterie du collège ainsi qu'aux autres chercheurs du CERFO à l'occasion de ces évènements.

Les résultats seront aussi présentés à l'ensemble de la communauté du Collège par le biais d'un court résumé et d'un lien menant au rapport technique qui sera diffusé sur le portail du Cégep, accessible par l'ensemble des employés et des étudiants, et sur l'hebdo du syndicat des professeurs du Cégep, destiné aux professeurs du Collège.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par le programme PART du ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport. Les auteurs tiennent à remercier le Pr. Richard Fournier de l'Université de Sherbrooke et Emmanuelle Boulfroy, chercheuse au CERFO, pour leur expertise et assistance technique, et le Dr. Onil Bergeron et son équipe pour les données météorologiques recueillies *in situ* par leurs stations mobiles.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Agence de santé et des services sociaux de Montréal. Chaleur accablante - Prévenir les problèmes de santé reliés à l'environnement. [En ligne] http://www.santepub-mtl.qc.ca/Environnement/chaleur/ (page consultée le 14 mars 2011).

[2] Giguère, M. 2009. Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains – Revue de littérature. Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels. Institut national de santé publique du Québec, juillet 2009. 77 pages.

[3] Brahe, P. 1974. Kliatische Auswirkungen von Gehölzen auf umbauten Stadtplätzen. Das Gartenamt 2/74 :61-70 (tiré de Streiling, S., Matzarakis, A. 2003).

[4] Bernatzky, A. 1979. Grünflachen und Klima. DBZ-Forschung und Praxis. 080 DBZ 8/79: 1205-1209 (tiré de Streiling, S., Matzarakis, A. 2003).

[5] Oke, T.R. 1989. The micrometeorology of the urban forest. Phil. Trans. R. Soc. Lond. 324:335-349.

[6] Kiese, O. 1995. Die bioklimatische Funktion innerstädtischer, insbesondere baumbestandener Grünflächen. Verhandlungen der Gesellschaft für ökologie 24: 395-401 (tiré de Streiling, S., Matzarakis, A. 2003).

[7] Amt für Umweltschutz. 1999. Klima-Messungen im Plangebiet Stuttgart 21- Eine Analyse thermisch induzierter Ausgleichsströmungen an innerstädtischen Grünnanlangen. Landeshauptstadt Stuggart, Amt für Umweltschutz, Abt. Stadtklimatologie, Stadklima Sttgart, Chapter 1-7 (tiré de Streiling, S., Matzarakis, A. 2003). [En ligne] www.stadtklima.de/stuttgart/websk21/Heft12/kap1.HTM

[8] Nowak, D.J. 2005. The effects of urban trees on air quality. USDA Forest Service. [En ligne] http://home.earthlink.net/~colonelbleep/data/EX%20BB%20-%20THE%20EFFECTS%20OF%20URBAN%20TREES%20ON%20AIR%20QUALITY.pdf (page consultée le 15 mars 2011).

[9] Huang, J., H. Akbari, H. Taha, and A. Rosenfeld. 1987. The potential of vegetation in reducing summer cooling loads in residential buildings. J. Clim. Appl. Meteorol. Vol. 26: 1103-1106.

[10] Myrup, L.O., C.E. McGinn, and R.G. Flocchini. 1993. An analysis of microclimatic variation in a suburban environment. Atmos. Environ. 27B: 129-156.

[11] Simpson, J.R., D.G. Levitt, C.S.B. Grimmond, E.G. McPherson, and R.A. Rowntree. 1994. Effects of vegetative cover on climate, local scale evaporation and air conditioning energy use in urban southern California, pp. 345-348. *In* 11th Conference on Biometeorology and Aerobiology, March 7-11, 1994, San Diego, CA, American Meteorological Society.

[12] Scott, K.I., J.R. Simpson, and E.G. McPherson. 1999. Effects of tree cover on parking lot microclimate and vehicle emissions. Journal of Arboriculture, vol. 25 (3) (mai 1999) p. 129-142. [En ligne]. http://joa.isa-arbor.com/articles.asp?JournalID=1&VolumeID=25&IssueID=3 (page consultée le 15 mars 2011).

[13] Johnston, J. and J. Newton. 2004. Building green: A guide to using plants on roofs, walls and pavements. Major of London - Greater London Authority. [En ligne] http://static.london.gov.uk/mayor/strategies/biodiversity/docs/Building_green.rtf (page consultée le 15 mars 2011).

[14] Bolund, P. and S. Hunhammar. 1999. Ecosystem services in urban areas. Ecological Economics, vol. 29, no 2 (mai 1999): p. 293-301.

[15] Vergriete, Y. et M. Labrecque. 2007. Rôles des arbres et des plantes grimpantes en milieu urbain : revue de littérature et tentative d'extrapolation au contexte montréalais. Rapport d'étape, 22 p.

[16] Kestens, Y., A. Brand, M. Fournier, S. Goudreau, T. Kosatsky, M. Maloley and A. Smargiassy. 2011. Modelling the variation of land surface temperature as determinant of risk of heat-related health events. International Journal of Health Geographics, 10 (7), 8 p.

[17] Boulfroy, E., J. Khaldoune, F. Grenon, R. Fournier et B. Talbot. 2012. Conservation des îlots de fraîcheur urbains - Description de la méthode suivie pour identifier et localiser les îlots de fraîcheur et de chaleur. CERFO et Université de Sherbrooke. Rapport 2012-11b. 36 pages.

[18] Story, M. and Congalton, R.G. 1986. Accuracy assessment: A user's perspective. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 52: 397-399.

[19] Bishop, Y.M.M., S.E. Fienberg and P.W. Holland. 1975. Discrete Multivariate Analysis: Theory and Practice, MIT Press, Cambridge, UK.

[20] Pontius Jr., R.G. 2000. Quantification error versus location in comparison of categorical maps. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 66 (8): 1011-1016.

[21] Montserud, R.A. and R. Leamans. 1992. Comparing global vegetation maps with the Kappa statistic. Ecological Modelling, vol. 62 (4): 275-293.

ANNEXE

Pour les 757 échantillons, nous avons appliqué des traitements statistiques. Les tableaux présentés montrent le résultat de l'analyse du modèle mixte. L'objectif était de vérifier la corrélation des différentes variables explicatives afin de développer un modèle prédictif de température de surface. L'analyse des résidus a été appliquée pour s'assurer que leur moyenne égale à 0. Une analyse de variance (ANOVA) de la température du sol pour les différentes variables retenues a été effectuée pour toutes les classes d'occupation du sol. L'objectif était d'évaluer si une différence existait entre les différentes variables retenues pour le développement du modèle. Le niveau de confiance des tests a été fixé à 0,05. Les résultats indiquent un effet très significatif de l'indice de végétation (NDVI) et de la distance par rapport à l'eau sur les mesures de températures.

Tableaux tirés du logiciel SAS 9.3

Modèle global

The Mixed Procedure

Model Information	
Data Set	WORK.DONNEES
Dependent Variable	temp_model
Covariance Structure	Diagonal
Estimation Method	REML
Residual Variance Method	Profile
Fixed Effects SE Method	Model-Based
Degrees of Freedom Method	Residual

Class Level Information

Class	Levels	Values
CLASSIF	5	1.00000000000 2.00000000000 3.00000000000 4.00000000000 5.00000000000

Dimensions	
Covariance Parameters	1
Columns in X	8
Columns in Z	0
Subjects	1
Max Obs Per Subject	757

Number of Observations	
Number of Observations Read	757
Number of Observations Used	757
Number of Observations Not Used	0

Covariance Parameter Estimates	
Cov Parm	**Estimate**
Residual	0.2412

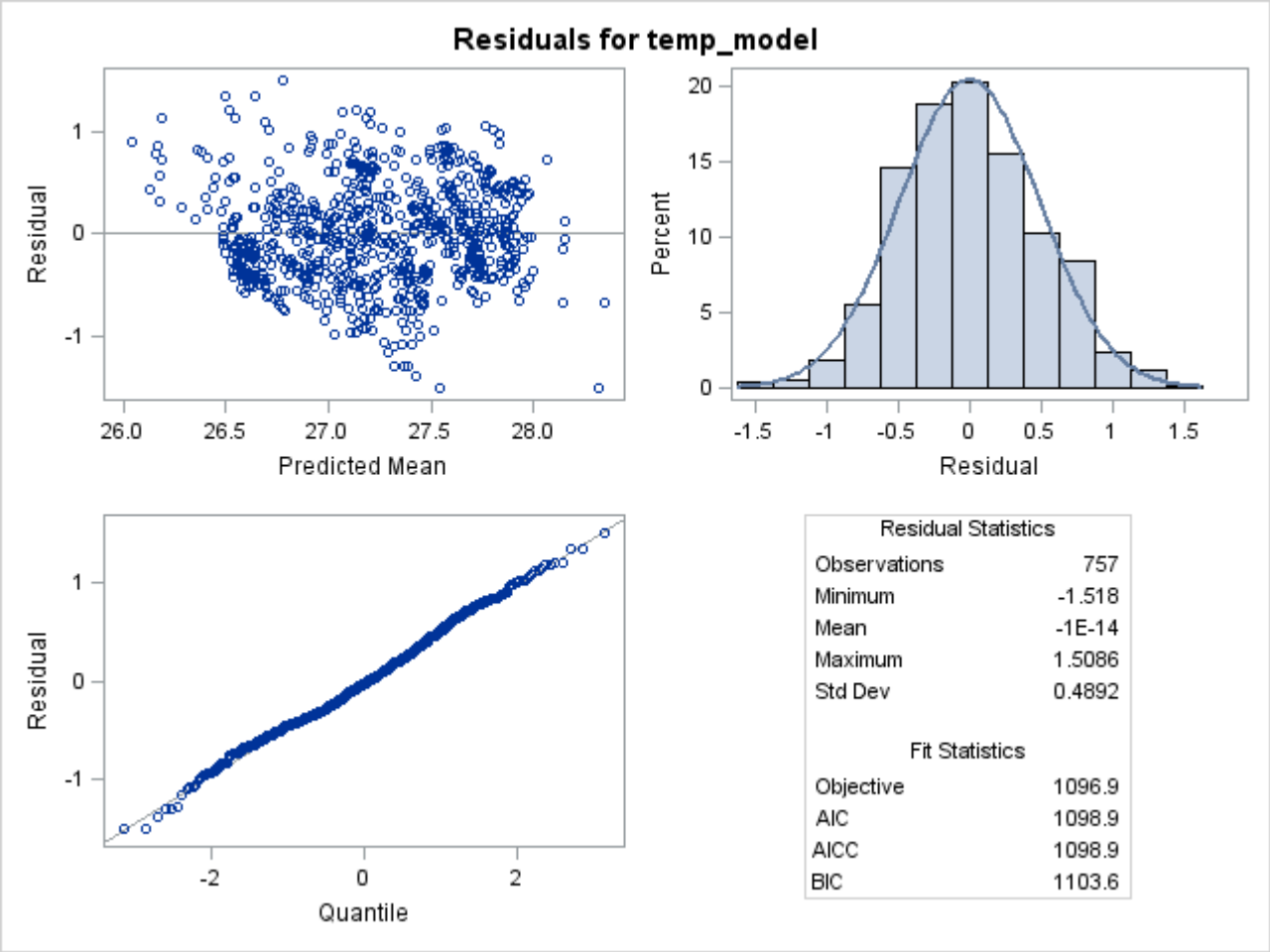
Fit Statistics	
-2 Res Log Likelihood	1096.9
AIC (smaller is better)	1098.9
AICC (smaller is better)	1098.9
BIC (smaller is better)	1103.6

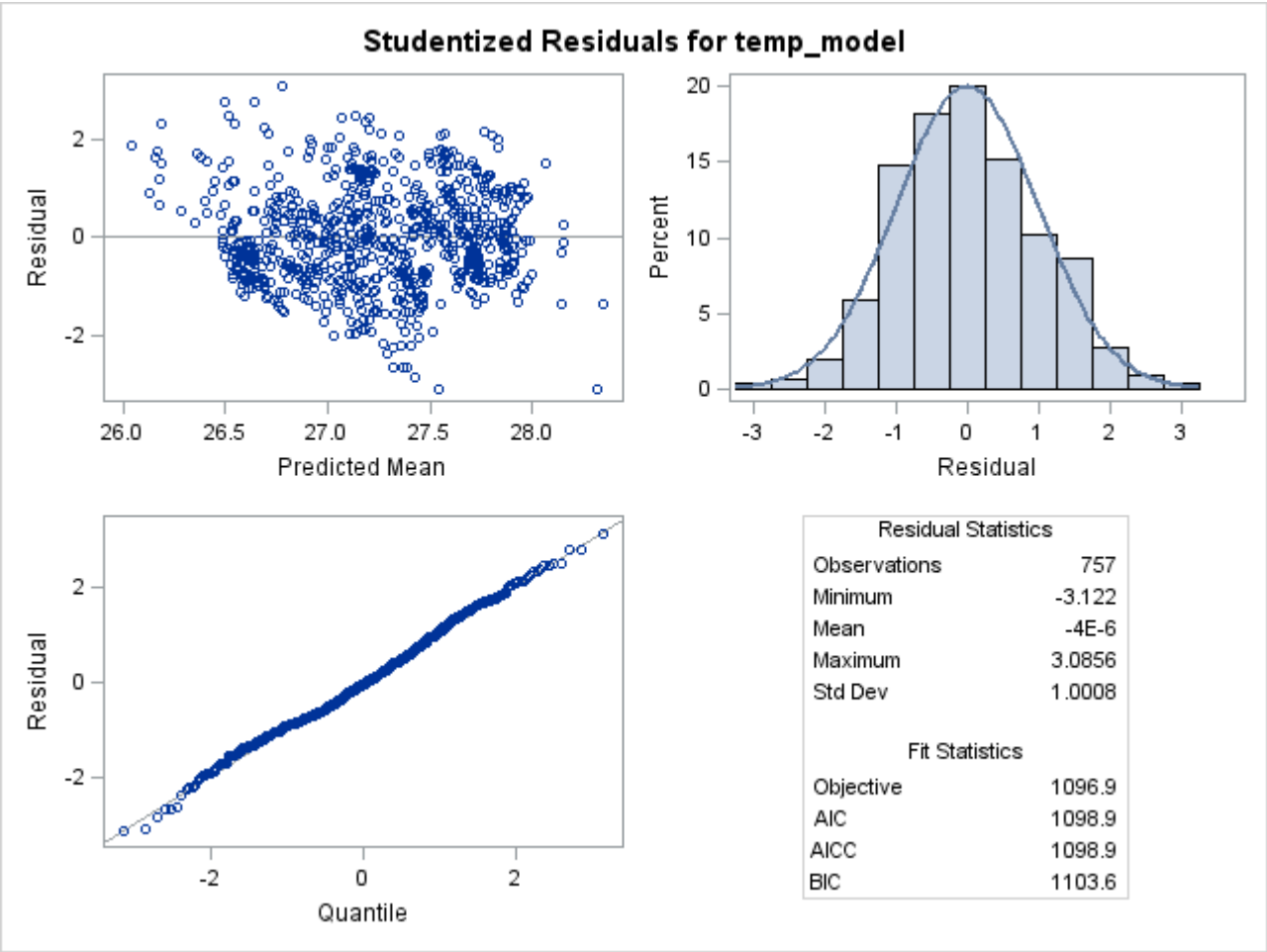
Solution for Fixed Effects

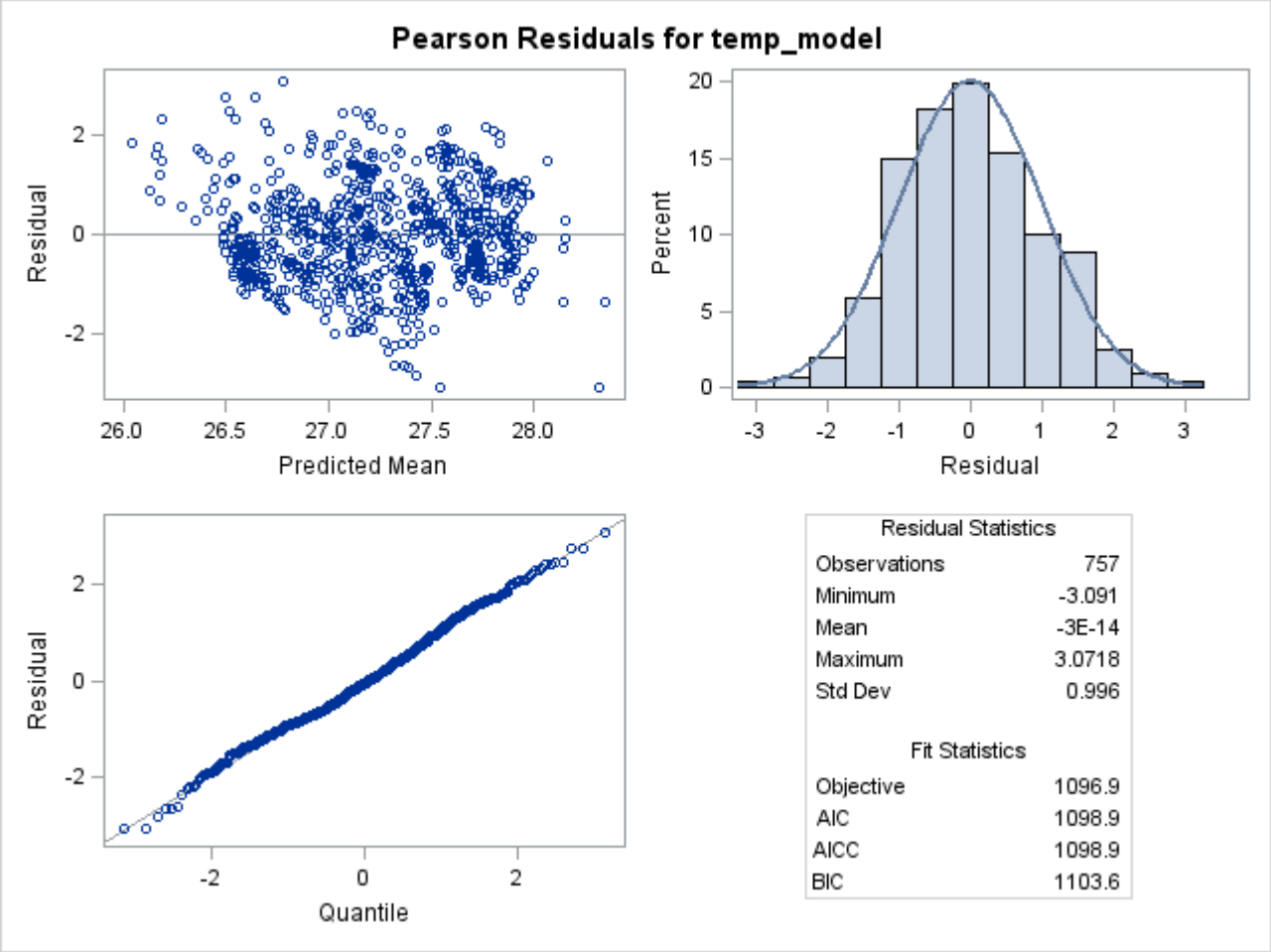
Effect	CLASSIF	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > |t|
Intercept		27.5625	0.05855	750	470.77	<.0001
NDVIPRJ		-1.2411	0.07723	750	-16.07	<.0001
CLASSIF	**1.00000000000**	0.2265	0.06780	750	3.34	0.0009
CLASSIF	**2.00000000000**	-0.00201	0.05994	750	-0.03	0.9732
CLASSIF	**3.00000000000**	0.4818	0.06353	750	7.58	<.0001
CLASSIF	**4.00000000000**	0.4547	0.05186	750	8.77	<.0001
CLASSIF	**5.00000000000**	0	.	.	.	.

Solution for Fixed Effects						
Effect	**CLASSIF**	**Estimate**	**Standard Error**	**DF**	**t Value**	**Pr > |t|**
D_EAU_KM		-0.1640	0.01692	750	-9.69	<.0001

Type 3 Tests of Fixed Effects				
Effect	**Num DF**	**Den DF**	**F Value**	**Pr > F**
NDVIPRJ	1	750	258.22	<.0001
CLASSIF	4	750	32.06	<.0001
D_EAU_KM	1	750	93.92	<.0001




Studentized Residuals for temp_model
Residual
Predicted Mean
Percent
Residual
Residual
Quantile
Residual Statistics
Observations 757
Minimum -3.122
Mean -4E-6
Maximum 3.0856
Std Dev 1.0008
Fit Statistics
Objective 1096.9
AIC 1098.9
AICC 1098.9
BIC 1103.6


Pearson Residuals for temp_model
Residual
Predicted Mean
Percent
Residual
Residual
Quantile
Residual Statistics
Observations 757
Minimum -3.091
Mean -3E-14
Maximum 3.0718
Std Dev 0.996
Fit Statistics
Objective 1096.9
AIC 1098.9
AICC 1098.9
BIC 1103.6

r carré modèle

The REG Procedure
Model: MODEL1
Dependent Variable: Temp Temp

Number of Observations Read	757
Number of Observations Used	757

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	149.02400	149.02400	621.97	<.0001
Error	755	180.89685	0.23960		
Corrected Total	756	329.92085			

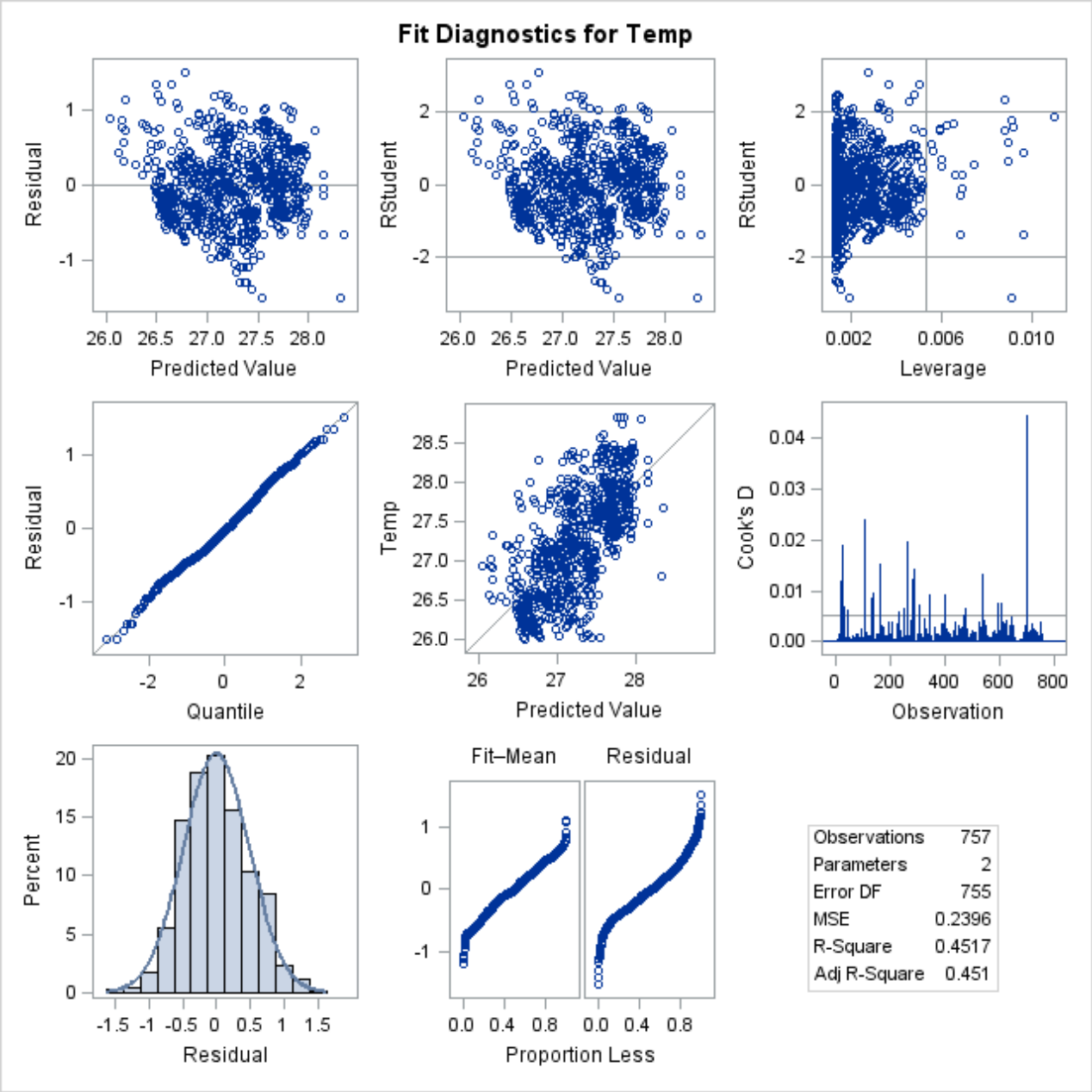
Root MSE	0.48949	**R-Square**	0.4517
Dependent Mean	27.23877	**Adj R-Sq**	0.4510
Coeff Var	1.79703		

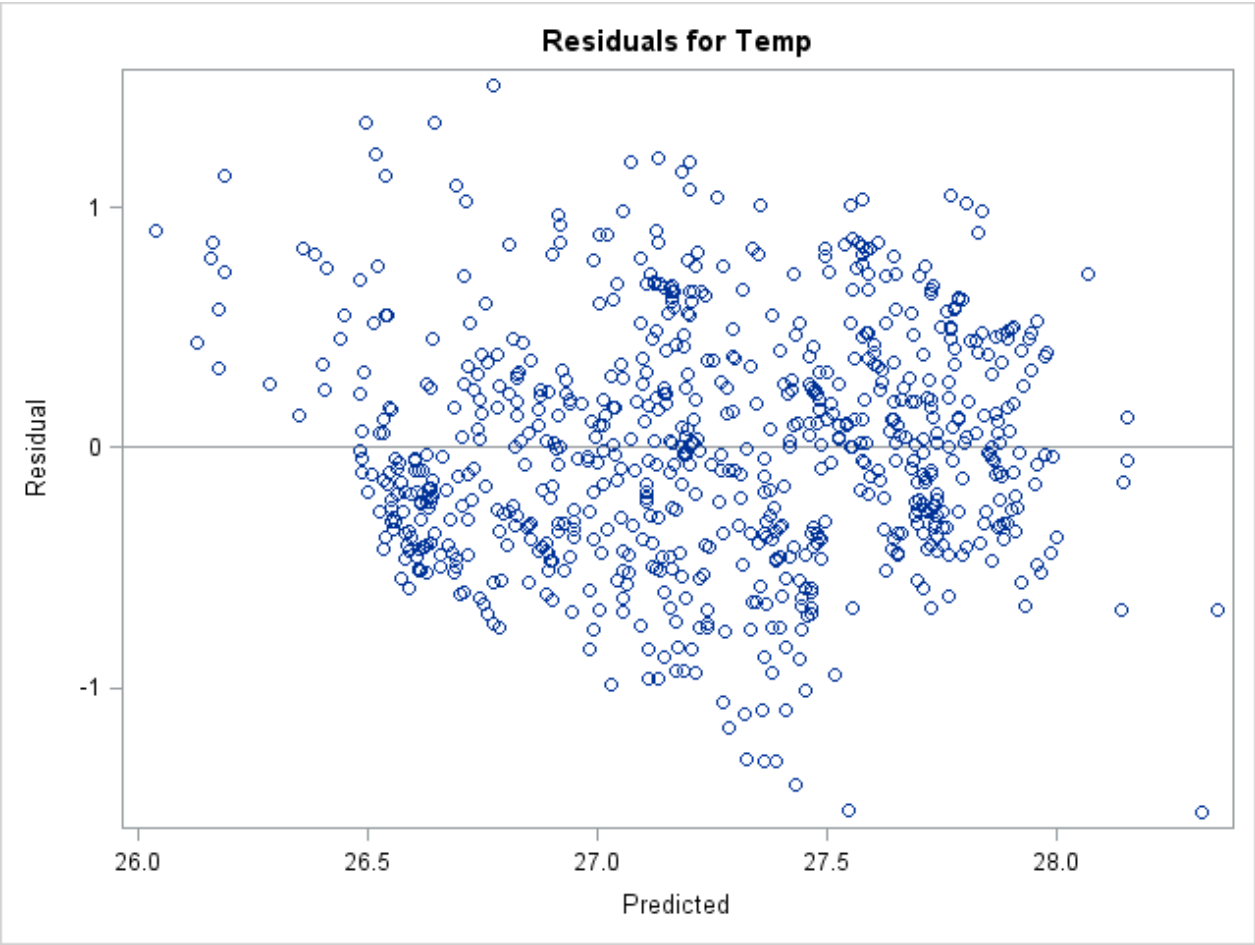
Parameter Estimates

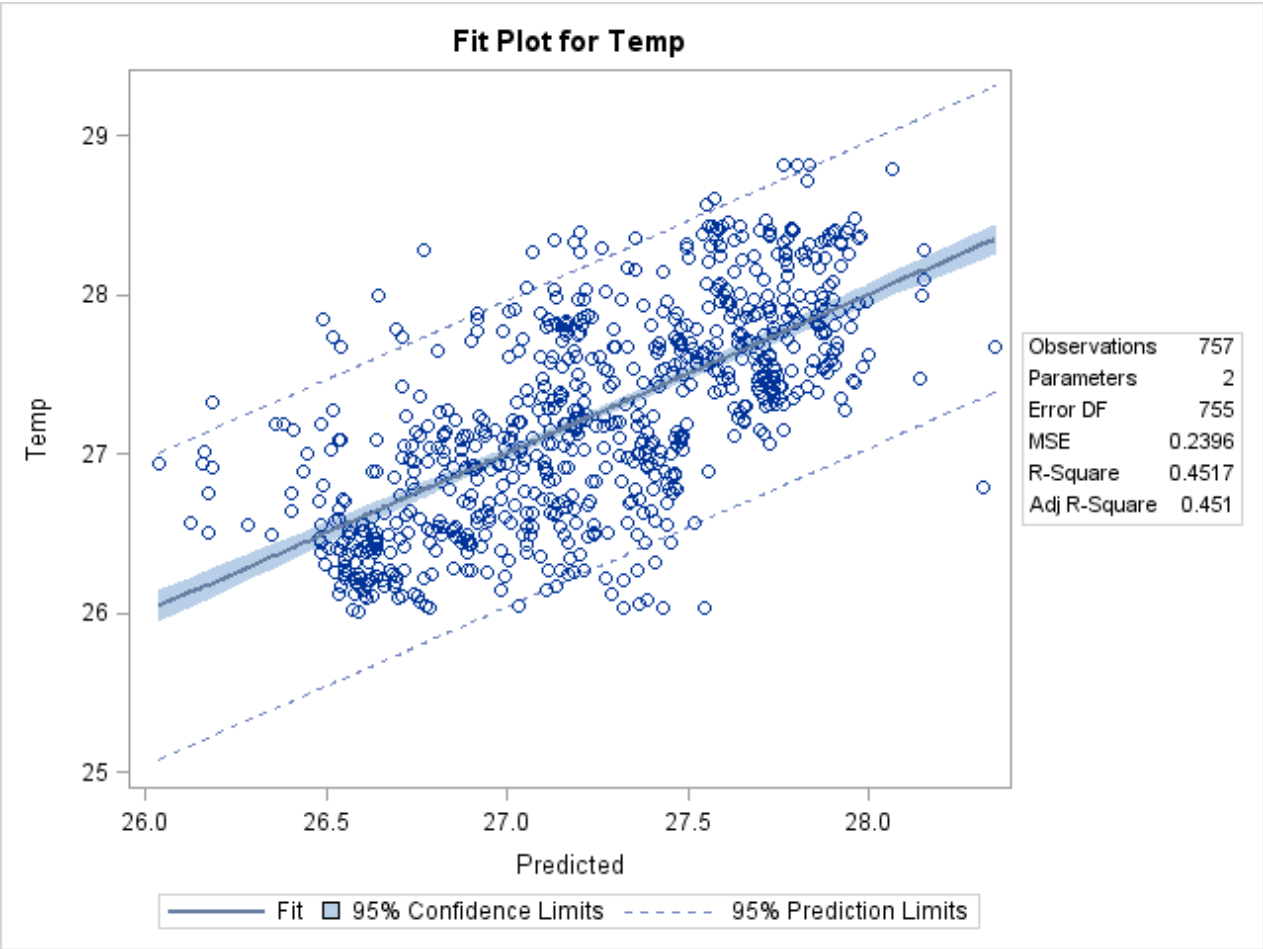
Variable	Label	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr > |t|
Intercept	Intercept	**1**	-8.8249E-11	1.09234	-0.00	1.0000
Pred	Predicted	**1**	1.00000	0.04010	24.94	<.0001

r carré modèle

The REG Procedure
Model: MODEL1
Dependent Variable: Temp Temp




Residuals for Temp
Residual
1
0
-1
26.0
26.5
27.0
27.5
28.0
Predicted


Fit Plot for Temp
Temp
29
28
27
26
25
26.0
26.5
27.0
27.5
28.0
Predicted
Observations 757
Parameters 2
Error DF 755
MSE 0.2396
R-Square 0.4517
Adj R-Square 0.451
Fit
95% Confidence Limits
95% Prediction Limits

r carré validation

The REG Procedure
Model: MODEL1
Dependent Variable: temp_valid

Number of Observations Read	757
Number of Observations Used	757

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	145.40293	145.40293	594.95	<.0001
Error	755	184.51792	0.24439		
Corrected Total	756	329.92085			

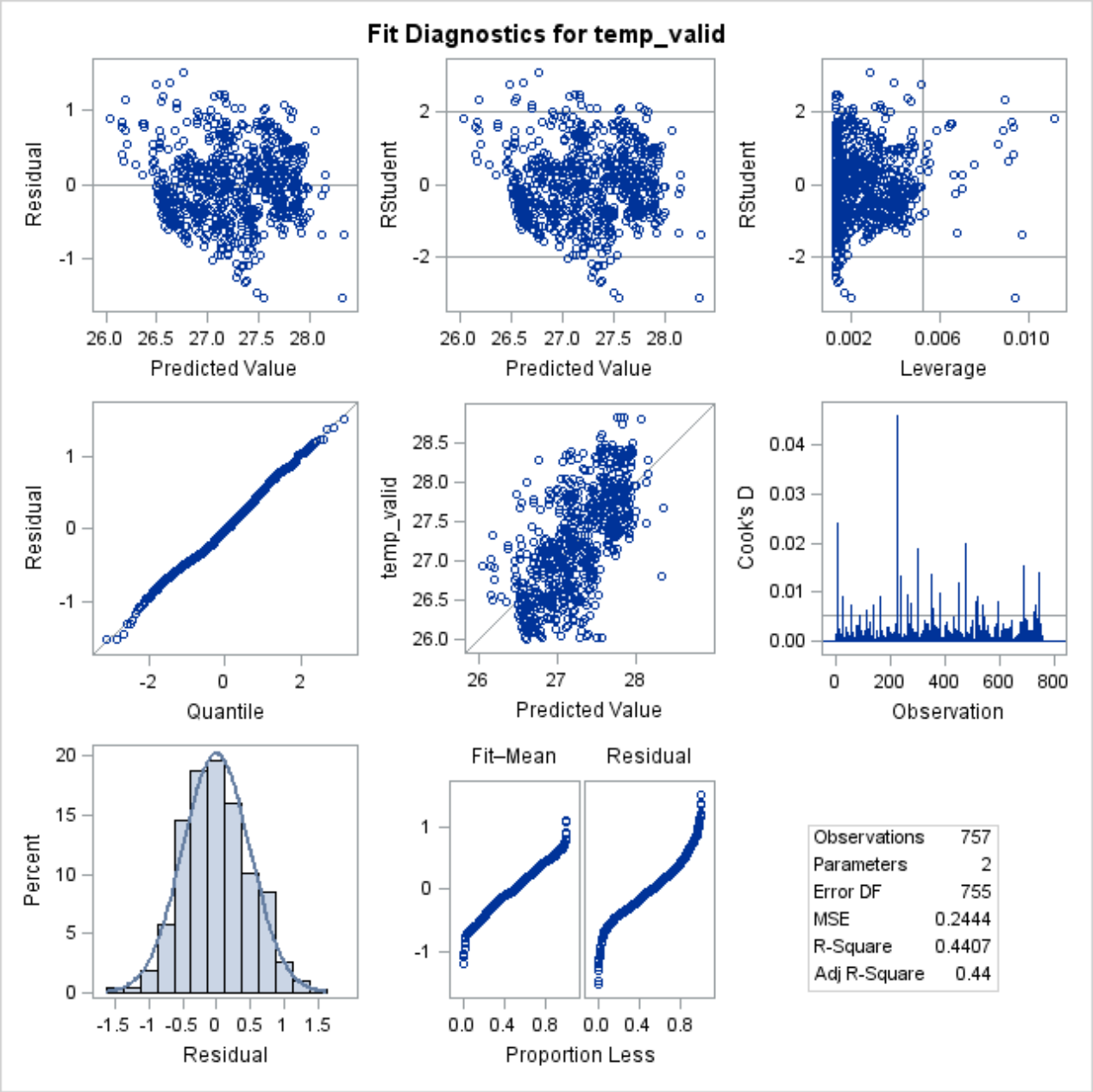
Root MSE	0.49436	**R-Square**	0.4407
Dependent Mean	27.23877	**Adj R-Sq**	0.4400
Coeff Var	1.81492		

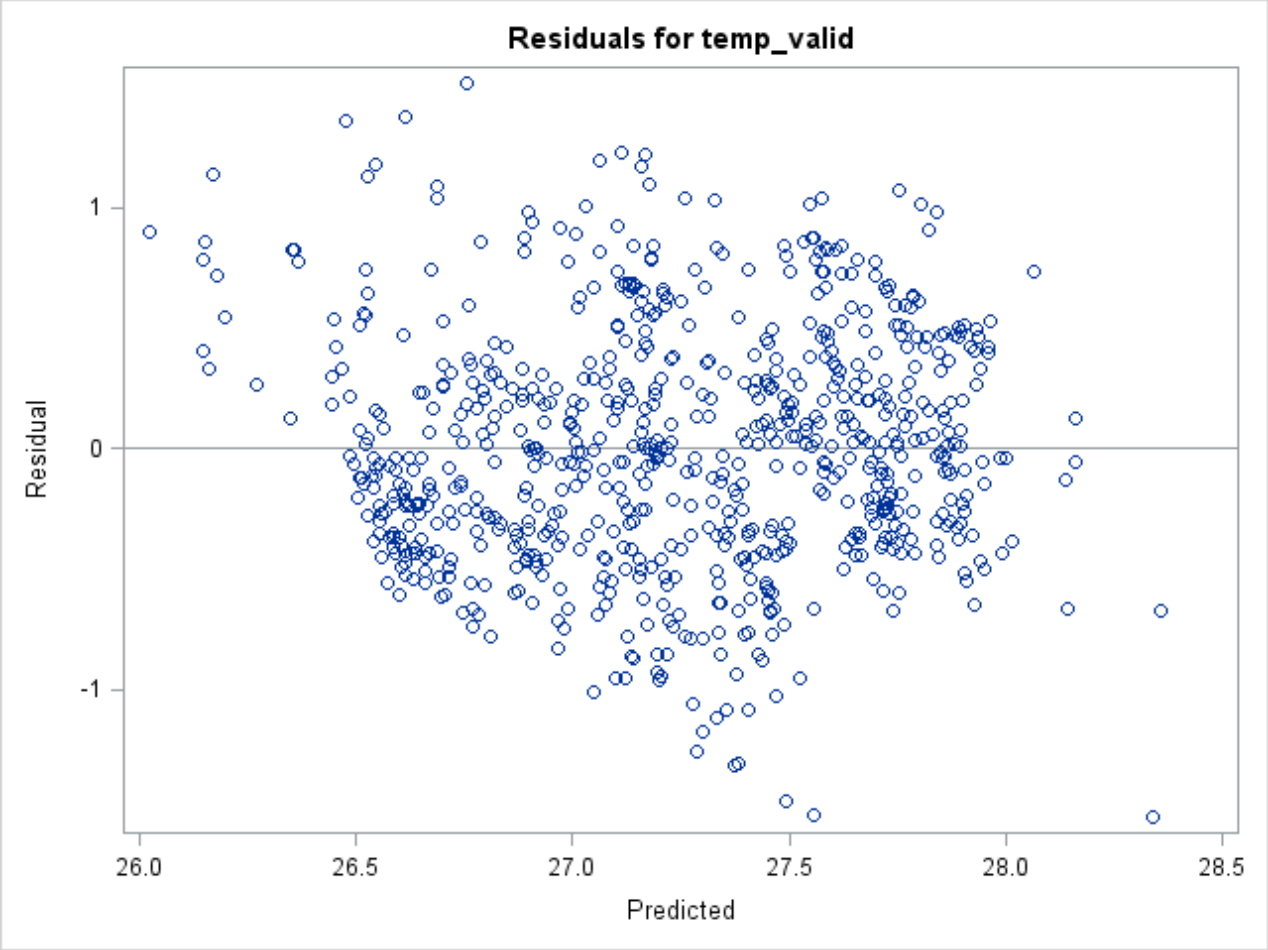
Parameter Estimates

Variable	Label	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr > |t|
Intercept	Intercept	**1**	0.35828	1.10218	0.33	0.7452
Pred	Predicted	**1**	0.98685	0.04046	24.39	<.0001

r carré validation

The REG Procedure
Model: MODEL1
Dependent Variable: temp_valid




Residuals for temp_valid
Residual
1
0
-1
26.0
26.5
27.0
27.5
28.0
28.5
Predicted

Fit Plot for temp_valid
temp_valid
29
28
27
26
25
26.0
26.5
27.0
27.5
28.0
28.5
Predicted
Observations 757
Parameters 2
Error DF 755
MSE 0.2444
R-Square 0.4407
Adj R-Square 0.44
Fit
95% Confidence Limits
95% Prediction Limits