

Titre: Développement d'approches de télédétection thermique multi-échelles et de modélisation pour l'évaluation des systèmes d'écoulement d'eau souterraine au sein des eskers
Title:

Auteur: Brahim Maylal
Author:

Date: 2020

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Maylal, B. (2020). Développement d'approches de télédétection thermique multi-échelles et de modélisation pour l'évaluation des systèmes d'écoulement d'eau souterraine au sein des eskers [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal].
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/5447/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/5447/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Éric Rosa, & Vincent Cloutier
Advisors:

Programme: Génie minéral
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

et

l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

**Développement d'approches de télédétection thermique multi-échelles et de
modélisation pour l'évaluation des systèmes d'écoulement d'eau souterraine au
sein des eskers**

BRAHIM MAYLAL

Département de Génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maitrise ès sciences appliquées*

Génie minéral

Août 2020

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

et

l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Ce mémoire intitulé:

Développement d'approches de télédétection thermique multi-échelles et de modélisation pour l'évaluation des systèmes d'écoulement d'eau souterraine au sein des eskers

Présenté par : **Brahim MAYLAL**

Pour un mémoire en vue de l'obtention du diplôme de *Maitrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Thomas PABST, président

Eric ROSA, membre et directeur de recherche

Vincent CLOUTIER, membre et codirecteur de recherche

John MOLSON, membre externe

DÉDICACE

*Je suis de ceux qui pensent que la science est d'une grande
beauté. Un scientifique dans son laboratoire est non
seulement un technicien : il est aussi un enfant placé
devant des phénomènes naturels qui l'impressionnent
comme des contes de fées.*

Marie Curie :Physicienne, Scientifique (1867 - 1934)
A ma famille, mes amis et mes professeurs

REMERCIEMENTS

Mes sincères remerciements à mon directeur et co-directeur de recherche, Eric Rosa et Vincent Cloutier pour leur excellent encadrement, leur disponibilité et leurs encouragements et soutien durant ma maîtrise.

Je remercie également mes professeurs à l'UQAT ainsi que les membres du Groupe de Recherche sur l'Eau Souterraine (GRES) d'Amos pour leur implication, leur disponibilité et leur gentillesse, spécifiquement Pierre-Luc Dallaire, Daniel Blanchette et Magalie Roy.

Mes remerciements vont également à Hélène Lavoie, Dany Charon et Olivier Pitre pour leurs amples encouragements et à tous les membres de l'administration de l'UQAT et des services aux étudiants pour le suivi des dossiers et la simplification des procédures.

Je remercie aussi tous mes ami(e)s du Campus d'Amos avec qui j'ai partagé de bons moments le long de ma maîtrise. Comme je remercie mes amis au Maroc qui étaient toujours avec moi malgré la distance.

Merci à mes chers amis Mohamed Edahbi, Abhishek Mani Tripathi, Monique Lemay, et Florent Dion pour leur accueil chaleureux et leurs disponibilités.

Je remercie le ministère des Affaires Municipales et de l'Habitation du Québec ainsi que le ministère de l'Environnement et de la Lutte Contre les Changements Climatiques du Québec pour le financement de ce projet.

Et pour finir, un remerciement spécial à toute ma famille qui n'ont cessé de m'encourager et de me soutenir dans tous mes projets.

RÉSUMÉ

Cette étude vise le développement d'une approche combinée de la télédétection thermique multi-échelles et de la modélisation thermique pour la délimitation des zones d'exfiltration des eaux souterraines et l'estimation de la profondeur de la nappe d'eau souterraine au sein des formations fluvioglaciaires de la région boréale de l'Abitibi-Témiscamingue. Les approches développées s'appuient sur l'hypothèse voulant que les eaux souterraines peu profondes sont susceptibles d'influencer la température du sol et de la végétation et que ces caractéristiques peuvent être mesurées par télédétection.

Des données satellitaires associées à la bande 10 du satellite *Landsat 8* ayant une résolution spatiale (30 m x 30 m) ont été employées pour le calcul de la température de surface (ci-après LST pour *Land Surface Temperature*) à l'échelle régionale. La température de surface a été calculée selon la loi de Planck grâce à l'utilisation d'une application (*open source plugin*) disponible dans le logiciel QGIS. Les zones associées à certaines anomalies thermiques détectées par l'approche satellitaire ont subséquemment été ciblées pour l'acquisition de données à haute résolution. Une zone associée à un site d'extraction de sable et de gravier où les sols inorganiques étaient observés à différentes élévations au-dessus de la nappe d'eau souterraine a aussi été ciblée pour l'acquisition d'images à haute résolution. Des expériences consistant en l'exécution de vols à intervalles réguliers de 2h00 (entre 6h00 et 22h00) ont de surcroît été réalisées afin d'évaluer les variations journalières de LST au niveau d'une zone d'exfiltration connue et du site d'extraction de sable et de gravier. Les 42 vols réalisés en septembre 2019 et juin 2020 ont permis la collecte de 4000 images thermiques d'une résolution spatiale ≤ 0.1 m. Les données acquises ont fait l'objet de classifications s'appuyant sur l'outil de statistiques spatiales « *Grouping Analysis* » du logiciel ArcGIS pour assurer l'identification des anomalies thermiques en réduisant la subjectivité qui peut être associée à l'analyse visuelle (qualitative) des images. Des modèles 1D construits dans les composantes *SEEP/W* et *TEMP/W* du logiciel *GeoStudio* ont ultimement été développés afin d'établir une évaluation quantitative (mathématique) de l'influence de la profondeur de la nappe sur la température des sols inorganiques au sein des formations fluvioglaciaires.

Les résultats de LST calculés à partir de données satellitaires ont permis la cartographie thermique des eskers de la région. Ces résultats ont également permis le calcul de TVDI (*Temperature Vegetation Dryness Index*) à l'échelle des formations fluvioglaciaires. La classification des

données de TVDI par *Grouping Analysis* et la comparaison avec des données issues d'études antérieures ont révélé que l'imagerie thermique satellitaire présente un fort potentiel pour l'identification des zones d'exfiltration d'eau souterraine. Les données à haute résolution acquises au niveau d'une zone d'exfiltration d'eau souterraine ont permis d'identifier de petits cours d'eau qui présentent une température plus froide et plus stable que les composantes de surface périphériques. Ces petits cours d'eau sont selon toute vraisemblance alimentés par l'eau souterraine, laquelle présente une température généralement plus froide et plus stable que l'eau de surface lors de la période estivale. Les données à haute résolution acquises au niveau d'un site d'extraction de sable et gravier ont pour leur part permis la cartographie thermique des sols situés à différentes élévations au-dessus de la nappe d'eau souterraine. Les données ont révélé que les sols situés plus près de la nappe d'eau souterraine présentent une température plus froide et plus stable que les sols des secteurs où la nappe d'eau souterraine est plus profonde. Ces données ont été confrontées à des simulations 1D réalisées dans *SEEP/W* et *TEMP/W* afin de fournir une évaluation quantitative de l'influence de la profondeur de la nappe d'eau souterraine sur la température du sol. Les résultats des simulations ont été jugés cohérents avec les mesures de télédétection thermique à haute résolution. Les simulations ont de surcroît permis l'évaluation de l'influence de la vitesse du vent, de la température de l'air, et de la végétation sur la température du sol.

Sur le plan scientifique, l'étude contribue au développement d'approches de télédétection applicables à l'identification des zones d'exfiltration aux marges des formations fluvioglaciaires (eskers et moraines) et à l'étude de l'effet de la profondeur de la nappe phréatique sur la température de surface pour des sols inorganiques. L'étude présente un fort potentiel d'application, notamment pour les vastes régions difficiles d'accès, comme c'est le cas notamment pour le nord du Québec et le reste du Canada. Sur le plan sociétal, les approches développées ici présentent un potentiel intéressant pour la cartographie des zones d'exfiltration d'eau souterraine et des écosystèmes dépendants de l'eau souterraine en vue d'intégrer ces zones aux plans d'aménagement du territoire pour assurer leur protection.

ABSTRACT

This study focuses on the development of combined multi-scale thermal remote sensing and modeling approaches for delineating groundwater exfiltration zones and estimating groundwater depth in glaciofluvial formations of the Abitibi-Témiscamingue boreal region. The approaches developed here rely on the hypothesis that shallow groundwaters are likely to influence soil and vegetation temperatures, and that these parameters can be measured by remote sensing.

Landsat 8 (band 10) satellite data with a resolution of 30 x 30 m were used to retrieve regional-scale land surface temperatures (LSTs). LST values were calculated based on Planck's equation, using an open source QGIS plugin. Specific areas associated with thermal anomalies shown on satellite data were subsequently targeted for the acquisition of high-resolution images. A sand and gravel extraction site characterized by soils located at different elevations above the water table was also targeted for high-resolution data acquisition. These zones were studied using a *Zenmuse XT2* high-resolution camera mounted on a *DJI Matrice 200* drone. Further experiments consisting of repeated flights conducted at 2h intervals (between 6h00 AM and 22h00) were also carried out in order to measure daily variations in LST in a groundwater exfiltration zone and at a sand and gravel extraction site. The 42 flights allowed for collecting 4 000 images with a spatial resolution of ≤ 0.1 m. These flights were programmed using the *DJI GS PRO* software, ensuring a 90% spatial overlap between images. This overlap is required for georeferencing and mosaicking multispectral and thermal images using *Pix4Dmapper*. The data were organized using the *Grouping Analysis* spatial statistics tool in *ArcGIS* in order to allow for identifying thermal anomalies based on an objective approach, instead of relying only on the subjective visual inspection of the images. Numerical 1D models were further developed using the *TEMP/W* and *SEEP/W* components of the *GeoStudio* software in order to provide a quantitative evaluation of the influence of groundwater depth on the LST of glaciofluvial formations.

The LST results calculated from satellite data allowed for mapping LST at the scale of the study region. These results further allowed for the calculation of the *Temperature Vegetation Dryness Index* (TVDI) at the scale of glaciofluvial formations. The Grouping Analysis procedure conducted on the TVDI results and its comparison with results from previous studies revealed that thermal remote sensing presents a high potential for the identification of groundwater exfiltration zones. The high-resolution data collected in a known groundwater exfiltration zone allowed for

identifying small streams presenting a colder and more stable temperature than surrounding surface objects. These small streams are most likely fed by the discharge of groundwater, the latter presenting a colder and more stable temperature than surface waters during the summer. The high-resolution data collected within a sand and gravel extraction site allowed for mapping the LST of inorganic soils located at different elevations above the groundwater table. The data revealed that soils located closer to the groundwater table present a surface temperature that is colder and less variable than that of soils located further from the water table. These data were compared to 1D models constructed using *SEEP/W* and *TEMP/W* in order to provide a quantitative evaluation of the influence of groundwater depth on LST. The simulation results were considered to be consistent with remote sensing LST data. The simulations further allowed for evaluating the influence of air temperature, wind speed and vegetation height on LST.

From a scientific perspective, this study contributes to the development of remote sensing approaches presenting a high potential for hydrogeological studies. Such approaches are critically needed in vast and remote areas such as northern Quebec and else where in Canada. From a societal standpoint, the approaches developed here present a high potential for mapping groundwater exfiltration zones and associated groundwater dependent ecosystems (GDE). Such information is needed in order to better protect groundwater and GDE in the context of land use planning.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIX
LISTE DES ANNEXES	XXII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte et problématique	1
1.2 Objectifs	3
1.3 Hypothèses de recherche.....	4
1.4 Contenu du mémoire	4
1.5 Contribution scientifique et originalité du projet	5
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	6
2.1 Télédétection par imagerie satellitaire	6
2.1.1 Satellites disposant de bandes thermiques	7
2.1.1.1 NOAA (<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>)	7
2.1.1.2 Satellite <i>Terra</i>	8
2.1.1.3 Le satellite Landsat TM, ETM+, OLI & TIRS	10
2.1.2 Principe de la télédétection thermique	11
2.1.2.1 Résolution spectrale, radiométrique, spatiale et thermique.....	13

2.1.2.2	Chaine de traitement des images IRT satellitaires	14
2.1.3	Prétraitement des images thermiques <i>Landsat</i> TM et ETM+	17
2.1.3.1	Algorithme <i>mono-window</i> pour l'extraction de la température	17
2.1.3.2	Algorithme single-channel	18
2.1.3.3	Calcul de l'émissivité par la méthode NDVI	20
2.1.3.4	Méthode d'extraction de la température.....	21
2.1.4	Indices d'humidité de sol et détection d'eau par la télédétection	22
2.1.4.1	Indices d'humidité des sols se basant sur l'IR	22
2.1.4.2	Indices d'humidité des sols se basant sur l'IRT (exemple TVDI)	23
2.2	Télédétection thermique à haute résolution	24
2.2.1	Systèmes aéroportés	25
2.2.1.1	Aéronefs avec pilote à bord.....	26
2.2.1.2	Aéronefs téléguidés	27
2.2.1.3	Les caméras thermiques	29
2.2.2	Acquisition et traitement des images	31
2.2.2.1	Critères optimaux d'acquisition des images thermiques	31
2.2.2.2	Traitement des images thermiques	33
2.2.2.2.1	Géoréférencement	33
2.2.2.2.2	Mosaïquage	35
2.2.2.2.3	Correction du vignettage	35
2.2.2.3	Algorithmes de classification et détermination des anomalies	36
2.2.2.3.1	Méthode supervisée	36
2.2.2.3.2	Méthodes non supervisées	37
2.2.2.3.3	Méthodes de classification orientées objet.....	37

2.2.2.3.4	La méthode de classification par Grouping Analysis	38
2.3	Mesures thermiques <i>in-situ</i>	39
2.3.1	Généralité sur les sondes thermiques et les fibres optiques	39
2.3.1.1	Sondes thermiques.....	40
2.3.1.2	Fibre optique (DTS-FO).....	41
2.3.2	Traitement et cartographie des données <i>in situ</i>	43
2.3.2.1	Méthodes d'interpolation spatiale	43
2.3.2.1.1	Pondération inverse à la distance (IDW)	44
2.3.2.1.2	Spline	44
CHAPITRE 3	MATERIEL ET METHODES	47
3.1	Région d'étude et sites pilotes.....	47
3.2	Imagerie thermique satellitaire.....	53
3.2.1	Source des données	53
3.2.2	Calcul des températures de surface	54
3.2.3	Cartographie thermique des eskers	55
3.2.4	Identification des zones d'exfiltration d'eau souterraine	56
3.2.5	Cartographie thermique de sols inorganiques affleurant.....	58
3.3	Imagerie thermique haute résolution.....	59
3.3.1	Acquisition des données de terrain.....	59
3.3.2	Traitement des données.....	62
3.3.3	Variations thermiques spatiotemporelles sur l'esker SMB (Absence du sol inorganique)	63
3.3.4	Variations thermiques spatiotemporelles à la gravière de Malartic	65
3.4	Modélisation numérique.....	65

3.4.1	Contexte des démarches réalisées	65
3.4.2	Conception du modèle.....	67
CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION.....		70
4.1	Imagerie thermique satellitaire.....	70
4.1.1	Cartographie thermique des eskers	70
4.1.1.1	Variations spatiales	70
4.1.1.2	Variations temporelles.....	73
4.1.2	Identification des zones d'exfiltration d'eau souterraine	77
4.1.3	Cartographie thermique des sols inorganiques affleurants	79
4.2	Imagerie thermique haute résolution.....	81
4.2.1	Variations thermiques spatiotemporelles sur l'esker SMB	81
4.2.2	Variations thermiques spatiotemporelles à la gravière de Malartic	92
4.3	Modélisation numérique.....	94
4.3.1	Scénarios théoriques.....	94
4.3.2	Application de la modélisation à des sols inorganiques affleurants.....	97
4.4	Synthèse	100
CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		104
RÉFÉRENCES		106
ANNEXES		120

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: La résolution spatiale des bandes MODIS	10
Tableau 2.2: Valeur de transmittance en fonction de la vapeur d'eau et de la température d'air.	18
Tableau 2.3: Formules de calcul des indices NDWI, NDMI, MNDWI, WRI, NDVI et AWEI...	23
Tableau 2.4: Trois types de krigeage employés dans les approches SIG.....	44
Tableau 2.5: Méthodes semi-norme de lissage (Siu-Ngan Lam, 2013).....	45
Tableau 3.1: Scènes du Landsat 8 de l'année 2017 utilisées dans ce projet.....	54
Tableau 3.2: Paramètres des vols automatisés par l'application <i>DJI GS Pro</i>	60
Tableau 3.3: Sommaire des vols réalisés dans le cadre du projet	61
Tableau 3.4: Valeur des paramètres hydrogéologiques et thermiques employées dans le modèle	69
Tableau 4.1: Paramètres associés aux différents scénarios modélisés. Z nappe : profondeur de la nappe d'eau souterraine sous la surface du sol; RS : radiation solaire estimée par TEMP/W pour un point de coordonnées géographiques correspondant à la zone d'étude, à une date connue; TA : température de l'air; VV : vitesse du vent; HV : hauteur de la végétation au-dessus du sol; HR : humidité relative de l'air; EN : épaisseur de la neige au sol.	95

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Secteurs du Québec méridional couverts par le PACES. Les zones en blanc représentent les projets complétés entre 2009 et 2015, et celles rayées sont les projets en cours de réalisation (Larocque <i>et al.</i> , 2018).....	1
Figure 1.2: Localisation des projets d'acquisition de connaissances sur l'eau souterraine réalisés en Abitibi-Témiscamingue (tirée de Cloutier <i>et al.</i> (2016))......	2
Figure 2.1: Schéma du satellite GOES1 (Menzel et James, 1994).....	8
Figure 2.2: Le système de contrôle et de calibrage de l'imageur MODIS (Xiong <i>et al.</i> , 2005). ..	10
Figure 2.3: Contribution du Landsat à la télédétection spatiale à l'échelle terrestre (Williams <i>et al.</i> , 2006).....	11
Figure 2.4: Principe d'acquisition d'un rayonnement par un capteur thermique (Torgersena <i>et al.</i> , 2000).....	12
Figure 2.5: Spectre électromagnétique (Visible/IR) (Vollmer et Möllmann, 2018)	12
Figure 2.6: Comparaison entre une image A) AGURAM caractérisée par une résolution spatiale de 15 m et une image B) MODIS ayant une résolution spatiale de 1 km. (Abrams <i>et al.</i> , 2015)	13
Figure 2.7: Schéma modifié de traitement des données satellitaires IRT (Tavares <i>et al.</i> , 2019)..	15
Figure 2.8: Schéma de traitement des images IRT des satellites Landsat ETM+ et MODIS pour la restitution de la température du lac Mangueira (Tavares <i>et al.</i> , 2019).....	16
Figure 2.9: Schéma d'extraction de la température du Landsat TM et ETM+ (Alipour <i>et al.</i> , 2003)	17
Figure 2.10: Définition de TVDI (Sandholt <i>et al.</i> , 2001).....	24
Figure 2.11: Hiérarchie de suivi de phénomène terrestre (A) satellite, (B) par avion, (C) drone et (D) <i>in situ</i> (Ferrara <i>et al.</i> , 2017)	25
Figure 2.12: A) module de capteur NCG B) avion Cessna 172 (McCaul <i>et al.</i> , 2016)	26
Figure 2.13: Hiérarchie de suivi des exfiltrations (détection, reconnaissance et identification) par trois plates-formes (satellite, hélicoptère et drone) (Ferrara <i>et al.</i> , 2017)	27

Figure 2.14: Orthomosaïque et MNT acquises par drone <i>DJI phantom2 quadcopter</i> (Harvey et Luketina, 2014).	28
Figure 2.15: Schéma des composants d'un drone (Daponte <i>et al.</i> , 2017).....	28
Figure 2.16: Comparaison des images thermiques prises par a) avion b) drone (Lee <i>et al.</i> , 2016)	29
Figure 2.17: Schéma d'un détecteur microbolomètre (FLIR, 2011).....	30
Figure 2.18: Schéma des modules d'un capteur microbolomètre (Sosnowski <i>et al.</i> , 2018)	31
Figure 2.19: Prises de vue thermiques de la rivière Urbash et de la plaine inondable Sandey pendant différentes heures de la journée (Cardenas <i>et al.</i> , 2014)	32
Figure 2.20: Température de la rivière Urbash et du roc avec la variation des radiations solaires et du débit (Cardenas <i>et al.</i> , 2014)	33
Figure 2.21: Équations de passage de système de coordonnées images au système de coordonnées spatial (ESRI, 2020)	34
Figure 2.22: Schéma de mosaïquage par approche géométrique (Yuhua <i>et al.</i> , 2016).....	35
Figure 2.23: Exemple de correction de vignettage a) image originale b) filtre d'anti-vignettage c) image résultante (Lelong <i>et al.</i> , 2008).....	36
Figure 2.24: Processus de classification Orientée-Objet (Veljanovski <i>et al.</i> , 2011)	38
Figure 2.25: Montage d'une sonde thermique pour la collecte des mesures <i>in situ</i> (McCaul <i>et al.</i> , 2016).....	41
Figure 2.26: Schéma de mesure de la température par DTS-FO (Failleau <i>et al.</i> , 2017).....	41
Figure 2.27: Schéma de l'utilisation des DTS pour le suivi du changement de la température entre deux puits par pompage et réinjection de l'eau chaude (Macfarlane <i>et al.</i> , 2002)	42
Figure 2.28: Comparaison des méthodes d'interpolation spatiale a) données brutes avec découpage par diagramme de voronoi b) méthode de krigeage c) méthode IDW et d) méthode <i>spline</i> (Modifiée de Mitas et Mitasova, 2005).....	46
Figure 3.1: Région d'étude (Thibaudeau et Veillette, 2005).....	48

Figure 3.2: Schéma conceptuel de l'environnement hydrogéologique d'un esker d'Abitibi-Témiscamingue (adapté de Nadeau et al., 2015)	49
Figure 3.3: Représentation du domaine d'application des approches méthodologiques retenues	51
Figure 3.4: Site pilote 1 – Esker Saint-Mathieu / Berry (Thibaudeau et Veillette, 2005).....	52
Figure 3.5: Site pilote 2 – Site d'extraction de sable et gravier de Malartic / Rivière-Héva (GRES-UQAT et SESAT, 2013)	53
Figure 3.6: Schéma d'analyse spatiale des intersections des groupes de classifications et des zones tampons des exfiltrations.....	57
Figure 3.7: Schéma de traitement des images satellitaires thermiques pour la détermination des zones de vol par drone.....	58
Figure 3.8: Schéma de traitement des SG par approche thermique. A) Histogramme de la température en juin. B) Histogramme de la température en septembre. C) la différence des températures entre juin et septembre.....	59
Figure 3.9: a) Drone DJI Matrice 200, b) Caméra DJI Zenmuse XT2, c) Contrôleur de commandes	60
Figure 3.10: Schéma de traitement des images acquises par drone pour la détermination des anomalies froides.....	64
Figure 3.11: Conception de la combinaison de la télédétection thermique multi-échelle et de la modélisation (A) Représentation satellitaire avec calcul de TVDI, (B) Représentation de données thermiques par drone avec résultat de classification GA, (C) Schéma conceptuelle des scénarios de modélisation selon différentes profondeur de la nappe d'eau souterraine	67
Figure 3.12: Architecture du modèle réalisé par combinaison de SEEP/W et TEMP/W	68
Figure 3.13: (A) Relation entre la conductivité thermique et la teneur en eau volumique, (B) Capacité thermique massique en fonction de la teneur en eau volumique.....	69
Figure 4.1: Cartographie des valeurs de LST et TVDI calculées pour les formations fluvioglaciaires de l'Abitibi.	71

Figure 4.2: Valeurs de LST calculées en septembre 2017 pour la zone de l'esker Saint-Mathieu / Berry dans le secteur d'Amos	72
Figure 4.3: La variation de la moyenne des températures des échantillons surfaciques sur l'esker SMB (Zone pilote) pendant l'année 2017.....	74
Figure 4.4: Comparaison des valeurs de LST calculées au niveau de l'esker Saint-Mathieu / Berry dans le secteur d'Amos sous l'effet de la saisonnalité.	75
Figure 4.5: Calcul de TVDI pour des extraits des images de 1) septembre, 2) juin et 3) janvier, 2017 pour un tronçon de l'esker Saint-Mathier / Berry	76
Figure 4.6: Calcul de TVDI pour des extraits des images de 1) septembre, 2) juin et 3) janvier, 2017	76
Figure 4.7: Analyse des groupes d'anomalies thermiques en fonction des intersections avec les exfiltrations du PACES-AT1 et de la surface couverte.....	78
Figure 4.8: Distribution spatiale des valeurs de TVDI associées au groupe 2 évalué par l'approche de <i>Grouping Analysis</i>	78
Figure 4.9: Les histogrammes de la température de juin, septembre et de la différence ainsi que le résultat du filtre permettant de retenir les pixels ayant une température faible pour les deux dates.....	80
Figure 4.10: Comparaison des valeurs de LST calculées pour les sols inorganiques affleurants en juin et septembre 2017 avec les profondeurs de nappes calculées par Nadeau. S. <i>et al.</i> (2015)	80
Figure 4.11: Localisation des 14 zones retenues pour l'acquisition d'images à haute résolution	81
Figure 4.12: Synthèse des données thermiques haute résolution acquises au niveau de l'esker Saint-Mathieu / Berry.	82
Figure 4.13: Valeurs de LST calculées pour les vols à intervalles réguliers du 7 août 2019.....	84
Figure 4.14: La variation journalière de température des composantes de surface	85
Figure 4.15: Résultats des calculs par <i>Grouping Analysis</i> sur les données du 7 août 2019.....	87

Figure 4.16: Représentation des données associées aux groupes de données les plus froides pour différentes images acquises le 7 août 2019.	88
Figure 4.17: Variations de la température de l'air et la vitesse du vent durant les journées retenues pour la réalisation de vols à intervalles réguliers	89
Figure 4.18: Valeurs de LST calculées pour les vols à intervalles réguliers du 17 juin 2020	90
Figure 4.19: Points associés à des anomalies froides lors des calculs par <i>Grouping Analysis</i> pour les données du 17 juin 2020	91
Figure 4.20: Orthomosaïques thermiques des vols réalisés sur un site de la SG Malartic pour le 20 juin 2020.....	93
Figure 4.21: Illustration de la topographie de la zone étudiée. A) Modèle d'élévation construit à partir des données terrain. B) Crevasse résultant de la présence d'une exfiltration d'eau souterraine près de la base de l'excavation.	94
Figure 4.22: Modélisation de l'influence de différents paramètres du bilan énergétique de surface sur les températures de surface d'un sol représentatif d'un esker (Voir tableau 4.2 pour les valeurs des paramètres de SEB)	96
Figure 4.23: Localisation des points de mesure de température pour les différentes profondeurs de la nappe sur l'orthomosaïque du visible pour l'un des vols sur le site de Malartic	97
Figure 4.24: Représentations graphiques des conditions météorologiques du 20 juin 2020	98
Figure 4.25: Comparaison des températures de sol mesurées et simulées pour trois scénarios (profondeur de la nappe à 0,05 m; 0,30 m et 5,00 m).	98
Figure 4.26: Sommaire des avancés et limites associées aux travaux réalisés	103

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ABI	Advanced Baseline Imager
AGURAM	ASTER Global Urbain Area Map
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AT	Abitibi-Témiscamingue
AVA	ASTER Volcano Archive
AVHRR	Advanced Very-High-Resolution Radiometer
AWEI	Automated Water Extraction Index
BB	Module de calibrage par rapport au corps noir
BES	Bilan Énergétique de Surface
BQA	Band Quality Assessment
CERES	Capacité d'Écoute et de Renseignement Electromagnétique Spatiale
CTD	Conductivity, Temperature, Depth
DN	Digital Number
DoD	Department of Defense
DRASTIC	Depth, Recharge, Aquifer, Soil, Topography, Impact of vadose zone, aquifer Conductivity.
DTS	Distributed Temperature Sensing
EOS	Earth observation system
EOSAT	Earth Observation Satellite
ERDAS	Earth Resources Data Analysis System
ERTS	Earth Resource Technology Satellite
ETM	Enhanced Thematic Mapper
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
FCM	Fuzzy c-means clustering
FO	Fibre optique
GA	Grouping Analysis
GCPs	Ground Control Points

GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
GDEM	Global Digital Elevation Model
GED	Global Emissivity Database
GLIMS	Global Ice Monitoring from Space
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellites
GPS	Global positionning system
HD	Hight Definition
HLS	Hue saturation lightness
IDW	Inverse Distance Weighting
IRFPA	Infrared Focal Plane
IRT	Infrarouge thermique
K-NN	K- plus proches voisins
LST	Land surface temperature
MEM	Module électronique principal
MISR	Multi-angle Imaging Spectroradiometer
MNDWI	Modified Normalized Difference Water Index
MNT	Modèle numérique de terrain
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MODTRAN	MODerate resolution atmospheric TRANsmission
MOPITT	Measurement of pollution in the troposphere
MSS	Multispectral scanner
MWIR	Mid wavelength infrarouge
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCG	National Center of Geocomputing
NDMI	Normalized Difference Moisture Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
NE(Δ)T	Noise-equivalent temperature difference
NIR	Near Infrared

NOAA	Administration océanique atmosphérique nationale
OLI	Operational Land Imager
PACES	Programme d'Acquisition de Connaissances sur l'Eau Souterraine
POES	Polar-orbiting Operational Environmental Satellites
RGB	Red Green Blue
RMSE	Root Mean Square Error
SD	Solar Diffuser
SG	Sablère/Gravière
SIG	Système d'informations Géographiques
SMB	Saint Mathieu Berry
SNR	Signal-to-noise ratio
SRCA	Assembleur de calibrage spectrométrique
SST	Sea surface temperature
SVM	Machine à vecteur de support
SWIR	Short wave Infrared
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TM	Thematic Mapper
TVDI	Temperature Vegetation Dryness Index
UAS	Unmanned Aircraft Systems
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal transverse mercator
UV	Ultra-violet
VIS	Visible
WRI	Water Ratio Index

LISTE DES ANNEXES

Annexe A: Caractéristiques des satellites ayant des bandes thermiques.....	120
Annexe B: Comparaison technique et économique du satellite NOAA avec des UAS ainsi que les caractéristiques des capteurs thermiques in situ et les données à archiver lors de l'utilisation des sondes thermiques.	124
Annexe C: Exemple de rapport automatique généré par la méthode de classification <i>Grouping Analysis</i>	127
Annexe D: Formations et permis requis pour l'opération du drone au Canada	128
Annexe E: Mosaïquages du visible, thermique et calcul de GA pour les sites survolés sur l'esker Saint-Mathieu / Berry	129
Annexe F: Exemple des échantillons sur une image acquise par drone, pour lesquels la moyenne de température journalière est calculée	138

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte et problématique

Le *Programme d'Acquisition de Connaissances sur les Eaux Souterraines* (PACES) représente une initiative ayant significativement contribué à l'évaluation des ressources en eau souterraine au Québec ([Larocque et al., 2018](#)). Ce programme initié en 2009 a permis la réalisation de vastes études hydrogéologiques dans plusieurs régions du Québec (figure 1.1).

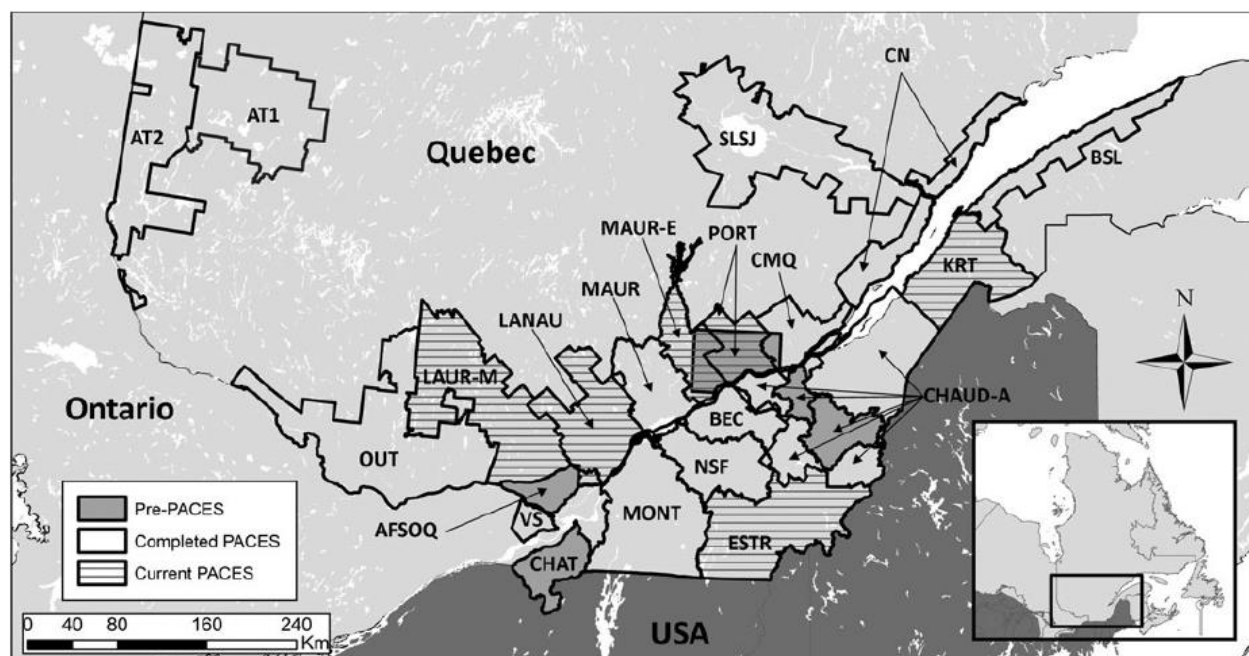


Figure 1.1: Secteurs du Québec méridional couverts par le PACES. Les zones en blanc représentent les projets complétés entre 2009 et 2015, et celles rayées sont les projets en cours de réalisation ([Larocque et al., 2018](#)).

Pour le secteur de l'Abitibi-Témiscamingue, deux projets s'inscrivant dans le cadre du PACES ont été réalisés, soit le PACES-AT1 et le PACES-AT2 (figure 1.2). Les projets PACES-AT1 et PACES-AT2 ont été réalisés par le *Groupe de Recherche sur l'Eau Souterraine* de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (GRES-UQAT) et les résultats sont présentés dans [Cloutier et al. \(2013\)](#). En complément, l'*Atlas Hydrogéologique de l'Abitibi-Témiscamingue* ([Cloutier et al., 2016](#)) fournit une synthèse des faits saillants des deux projets PACES-AT. Ci-après, ces études

seront abondamment citées car elles fournissent les connaissances de base qui étaient requise pour la réalisation du présent projet.



Figure 1.2: Localisation des projets d’acquisition de connaissances sur l’eau souterraine réalisés en Abitibi-Témiscamingue tirée de [Cloutier et al. \(2016\)](#).

Les PACES-AT1 et PACES-AT2 ont permis de brosser un portrait de la quantité et de la qualité de l’eau souterraine à l’échelle du territoire municipalisé de l’Abitibi-Témiscamingue, région où près de 70% de la population dépend de l’eau souterraine pour son approvisionnement en eau potable. Les résultats issus de ces projets ont révélé que les formations fluvioglaciaires (eskers et moraines) de la région constituent des aquifères exceptionnels en termes de volumes et de qualité de l’eau. Les formations fluvioglaciaires ont d’ailleurs été identifiées comme constituant les principales zones de recharge des systèmes d’écoulement de l’eau souterraine de la région ([Nadeau](#)

[et al., 2015](#); [Nadeau et al., 2018](#); [Rey et al., 2018](#)). Les indices de vulnérabilité DRASTIC calculés au niveau de ces formations permettent de conclure qu'elles hébergent une ressource en eau souterraine hautement vulnérable. Il s'agit de surcroît de formations géologiques spatialement associées à des écosystèmes dépendants de l'eau souterraine ([Rosa et al., 2018](#)).

Or, malgré l'importance critique des formations fluvioglaciaires de la région, la compréhension de leur fonctionnement hydrogéologique demeure fragmentaire. L'accès limité aux formations fluvioglaciaires au sein d'un vaste territoire (20 000 km² pour les PACES-AT1 et AT2 combinés) ainsi que les coûts souvent élevés associés aux mesures invasives de terrain (p.ex. : forage et installation de puits et piézomètres) représente notamment un frein à l'acquisition de connaissances. D'une part, l'évaluation de la position de la nappe d'eau souterraine au sein des eskers et moraines représente un défi notamment en raison **(1)** du nombre élevé et de la dimension imposante de ces formations géologiques au sein de la région et **(2)** des coûts élevés associés à l'implantation de puits et de piézomètres destinés au suivi de la ressource en eau souterraine ([Nadeau et al., 2015](#)). Une telle information s'avère toutefois requise pour mieux évaluer le volume de la ressource en eau souterraine. D'autre part, l'identification, le recensement et la cartographie des zones d'exfiltration d'eau souterraine au niveau des marges des eskers et moraines est complexe, que ce soit ici en région ou ailleurs dans le monde ([Rossi et al., 2014](#)). Or, ces zones d'exfiltration sont susceptibles d'héberger des écosystèmes dépendants de l'eau souterraine (ÉDES), lesquels présentent une diversité écologique fragile et unique ([Bertrand et al., 2011](#)). Ici encore, l'acquisition de données terrain par mesures directes (p.ex : implantation et suivi de lysimètres) s'avère complexe et onéreuse, notamment en raison de l'accès difficile au territoire et du nombre élevé d'eskers et moraines en région. C'est dans ce contexte que le présent projet de maîtrise fut initié, dans la perspective de développer des approches non invasives novatrices permettant de documenter l'hydrogéologie des eskers et moraines.

1.2 Objectifs

L'**objectif général** de ce projet de maîtrise était de développer des approches de télédétection multi-échelles pour documenter l'hydrogéologie des formations fluvioglaciaires. Les travaux de recherche proposés ici s'appuient sur l'hypothèse voulant que la profondeur de la nappe d'eau souterraine ait une influence sur la température de surface des formations fluvioglaciaires. Les **objectifs spécifiques** du projet étaient:

1. Documenter les processus contrôlant les variations spatiotemporelles des températures de surface au niveau des formations fluvioglaciaires de l'Abitibi-Témiscamingue;
2. Développer une approche d'imagerie thermique multi-échelles (satellite et drone) permettant de localiser les zones d'exfiltration d'eau souterraine sur les marges des formations fluvioglaciaires;
3. Simuler l'influence de la profondeur de la nappe d'eau souterraine sur la température des sols inorganiques observés en surface.

Les principaux outils utilisés pour l'atteinte de ces objectifs incluent (1) le traitement d'images satellitaires *Landsat 8*, (2) l'acquisition et le traitement d'images thermiques et optiques à haute résolution par drone, (3) le traitement de données par approche SIG et (4) la modélisation numérique des processus hydrologiques et thermiques.

1.3 Hypothèses de recherche

Les objectifs spécifiques du projet s'appuient sur des hypothèses de travail, lesquelles sont définies comme suit :

1. Les données issues d'images satellites *Landsat 8* permettront le calcul d'indices quantitatifs représentatifs de l'humidité du sol, laquelle est elle-même dépendante de la position de la nappe d'eau souterraine;
2. L'eau souterraine présentant une température relativement stable avoisinant 6°C en région, même près des exfiltrations d'eau souterraine ([Champagne, 1988](#)). Ainsi, les zones d'exfiltration d'eau souterraine définiront des gradients thermiques détectables lorsque la température de l'air (et du sol) est significativement différente de 6°C;
3. La modélisation numérique permettra une évaluation quantitative du lien existant entre des températures de surface mesurées par télédétection et les conditions hydrogéologiques prévalant en sous-surface.

1.4 Contenu du mémoire

Le présent mémoire de maîtrise comporte 5 chapitres. Le chapitre 2 présente un sommaire des connaissances scientifiques relatives aux méthodes de télédétection et aux caractéristiques des

imageurs employés pour l'acquisition de données d'infrarouge thermique (IRT) à différentes échelles. Le chapitre 3 présente la région d'étude et les approches méthodologiques employées dans le cadre du projet. Le chapitre 4 présente les résultats et la discussion découlant des travaux réalisés avec une brève synthèse des faits saillants de l'étude. Ce chapitre inclut une discussion relative aux limites de l'étude et cible des pistes de solution qui pourraient être étudiées ultérieurement. Finalement, le chapitre 5 présente une conclusion générale et les retombées associées au projet.

1.5 Contribution scientifique et originalité du projet

Le projet de recherche revêt une originalité en raison de l'utilisation couplée d'approches de télédétection multi-échelles et de modélisation. À ce jour, les approches de télédétection demeurent peu exploitées en hydrogéologie, malgré le fait que certaines études aient suggéré leur potentiel ([Barron et Niel , 2009](#); [Deitchman et Loheide, 2009](#); [Varma *et al.*, 2010](#); [Wilson et Rocha, 2012](#); [Lewandowski *et al.*, 2013](#)). Le développement d'approches de télédétection pour l'étude des processus hydrogéologiques pourrait représenter un atout essentiel pour l'étude des aquifères du nord du Québec et du Canada, où les accès au territoire sont difficiles et où les travaux de terrain sont complexes et onéreux. La télédétection pourrait de surcroît permettre l'identification des zones prioritaires où des études de terrain doivent être réalisées de façon prioritaire. Une telle approche permettrait d'optimiser les démarches associées à la réalisation d'études hydrogéologiques sur de vastes territoires, comme c'est le cas pour les différents projets du PACES. Le couplage d'approches de télédétection avec des calculs appuyés sur les SIG présente un fort potentiel pour l'établissement de protocoles transposables à plusieurs contextes. À ce jour, l'utilisation de la télédétection thermique pour l'étude de l'hydrogéologie des formations fluvioglaciales est peu documentée. Les travaux réalisés par [Ala-aho et Kløve \(2015\)](#), au niveau d'un esker de Finlande, représentent un exemple faisant appel à l'application de la télédétection thermique dans un contexte géologique similaire. La présente étude se distingue des travaux précités par l'inclusion d'une zone plus vaste et le développement d'approches de télédétection multi-échelles et de traitements SIG novatrices pour l'étude des formations fluvioglaciales.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

L'étude des caractéristiques thermiques des systèmes d'écoulement de l'eau souterraine peut s'appuyer sur des techniques incluant (1) l'utilisation des sondes et des capteurs thermiques *in situ* au sein de puits et piézomètres ([Lautz et al., 2010](#); [Torgersena et al., 2000](#)), (2) l'installation de fibres optiques permettant le suivi de la température au sein des cours d'eau ([Har et al., 2015](#)), (3) l'imagerie thermique à haute résolution ([Harvey et al., 2016](#); [Torgersena et al., 2000](#)) et (4) l'imagerie satellitaire ([Barron et Niel, 2009](#); [Wilson et Rocha, 2012](#)). À ce jour, la télédétection spatiale est devenue une approche largement exploitée en géosciences. La rapidité d'acquisition et la vaste couverture spatiotemporelle associée aux données représente un atout majeur pour la cartographie régionale ([McCaul et al., 2016](#)). Néanmoins, la classification des objets surfaciques ayant des signatures spectrales similaires dans les bandes du visible peut s'avérer complexe. En ce sens, l'approche de télédétection appuyée sur l'infrarouge thermique (IRT) constitue un complément utile pour une vaste gamme d'applications en géosciences ([Barron et Niel, 2009](#)). Les résultats des études régionales appuyés sur une couverture satellitaire à moyenne résolution peuvent être complétés par des techniques à haute résolution appliquées à l'échelle locale. L'utilisation de caméras thermiques aéroportées permet notamment la cartographie des anomalies thermiques avec plus de précision ([Aubry-Wake et al., 2015](#); [Harvey et al., 2016](#)). Le couplage avec des mesures *in situ* est aussi parfois utilisé. À titre d'exemple, des approches géochimiques ont été utilisées afin de confirmer la localisation de zones d'exfiltrations des eaux souterraines identifiées par télédétection ([Johnson et al., 2008](#); [Wilson et Rocha, 2012](#)).

2.1 Télédétection par imagerie satellitaire

La télédétection est la science s'appuyant sur l'acquisition de données relatives aux caractéristiques des objets cibles sans que ces derniers soient en contact direct avec les capteurs. L'approche s'appuie notamment sur la mesure des ondes électromagnétiques. On distingue la télédétection active de la télédétection passive. La première nécessite une source d'énergie pour illuminer les cibles tandis que la deuxième se base sur l'énergie solaire comme source et capte les signaux réfléchis par les cibles ([Farnsworth et al., 1984](#)). La distance entre la cible et le capteur peut varier d'environ 32 000 km pour les satellites géostationnaires à quelques mètres pour les capteurs portatifs ([Farnsworth et al., 1984](#)). Les capteurs thermiques des satellites enregistrent les signaux

émis par les objets selon leur émissivité, un paramètre qui représente le rayonnement émis par un objet par rapport au rayonnement émis par un corps noir exposé à la même température ([Snyder et al., 1998](#)).

2.1.1 Satellites disposant de bandes thermiques

L'augmentation de la demande relative à l'utilisation des images IRT pour différents domaines (p. ex. : météorologie, hydrologie, archéologie, océanographie, agriculture, foresterie) lors des deux dernières décennies a engendré le développement des capteurs thermiques à différentes résolutions. Les sous-sections qui suivent présentent différents satellites permettant l'acquisition (ou le calcul) de données thermiques.

2.1.1.1 NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*)

La NOAA est l'une des plus puissantes et des plus anciennes constellations. Elle fut développée en 1953 pour le suivi de phénomènes environnementaux. En plus de ses missions primaires associées à des prévisions météorologiques ([Davis, 2011](#)), elle comporte des satellites géostationnaires (p. ex. : GOES *Geostationary Operational Environmental Satellites*) et polaires (p. ex. : POES *Polar-orbiting Operational Environmental Satellites*) pour couvrir le globe terrestre. La NOAA a collaboré avec la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), le DoD (*Department of Defense*) ainsi que EUMETSAT (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*).

Le NOAA/AVHRR (*Advanced Very-High-Resolution Radiometer*) est un imageur pour la détection des radiations. Il comportait 4 bandes lors du premier lancement en 1978 alors que la version AVHRR/2 datant de 1981 comportait une cinquième bande. La version AVHRR/3 date pour sa part de 1998 et est embarqué sur le satellite NOAA15. L'imageur est alors doté de six bandes radiométriques (annexe A.1). Le capteur pèse 32.5 kg avec des dimensions de 0.8 x 0.36 x 0.79 m. Le NOAA/GOES est pour sa part un satellite géostationnaire ayant connu des améliorations depuis son lancement en 1975 (sous le nom de GOES1) à la suite d'une collaboration entre la NOAA et la NASA (figure 2.1).

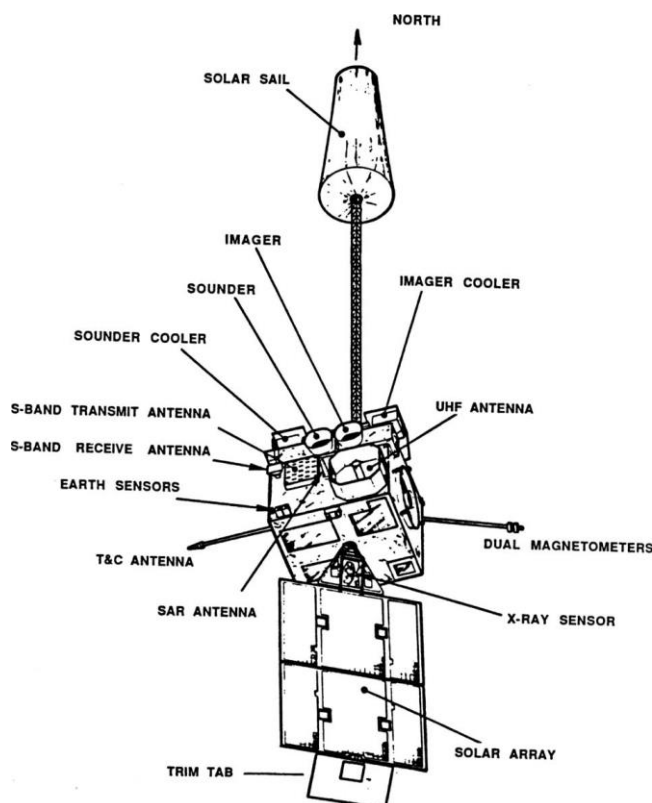


Figure 2.1:Schéma du satellite GOES1 (Menzel et James, 1994)

Le satellite GEOS1 est dédié à servir la recherche scientifique. Il comporte un imageur multispectral et un sondeur (*Visible and Infrared Spin Scan Radiometer Atmospheric Sounder* VISSR-AS) depuis sa version GOES4 ([Menzel et James, 1994](#)) lancée en 1982. Pour éviter les conflits entre les opérations sonores et d'imagerie et améliorer la résolution, le GOES-I-M de deuxième génération comporte pour sa part un imageur et un sondeur étant séparés ([Davis, 2011](#)), ce qui permet de réduire les interférences et d'améliorer la résolution. Le GOES-17 représente la nouvelle série de cette gamme de satellites géostationnaires et intègre plusieurs améliorations de l'imageur ABI (*Advanced Baseline Imager*). Cet imageur est actuellement fonctionnel et il enregistre 16 bandes, dont 2 du visible (bleu et rouge), 4 du proche infrarouge et 10 allant du moyen infrarouge jusqu'à l'infrarouge thermique (annexe A.2).

2.1.1.2 Satellite *Terra*

Terra est un satellite contrôlé par la NASA, mis en orbite en 1999 pour le suivi de différents phénomènes globaux et la compréhension des connexions entre l'atmosphère, la géosphère et

l'hydrosphère. Il tourne selon une orbite héliosynchrone et pèse plus de 5 tonnes. Il comporte plusieurs imageurs dont ASTER, MODIS, CERES, MISR et MOPITT (<https://terra.nasa.gov/>).

L'imageur ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) fut créé à la suite d'une collaboration de la NASA et du ministère de l'économie, de commerce et de l'industrie japonais. Cet imageur de 14 bandes est connu pour sa précision et sa résolution spatiale de 15 m pour les 3 bandes du visible (annexe A.3). ASTER est doté de six autres bandes du proche infrarouge et de cinq bandes additionnelles pour l'IRT, avec une résolution spatiale de 90 m. Il pèse 421 kg avec une fauchée de prise de 60 km. Il est utilisé pour servir des études en différents domaines dont la géoscience, l'archéologie, le suivi des milieux humides et la cartographie des inondations. Ses images font parties de plusieurs projets en télédétection, dont GDEM (*Global Digital Elevation Model*), ASTER GED (*Global Emissivity Database*), AGURAM (*ASTER Global Urban Area Map*), AVA (*ASTER Volcano Archive*) et GLIMS (*Global Ice Monitoring from Space*) ([Abrams et al., 2015](#)).

MODIS représente l'un des plus intéressants imageurs de suivi du globe, notamment pour le suivi des océans et des zones côtières ([Esaías et al., 1998](#)). Il est installé sur deux satellites, Terra et Aqua, lesquels portaient auparavant la dénomination EOS AM-1 et EOS PM-1. Cet imageur a une sensibilité radiométrique élevée de 12 bits avec 36 bandes sur un intervalle de spectre allant 0.4 μm à 14.4 μm (annexe A.4). Son altitude est de 705 km avec une fauchée de 2 330 km et une résolution spatiale faible (tableau 2.1). Le système optique de MODIS est composé de 4 objectifs convergents créant 4 fenêtres du spectre VIS, NIR, SWIR/MWIR et IRT. Le système MODIS inclut plusieurs instruments de calibrage et de contrôle (figure 2.2) dont le module électronique principal MEM, le diffuseur solaire SD, l'assembleur de calibrage spectrométrique SRCA et le module de calibrage par rapport au corps noir BB ([Xiong et al., 2005](#)).

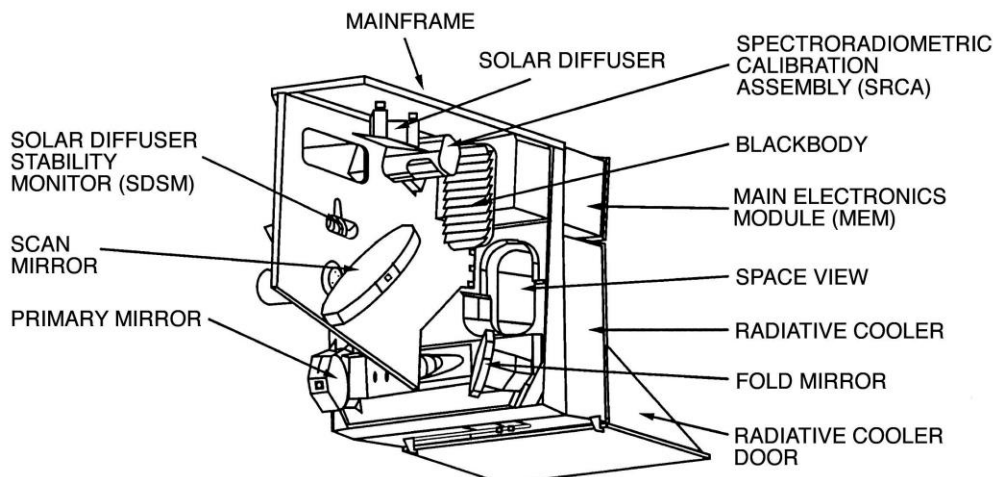


Figure 2.2: Le système de contrôle et de calibrage de l'imager MODIS ([Xiong et al., 2005](#)).

Tableau 2.1: La résolution spatiale des bandes MODIS

Bandes 1-2	Bandes 3-7	Bandes 8-36
250 m	500 m	1000 m

2.1.1.3 Le satellite Landsat TM, ETM+, OLI & TIRS

Le *Landsat* est l'un des satellites les plus révolutionnaires de son époque en termes de résolution spatiale. Il fut lancé en 1972 sous le nom de ERTS (*Earth Resource Technology Satellite*). Il contribue à la compréhension des phénomènes terrestres à moyenne résolution avec d'autres satellites d'observation (figure 2.3). Plusieurs générations furent développées avant la mise en orbite de sa version Landsat 7 en 1999 suivi par le Landsat 8 en février 2013 ([Williams et al., 2006](#)). Selon les auteurs précités, la NASA a repris le contrôle du Landsat après sa privatisation par la société EOSAT qui était en charge des versions *Landsat* 4 et 5 durant environ 10 ans. Le développement de ce satellite s'est concentré sur l'amélioration de la résolution spatiale et l'ajout de nouvelles bandes IR (annexe A.5). Les bandes IRT de *Landsat* sont utilisées pour le suivi et l'étude de plusieurs phénomènes dont l'agriculture et la cartographie des sols ([Arango et al., 2017](#); [Sousa et Small, 2019](#)), l'estimation de la biomasse ([Li et al., 2019](#)), le suivi géothermique des zones volcaniques ([Chan et Chang, 2018](#); [Mia et al., 2018](#)) et la cartographie des zones d'exfiltration littorales et continentales ([McCaul et al., 2016](#); [Tavares et al., 2019](#); [Wilson et Rocha, 2012](#)).

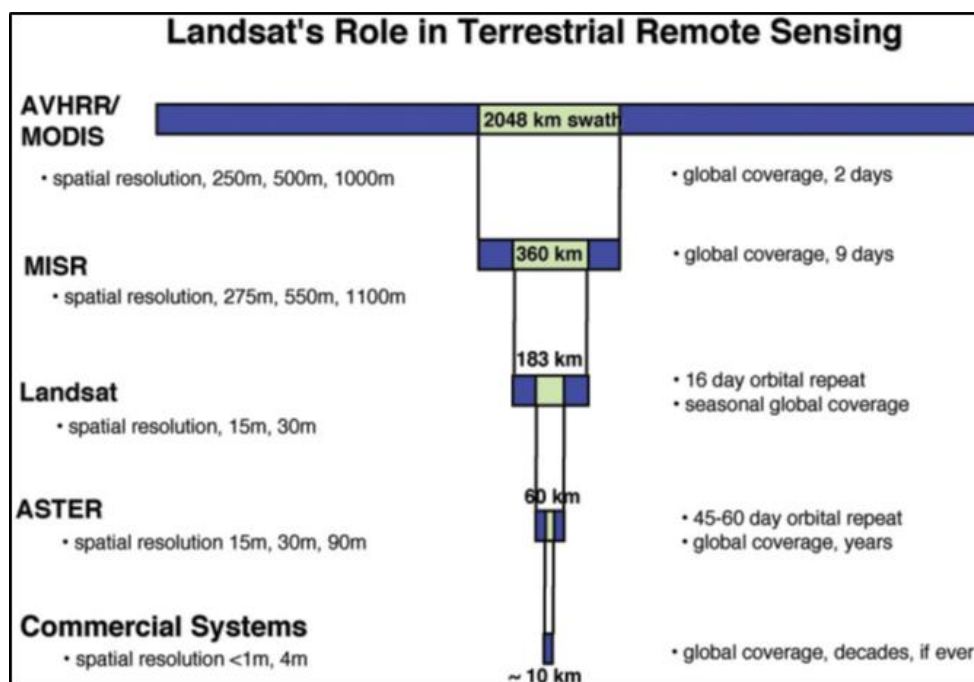


Figure 2.3: Contribution du Landsat à la télédétection spatiale à l'échelle terrestre ([Williams et al., 2006](#))

2.1.2 Principe de la télédétection thermique

L'émissivité est l'élément clé de la télédétection thermique pour la cartographie de la surface terrestre. Elle caractérise la capacité de chaque objet, en termes de rayonnement thermique, par rapport à un corps noir soumis aux mêmes conditions. La surface du sol est connue par son hétérogénéité en termes d'émissivité, laquelle s'ajoute à l'effet de différence de température avec l'air sus-jacent ([Becker, 2007](#); [Jiménez et al., 2012](#)). Le principe de fonctionnement d'un capteur thermique (figure 2.4) demeure similaire au principe de fonctionnement de différents types de caméras, bien que la fenêtre cible du spectre électromagnétique soit celle de l'infrarouge thermique (IRT) et non du domaine du visible (figure 2.5). Le capteur convertit le signal émis par l'objet cible en une énergie électrique puis en une donnée numérique stockée sous format de pixel pour la formation d'images thermiques.

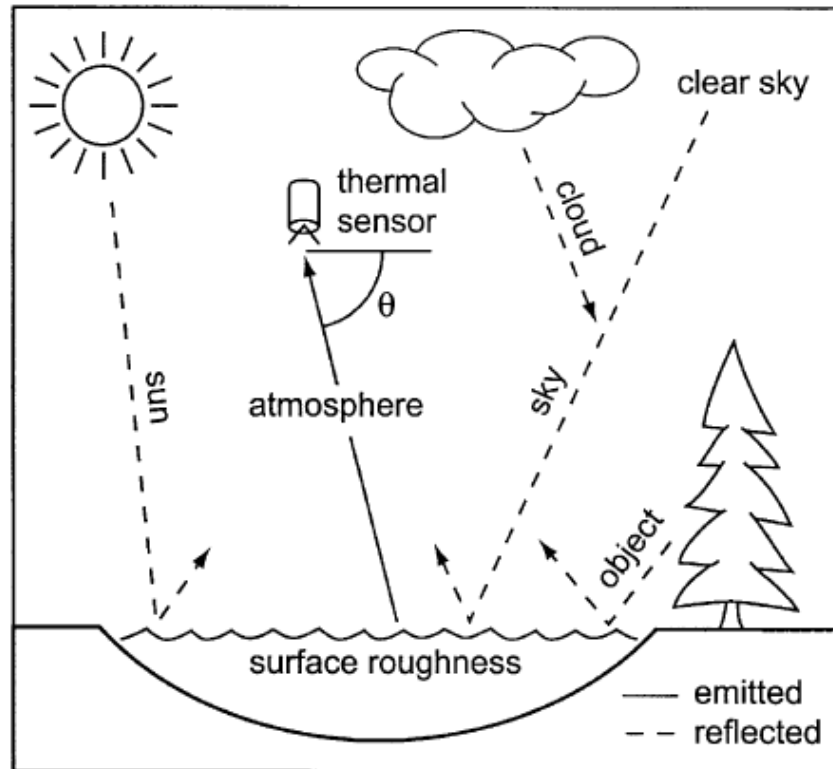


Figure 2.4: Principe d'acquisition d'un rayonnement par un capteur thermique ([Torgersena et al., 2000](#))

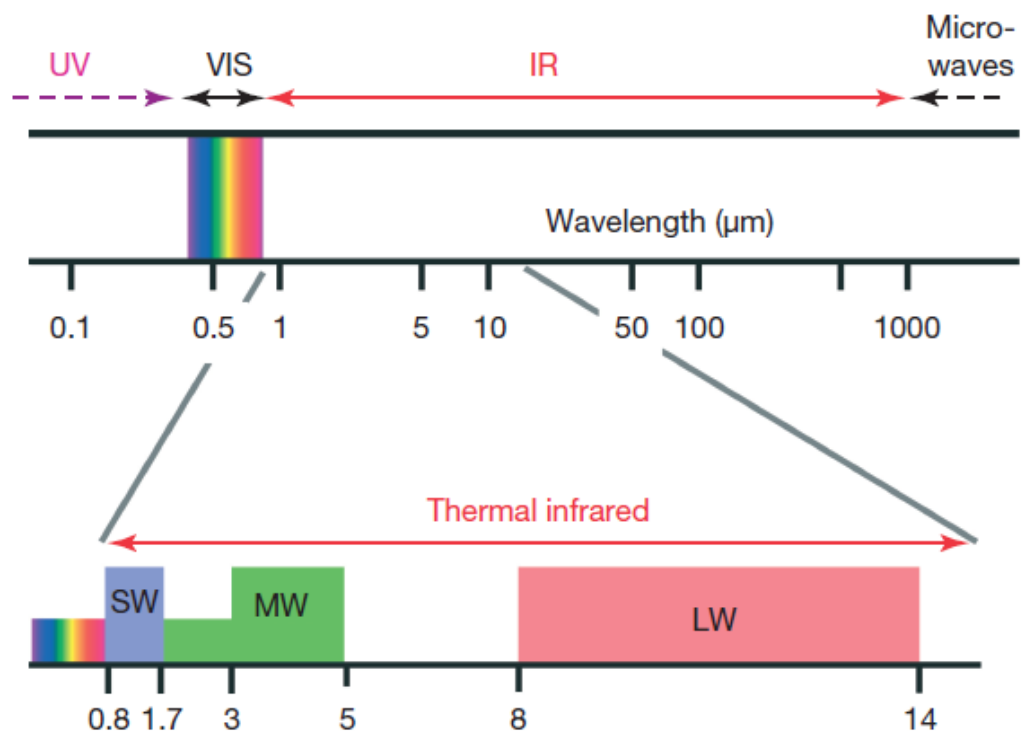


Figure 2.5: Spectre électromagnétique (Visible/IR) ([Vollmer et Möllmann, 2018](#))

2.1.2.1 Résolution spectrale, radiométrique, spatiale et thermique

La résolution spectrale est la capacité d'un capteur de différencier entre des longueurs d'ondes proches. Plus la résolution spectrale augmente, plus les intervalles des longueurs d'ondes captées sont fins. Pour une classification des objets de même type, il faut que la résolution spectrale du capteur soit plus fine ([Snyder et al., 1998](#)). La résolution spatiale est la capacité d'un capteur de représenter des objets cibles ayant différentes tailles. Elle représente les dimensions de l'objet le plus petit qui pourra être distingué sur l'image. Le choix de la résolution spatiale dépend des dimensions des objets étudiés ([Snyder et al., 1998](#)). L'altitude du capteur est l'un des paramètres qui influence considérablement la résolution spatiale. Plus le capteur s'approche de la cible, plus la résolution spatiale augmente. Les détails apparaissent alors plus clairement sur les images. La figure 2.6 illustre deux images couvrant la même zone, avec des résolutions distinctes.

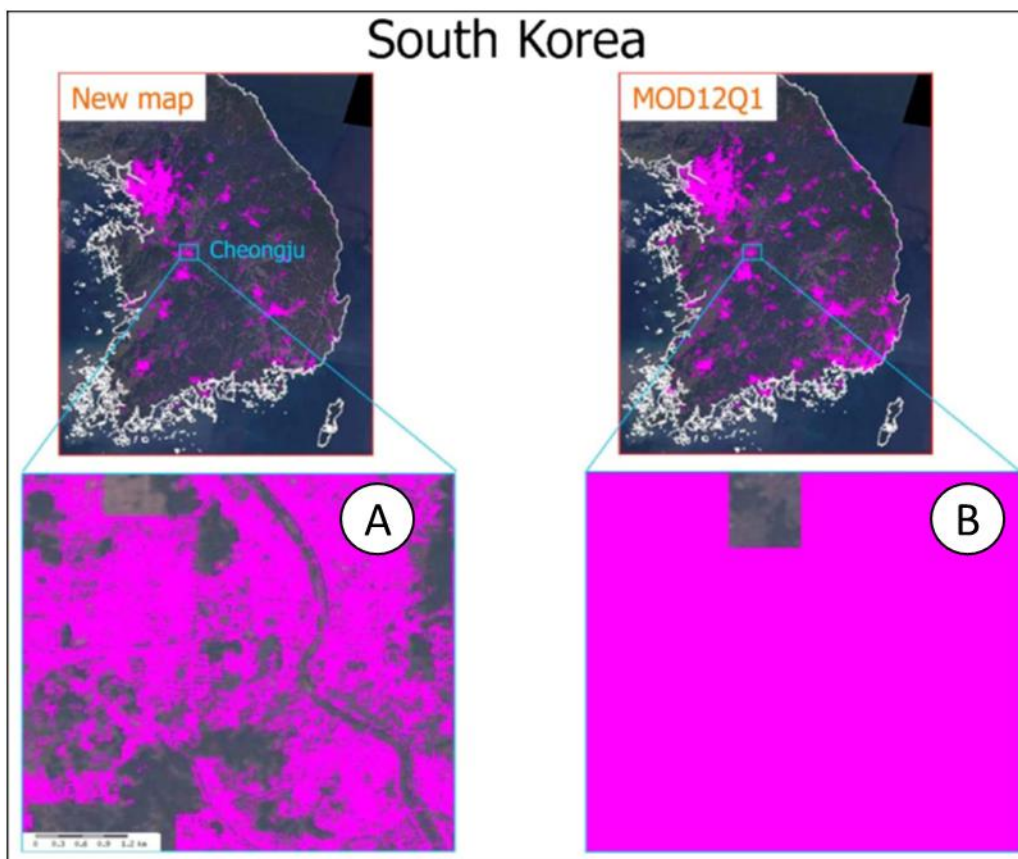


Figure 2.6: Comparaison entre une image A) AGURAM caractérisée par une résolution spatiale de 15 m et une image B) MODIS ayant une résolution spatiale de 1 km. ([Abrams et al., 2015](#))

La résolution radiométrique concerne la capacité du capteur à distinguer les nuances dans l'énergie électromagnétique. Elle dépend du nombre de bits utilisés pour encoder l'information acquise. Si la nuance est encodée sur 8 bits, l'image sera représentée par un intervalle [0,255] de nuances de gris. Si le capteur encode la nuance sur 4 bits, l'intervalle sera réduit à [0,16] et la qualité de l'image sera dégradée. La résolution thermique (ou sensibilité thermique) représente le changement de température minimal que le capteur peut enregistrer ([Kaplan, 2007](#)). Une sensibilité thermique élevée permet de visualiser des images thermiques à haute résolution, même pour de faibles contrastes de température.

Le choix de la résolution de l'imageur est important. Ce choix dépend notamment des objectifs de chaque étude, de l'échelle, des dimensions des objets ciblés et de leurs signatures spectrales. L'utilisation de différentes résolutions permet parfois de confirmer des hypothèses et de comparer des résultats ([Ferrara et al., 2017](#)). Pour des études couvrant de vastes territoires, l'utilisation d'une résolution spatiale kilométrique peut s'avérer adéquate. Par exemple, des images MODIS 28 et 29 sont utilisées pour la météorologie et l'estimation de la température surfacique de la terre et de l'océan ([Tavares et al., 2019](#)). D'autres études nécessitent des résolutions plus fines (centimétrique et millimétrique), c'est le cas par exemple pour le suivi des composantes biologiques et biogéochimiques s'appuyant sur l'utilisation des caméras portatives à haute résolution ([Cardenas et al., 2008](#); [Johnson et al., 2008](#)).

2.1.2.2 Chaîne de traitement des images IRT satellitaires

Le processus de traitement des images IRT satellitaires comporte des corrections radiométriques et atmosphériques permettant de réduire les effets d'atténuation et d'absorption des signaux émis par les objets surfaciques. Par exemple, le suivi des eaux de surface (lacs, rivières) demande parfois une correction de l'émissivité pour éliminer l'effet de la turbidité sur l'estimation de la température de l'eau ([Jennifer et al., 2005](#)). Le nombre d'images traitées dépend de l'étendue de la zone d'étude. Le géoréférencement et le mosaïquage des images sont requis pour la réalisation de calculs géométriques précis ([Eugenio et Marques, 2003](#)).

Au niveau des images brutes, c'est la radiance totale qui est enregistrée. Cette donnée inclut les perturbations atmosphériques et l'émissivité des objets. En plus des corrections atmosphériques et de l'émissivité, un calcul de la température par la loi de Planck est nécessaire pour la restitution de la température surfacique ([Handcock et al., 2006](#)).

[Tavares et al. \(2019\)](#) ont proposé un schéma simplifié illustrant la démarche de calcul de la température surfacique à partir de données IRT issues de deux satellites (Landsat ETM+ et MODIS) (figure 2.7). L'étude précitée ciblait le lac Mangueira et s'appuyait également sur des mesures *in situ* de température de l'eau réalisées au niveau de trois stations.

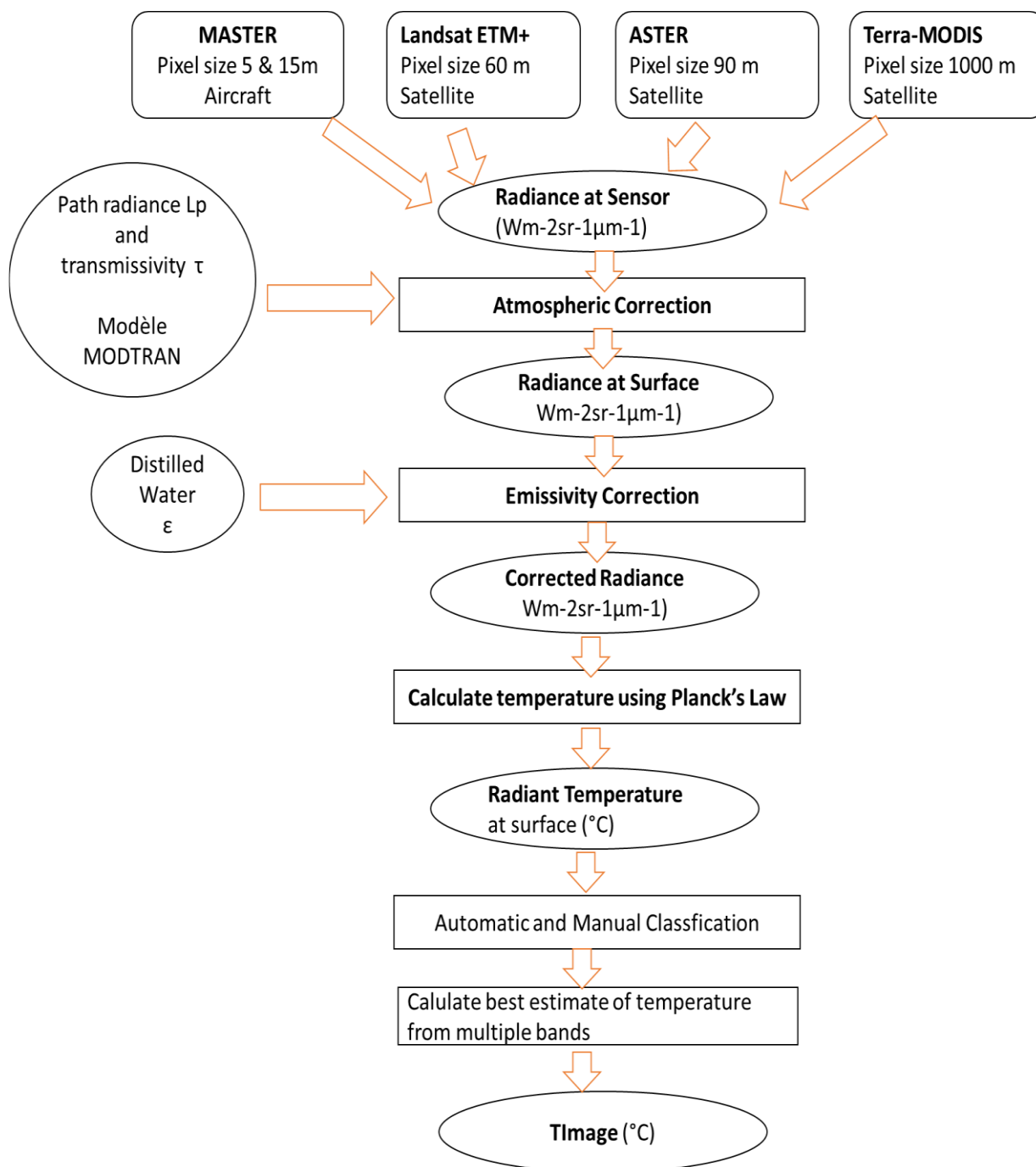


Figure 2.7: Schéma modifié de traitement des données satellitaires IRT ([Tavares et al., 2019](#))

[Handcock et al. \(2006\)](#) ont proposé une comparaison entre plusieurs satellites (*Landsat* ETM+, *Terra-MODIS*, *ASTER*) afin d'évaluer la précision et l'incertitude des images IRT (figure 2.8). Ces auteurs ont proposé un schéma commun pour le traitement des bandes thermiques de différents satellites en s'appuyant sur le modèle MODTRAN ([Alexander et al., 1989](#)) pour le control des variations de la transmissivité atmosphérique (τ) et de la trajectoire de la radiance (L_p). Les estimations de τ et de L_p doivent être ajustées aux fonctions des réponses spectrales et appliquées aux calculs des TIR pour la compensation de l'absorption et de l'émission atmosphérique. Pour la correction de l'émissivité, [Handcock et al. \(2006\)](#) se sont appuyé sur la méthode de [Salisbury et D'Aria \(1992\)](#).

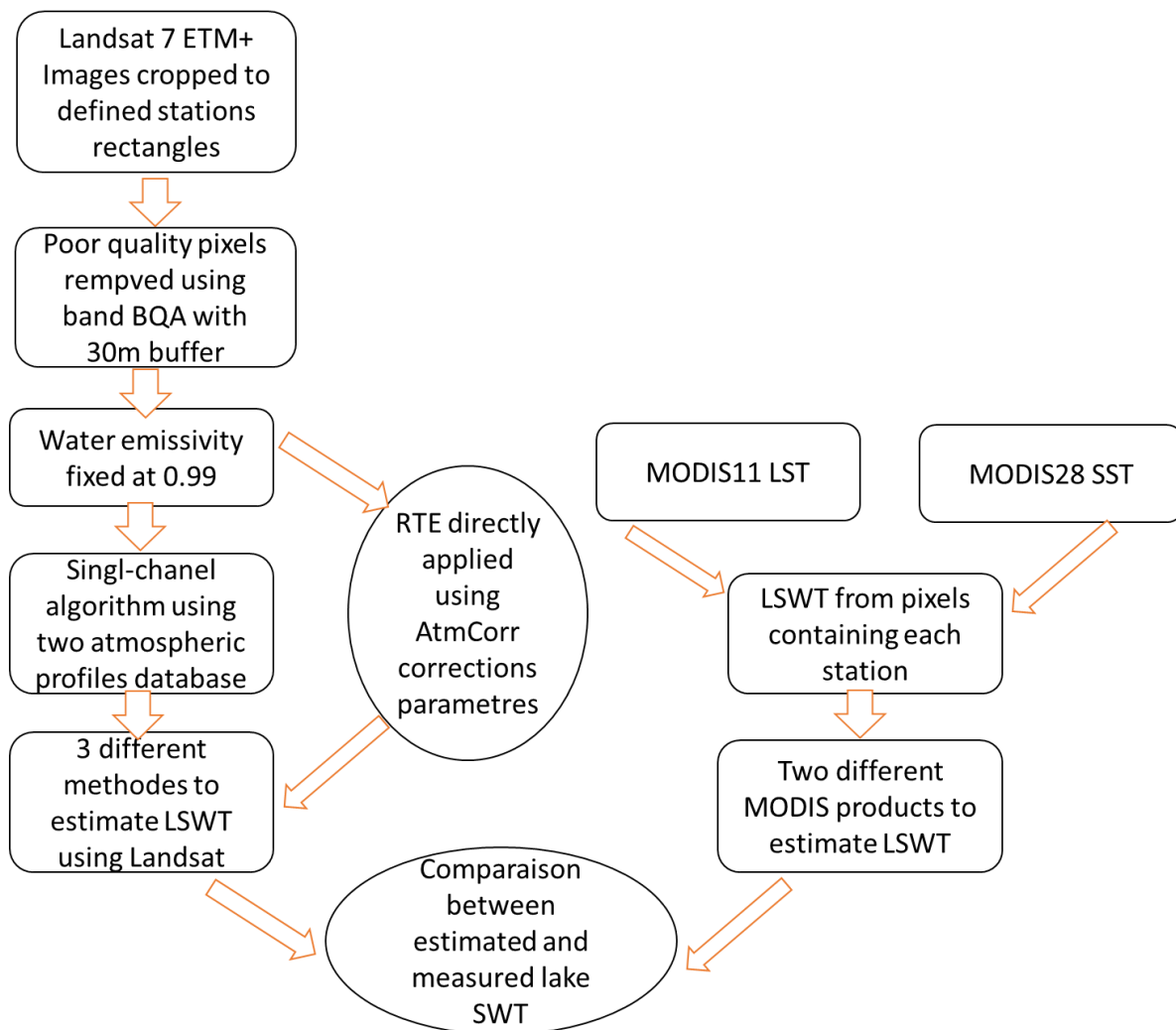


Figure 2.8: Schéma de traitement des images IRT des satellites *Landsat* ETM+ et *MODIS* pour la restitution de la température du lac Mangueira ([Tavares et al., 2019](#))

2.1.3 Prétraitement des images thermiques *Landsat* TM et ETM+

La température surfacique mesurée par les satellites est soumise à des perturbations atmosphériques. Des corrections sont donc requises pour restituer la palette de températures représentative de la surface. La figure 2.9 présente un enchainement logique de traitements et de corrections qu'une image *Landsat* IRT peut subir.

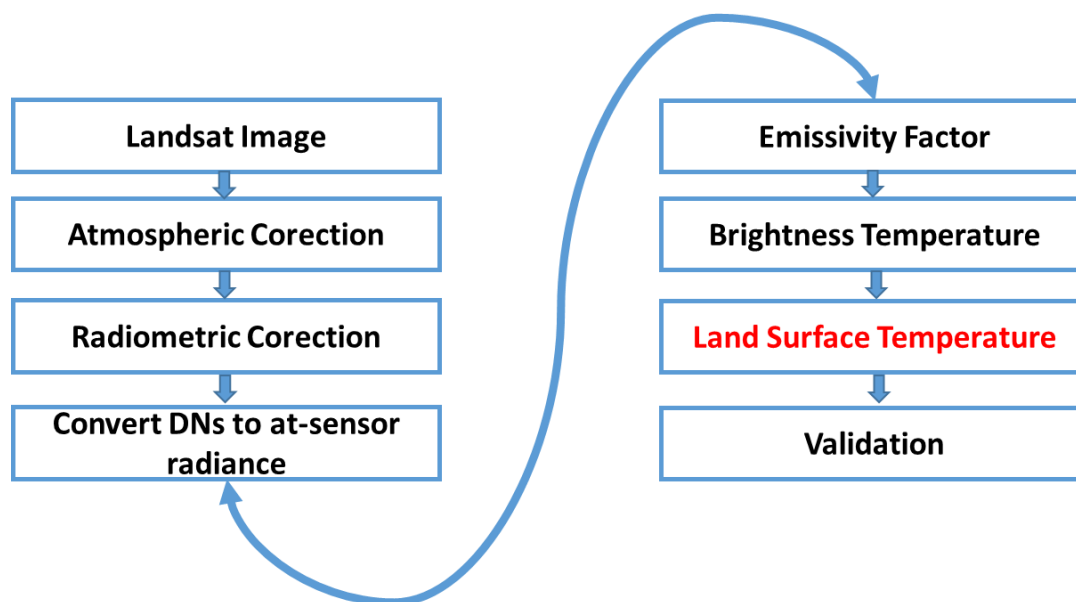


Figure 2.9: Schéma d'extraction de la température du Landsat TM et ETM+ ([Alipour et al., 2003](#))

2.1.3.1 Algorithme *mono-window* pour l'extraction de la température

La température surfacique peut être calculée à partir d'images Landsat TM selon la formule suivante ([Qin et al., 2010](#)) :

$$Ts = (a(1 - C - D) + [b(1 - C - D) + C + D]T_{sensor} - D * Ta) / C \quad \text{Éq. 1}$$

où T_s représente la température surfacique (en K), T_{sensor} correspond à la brillance effective au satellite (en K), Ta est la moyenne effective de la température atmosphérique (en K), a et b sont des constantes avec $a = 67.355351$ et $b = 0.458606$ lorsque la T_s est comprise entre 273,5 K et 343,5 K. Les paramètres C et D se calculent selon:

$$C = \varepsilon * \tau \quad \text{Éq. 2}$$

$$D = (1 - \tau)[1 + (1 - \varepsilon)\tau] \quad \text{Éq. 3}$$

où ε est l'émissivité (grandeur adimensionnelle), τ est la transmittance (grandeur adimensionnelle) et Ta est la température atmosphérique (en K). La température atmosphérique Ta peut aussi être évaluée par des fonctions linéaires ([Alipour et al., 2003](#)) :

$$Ta = 17.9769 + 0.91715T_0 \text{ (climat tropical)} \quad \text{Éq. 4}$$

$$Ta = 16.011 + 0.92621T_0 \text{ (en été pour des latitudes moyennes)} \quad \text{Éq. 5}$$

$$Ta = 19.2704 + 0.91118T_0 \text{ (en hiver pour des latitudes moyennes)} \quad \text{Éq. 6}$$

Où T_0 est la température de l'air près de la surface en Kelvin. [Qin et al. \(2010\)](#) ont pour leur part proposé des formules linéaires pour le calcul de la transmittance (τ) selon l'humidité et la température de l'air (tableau 2.2).

Tableau 2.2: Valeur de transmittance en fonction de la vapeur d'eau et de la température d'air

	Vapeur d'eau w g/cm ²	Transmittance τ
Température d'air élevée	0.4–1.6	$\tau = 0.974290 - 0.08007w$
	1.6–3.0	$\tau = 1.031412 - 0.11536w$
Température d'air faible	0.4–1.6	$\tau = 0.982007 - 0.09611w$
	1.6–3.0	$\tau = 1.053710 - 0.14142w$

2.1.3.2 Algorithme single-channel

L'algorithme *single-channel* s'applique pour l'extraction de la température surfacique de plusieurs capteurs thermiques. La formule associée à l'algorithme s'exprime comme suit ([Jiménez-Muñoz et Sobrino, 2003](#)):

$$Ts = \gamma[\varepsilon^{-1}(\vartheta1 * L_{sensor} + \vartheta2) + \vartheta3] + \delta \quad \text{Éq. 7}$$

$$\gamma = \left[\frac{C2 * L_{sensor}}{T_{sensor}^2} \left(\frac{\lambda^4}{C1} L_{sensor} + \lambda^{-1} \right) \right]^{-1} \quad \text{Éq. 8}$$

$$\delta = -\gamma L_{sensor} + T_{sensor} \quad \text{Éq. 9}$$

La radiance au capteur L_{sensor} est définie comme suit :

$$L_{sensor} = [(\varepsilon * B + (1 - \varepsilon)L^{atm\downarrow})\tau + L^{atm\uparrow}] \quad \text{Éq. 10}$$

Avec B déduite de la loi de Planck selon :

$$B = \frac{C1 * \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C2}{\lambda Ts}\right) - 1} \quad \text{Éq. 11}$$

où Ts est la température surfacique (en K), L_{sensor} est la radiance au capteur ($W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$), T_{sensor} est la brillance au capteur (en K), ε est l'émissivité, τ est la transmittance, B est la radiance du corps noir à la température T_s ($W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$), $C1$ est égal à $1.19104 * 10^8 \text{ W } \mu m^4 \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$, $C2$ est égal à $1.43877 * 10^4 \mu m \text{ K}$, $L^{atm\uparrow}$ est la radiance atmosphérique ascendante ($W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$) et $L^{atm\downarrow}$ est la radiance atmosphérique descendante ($W/(m^2 \text{ sr } \mu m)$). Pour les paramètres atmosphériques $\vartheta1$, $\vartheta2$ et $\vartheta3$ permettant le calcul de T_s des images IRT de *Landsat*, les équations suivantes sont proposées [Jiménez-Muñoz et Sobrino \(2003\)](#) :

$$\vartheta1 = 0.14714 w^2 - 0.15583 w + 1.1234 \quad \text{Éq. 12}$$

$$\vartheta2 = -1.1836 w^2 - 0.37607 w - 0.52894 \quad \text{Éq. 13}$$

$$\vartheta3 = -0.04554 w^2 + 1.8719 w + 0.39071 \quad \text{Éq. 14}$$

où w est la vapeur d'eau en g/cm^2 .

2.1.3.3 Calcul de l'émissivité par la méthode NDVI

L'indice de végétation normalisé (*Normalized difference vegetation index*; NDVI) est défini selon :

$$NDVI = \frac{\text{Bande } PIR - \text{Bande } R}{\text{Bande } PIR + \text{Bande } R} \quad \text{Éq. 15}$$

où *PIR* représente la bande du proche infrarouge et *R* la bande rouge. Les données de *NDVI* permettent le calcul de l'émissivité selon [Julien et al. \(2011\)](#) :

$$\varepsilon = 0.980 + 0.042 R1 \quad \text{Éq. 16}$$

$$\varepsilon = 0.985 \quad \text{Éq. 17}$$

$$\varepsilon = 0.971 - 0.018 * P \quad \text{Éq. 18}$$

L'équation 16 est valable pour $NDVI < 0,2$, l'équation 17 pour $NDVI > 0,5$ et l'équation 18 pour des *NDVI* comprises entre 0,2 et 0,5. Dans ces équations, *R1* est la réflectance de la bande rouge et *P* est défini par :

$$P = \frac{(NDVI - 0.2)^2}{0.09} \quad \text{Éq. 19}$$

Dans le cas de l'exemple proposé par [Julien et al. \(2011\)](#), l'intérêt est de cartographier la zone d'étude selon la proportion de végétation sur chaque pixel, en intégrant la valeur *NDVI* du sol sec (0,2) comme valeur minimale et la couverture en végétation (0,5) comme valeur maximale.

Dans le cas le plus général, la proportion de végétation *P* se calcule selon [Alipour et al. \(2003\)](#):

$$P = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad \text{Éq. 20}$$

Et l'émissivité se calcule selon :

$$\varepsilon = 0.004 - 0.0986 * P \quad \text{Éq. 21}$$

2.1.3.4 Méthode d'extraction de la température

La méthode proposée par [Xiong et al. \(2005\)](#) consiste à l'intégration de la radiance, de l'émissivité et de la loi de Planck pour le calcul de la température de surface selon :

$$T_s = \frac{T}{1 + \left(\lambda \frac{T}{\rho}\right) \ln(\varepsilon)} \quad \text{Éq. 22}$$

$$\rho = \frac{h * c}{\sigma} = 1.438 \times 10^{-2} \text{ m K} \quad \text{Éq. 23}$$

où h est la constante de Planck (6.626×10^{-34} J s), σ est la constante de Boltzman (1.38×10^{-23} J/K), c est la vitesse de la lumière (2.998×10^8 m/s). Pour ce calcul, T est la température au satellite (en K) exprimée selon :

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad \text{Éq. 24}$$

où $K1$ et $K2$ sont des constantes de calibration (en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$), L_λ est la radiance au capteur avec exprimée selon :

$$L_\lambda = (L_{\max, \lambda} - L_{\min, \lambda}) / 255 * DN + L_{\min, \lambda} \quad \text{Éq. 25}$$

Avec $L_{\max, \lambda}$ et $L_{\min, \lambda}$ correspondant à des paramètres relatifs à la bande thermique du *Landsat* TM et ETM+ trouvés sur le fichier de métadonnées téléchargé avec l'image alors que DN et le numéro digital du pixel [0,255].

Dans cette approche, l'émissivité se calcule selon :

$$\varepsilon = \xi_v * \varepsilon_v + (1 - \xi_v) \varepsilon_s \quad \text{Éq. 26}$$

où ε_v et ε_s sont les émissivités de la végétation et du sol, respectivement. Le paramètre ξ_v représente pour sa part la proportion de la végétation, exprimée selon :

$$\xi_v = 1 - \left(\frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^a \quad \text{Éq. 27}$$

où a est le coefficient de distribution de l'orientation des feuilles avec le canopée.

2.1.4 Indices d'humidité de sol et détection d'eau par la télédétection

La détection des exfiltrations par télédétection satellitaires demeure complexe, notamment en raison de la trop faible résolution spatiale des images satellites. Cependant, les exfiltrations d'eau souterraine peuvent affecter l'humidité des sols et donc avoir une influence sur la végétation. Les indices fréquemment utilisés pour la détection de l'eau de surface intègrent les bandes du visible (surtout le rouge et le vert) ainsi que les bandes IR. Parmi les indices les plus utilisés, on trouve le NDWI (*Normalised Difference Water Index*), le *Modified NDWI*, le WRI (*Water Ratio Index*), l'AWEI (*Automated Water Extraction Index*) et le NDMI (*Normalised Difference Moisture Index*) ([Rokni et al., 2014](#)). Pour l'humidité du sol, on note l'indice TVDI (*Temperature Vegetation Dryness Index*) qui s'appuie sur la température de surface et l'effet de végétation tel qu'évalué par l'indice NDVI (*Normalised Difference Vegetation Index*) ([Sandholt et al., 2001](#)).

2.1.4.1 Indices d'humidité des sols se basant sur l'IR

[Rokni et al. \(2014\)](#) ont réalisé une étude comparative des indices qui permettent la détection de l'eau de surface au niveau du lac Urmia en l'Iran. Les indices étudiés par ces auteurs intègrent les bandes du visible et de l'IR des images *Landsat ETM+* et *OLI* pour la période 2000-2013. Le tableau 2.3 présente un sommaire des indices employés dans l'étude.

Tableau 2.3: Formules de calcul des indices NDWI, NDMI, MNDWI, WRI, NDVI et AWEI

Nom	Formule	Interprétation	Référence
<i>Normalized Difference Water Index</i>	NDWI = (Green – NIR)/(Green + NIR)	Les valeurs positives sont attribuées à l'eau	(McFeeters, 2007)
<i>Normalized Difference Moisture Index</i>	NDMI = (NIR – MIR)/(NIR + MIR)	Les valeurs positives sont attribuées à l'eau	(Hoffhine Wilsona et Saderb, 2002)
<i>Modified Normalized Difference Water Index</i>	MNDWI = (Green – MIR)/(Green + MIR)	Les valeurs positives sont attribuées à l'eau	(Xu, 2007)
<i>Water Ratio Index</i>	WRI = (Green + Red)/(NIR + MIR)	L'eau à des valeurs supérieures à 1	(Shen et Li, 2010)
<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	NDVI = (NIR – Red)/(NIR + Red)	Les valeurs négatives sont attribuées à l'eau	(Rouse et al., 1974)
<i>Automated Water Extraction Index</i>	AWEI = $4 \times (\text{Green} - \text{MIR}) - (0.25 \times \text{NIR} + 2.75 \times \text{SWIR})$	Les valeurs positives sont attribuées à l'eau	(Feyisa et al., 2014)

NIR est la bande du proche infrarouge se situant dans le spectre 0,75-1 µm.

MIR est la bande du moyen infrarouge dans le spectre de 3-5 µm.

SWIR est correspond à la bande de l'infrarouge se situant dans la gamme de longueur d'onde 1-2,5 µm.

2.1.4.2 Indices d'humidité des sols se basant sur l'IRT (exemple TVDI)

TVDI est l'un des indices employés en télédétection, notamment pour les études en agriculture ([Jian-jun et al., 2017](#)). Il permet de produire des cartes d'humidité du sol en intégrant la température de surface (LST, *land surface temperature*) en fonction de l'indice de végétation NDVI (figure 2.10). Selon [Chen et al. \(2015\)](#), cet indice s'avère cohérent avec des mesures *in situ* de l'humidité du sol. Le TVDI varie dans l'intervalle [0,1] les valeurs plus faibles correspondant aux zones humides et les valeurs plus élevées correspondant aux zones moins humides ([Sandholt et al., 2001](#)).

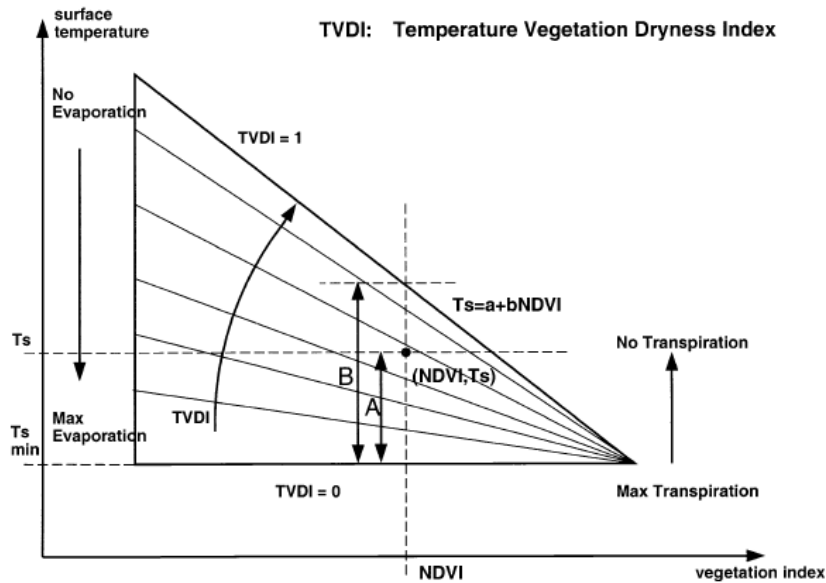


Figure 2.10: Définition de TVDI ([Sandholt et al., 2001](#))

Selon ([Chen et al., 2015](#)), le TVDI est défini comme suit :

$$TVDI = \frac{T_s - T_{smin}}{T_{smax} - T_{smin}} \quad \text{Éq. 28}$$

$$T_{smax} = a + b(NDVI) \quad \text{Éq. 29}$$

où T_s est la température de surface, T_{smin} la température de surface minimale, T_{smax} la température de surface maximale, $NDVI$ est l'indice de végétation pour le pixel ciblé et a et b sont des paramètres déterminés par la méthode des moindres carrés sur les données réelles.

2.2 Télédétection thermique à haute résolution

La télédétection spatiale par IRT peut s'avérer trop imprécise pour le suivi et la cartographie des phénomènes à l'échelle locale. Ainsi, il est parfois nécessaire d'avoir recours à des images acquises à plus basse altitude (figure 2.11). Les caméras et capteurs transportés par des aéronefs permettent de détecter des anomalies plus fines que celles détectées par satellite. Autrement dit, la précision

de détection des composantes de surface augmente avec la diminution de l'altitude de vol et dépend de la technologie employée.

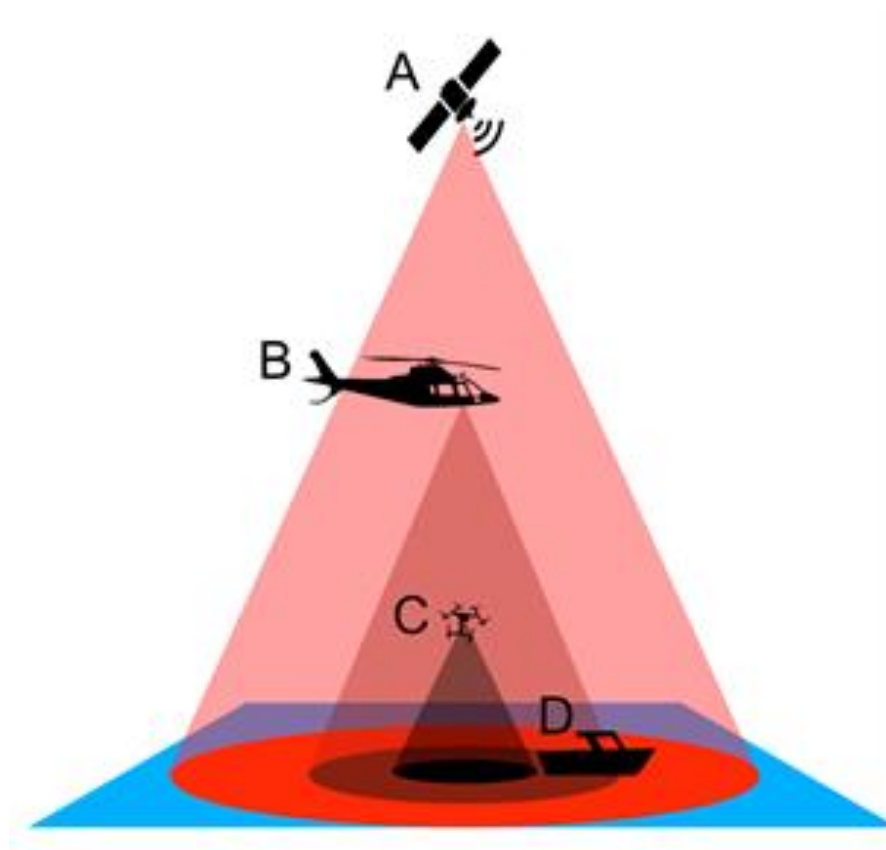


Figure 2.11: Hiérarchie de suivi de phénomène terrestre (A) satellite, (B) par avion, (C) drone et (D) *in situ* ([Ferrara et al., 2017](#))

2.2.1 Systèmes aéroportés

Les systèmes aéroportés sont généralement développés pour augmenter la précision et ainsi permettre une meilleure compréhension des phénomènes terrestres à l'échelle locale. Depuis les années 1980, la recherche en aéronautique a permis la commercialisation d'avions légers ayant des caractéristiques de portance, d'autonomie, de vitesse et d'altitude de vol requises pour l'acquisition d'images à haute résolution ([Tarussov et al., 2007](#)). Au fil du temps, le développement de nouveaux systèmes volants téléguidés (drone, ailes volantes) a permis une évolution considérable dans plusieurs champs de la recherche scientifique, y compris dans le domaine de la télédétection et de

la photogrammétrie. La structure et les composantes techniques des appareils utilisés diffèrent selon le champs d'application ([Gupta et al., 2013](#)). Certains des appareils sont décrits ci-dessous.

2.2.1.1 Aéronefs avec pilote à bord

L'utilisation des avions et des hélicoptères en télédétection et photogrammétrie est plus répandue lorsqu'il s'agit d'études ciblant des zones couvrant plusieurs kilomètres. L'intérêt principal de leur utilisation concerne l'amélioration de la précision des images par rapport aux données satellitaires. Les capteurs imageurs intégrés sur aéronefs sont sélectionnés en fonction des paramètres de la surface du sol et des phénomènes étudiés. À titre d'exemple, [McCaul et al. \(2016\)](#) ont utilisé des images satellitaires *Landsat* ETM+, et des images prises par un module de capteur de NCG (*National Center of Geocomputing*) comportant quatre capteurs (dont le visible et le thermique) pour le suivi des exfiltrations d'eau au niveau des zones côtières. Ce dernier était assemblé sur un avion de type *Cessna 172* (figure 2.12).

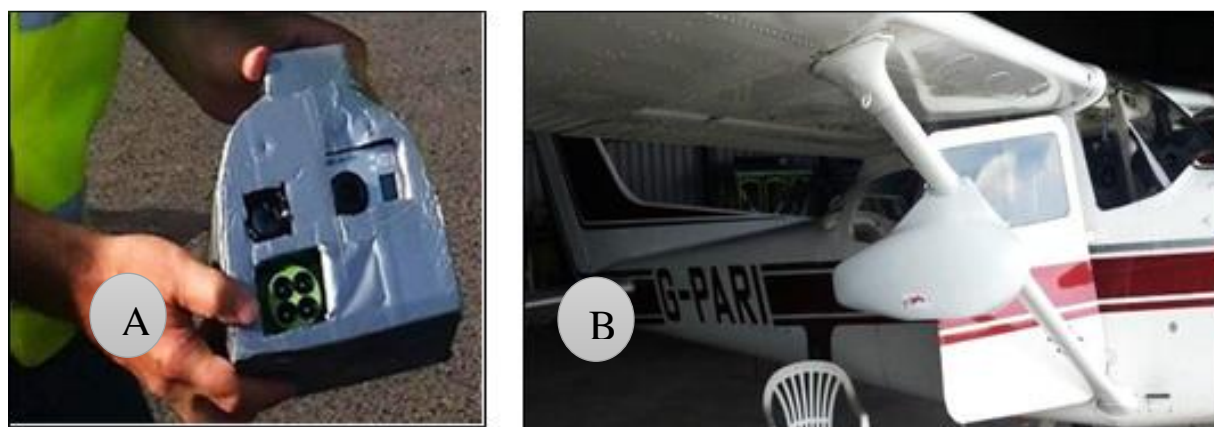


Figure 2.12: A) module de capteur NCG B) avion Cessna 172 ([McCaul et al., 2016](#))

[Ferrara et al. \(2017\)](#) ont pour leur part utilisé un hélicoptère de type *Rotorcraft AW139* et un drone avec une caméra thermique *FLIR T620* pour évaluer les exfiltrations d'eau en zone côtière. Ces auteurs ont réalisé une confirmation hiérarchique à différentes échelles (satellite, hélicoptère et drone) de la présence d'exfiltrations d'eau (figure 2.13). Selon les auteurs, l'utilisation de la télédétection thermique multi-échelles fournit une gamme de couverture spatiale et temporelle adéquate pour le suivi de la qualité de l'eau dans le contexte étudié.

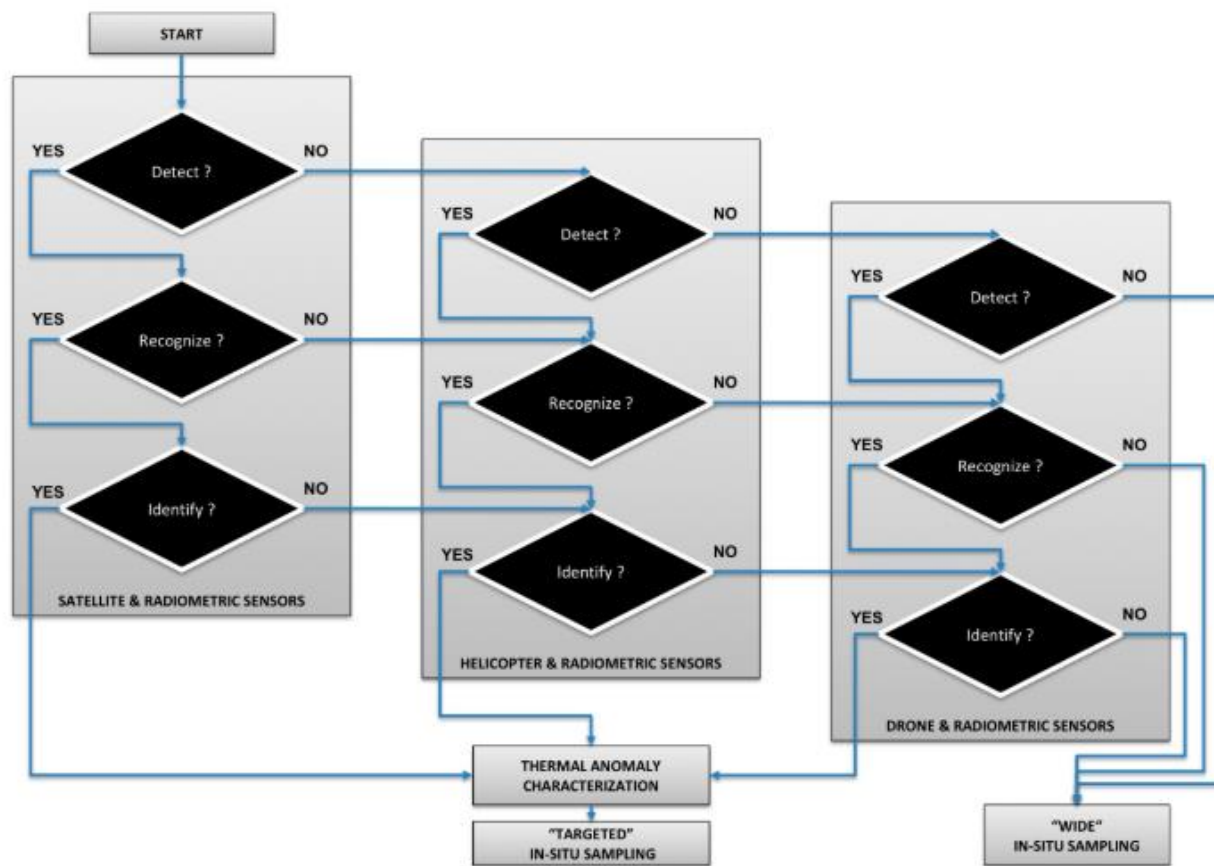


Figure 2.13: Hiérarchie de suivi des exfiltrations (détection, reconnaissance et identification) par trois plates-formes (satellite, hélicoptère et drone) (Ferrara *et al.*, 2017)

2.2.1.2 Aéronefs téléguidés

L'évolution technologique en aérospatiale pendant la dernière décennie a notamment permis le développement des UASs (*Unmanned Aircraft Systems*). Ces aéronefs servaient en premier lieu des applications militaires, avant de se propager pour servir dans multitude de domaines (Harrison, 2013). Parmi les domaines d'application des aéronefs téléguidés, on cite le suivi des espèces fauniques pour leur préservation et la lutte contre leur extinction. À titre d'exemple, Christie *et al.* (2016) ont réalisé une comparaison entre l'utilisation des UAS avec des données satellitaires NOAA pour le suivi des lions de mer de Steller, en Alaska (annexe B.1). L'apport des UASs en photogrammétrie et en télédétection est substantielle (Harvey et Luketina, 2014). Ils permettent l'acquisition de données à très haute résolution pour la génération d'orthomosaïques et de modèles numériques de terrain MNT (figure 2.14). Les drones sont parmi les UASs les plus utilisés de nos

jours. Ils peuvent être équipés de plusieurs outils (figure 2.15) permettant des utilisations dans les domaines de la télédétection et de la photogrammétrie ([Daponte et al., 2017](#)).

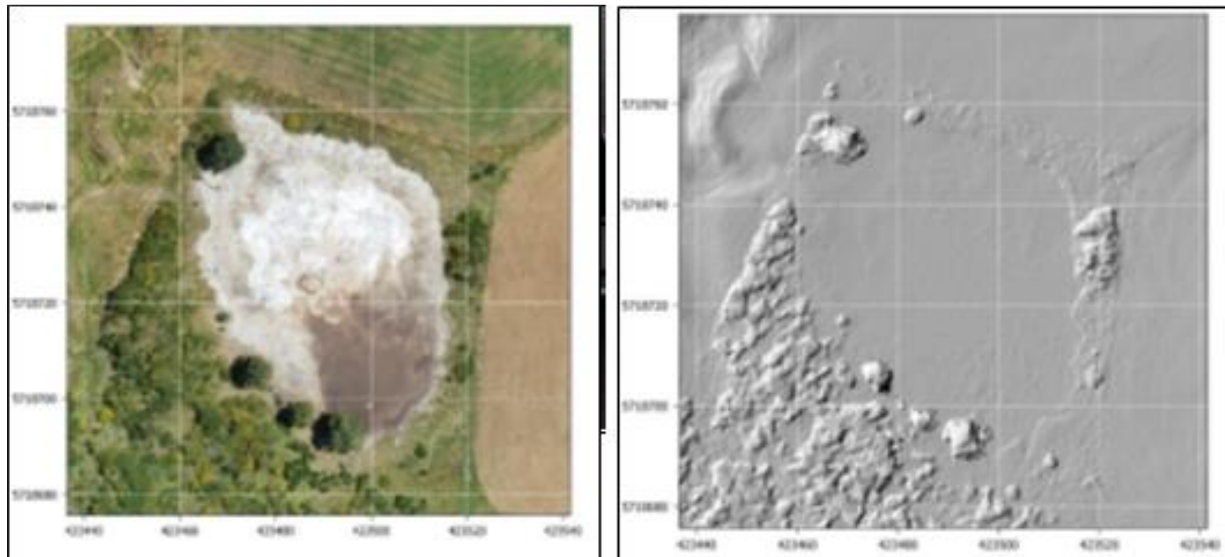


Figure 2.14: Orthomosaique et MNT acquises par drone *DJI phantom2 quadcopter* ([Harvey et Luketina, 2014](#)).



Figure 2.15: Schéma des composants d'un drone ([Daponte et al., 2017](#))

L'utilisation des caméras IRT transportées par UASs permet le suivi de phénomènes thermiques avec une grande précision. Ils permettent la collecte d'images à relativement faible coût dans des endroits parfois difficiles d'accès. L'intégration des GPS simplifie le géoréférencement des images collectées par les UASs et les rend plus compétitives par rapport aux images aériennes prises par avion ou satellite. L'imagerie thermique par drone a notamment été utilisée pour la détection des anomalies thermiques engendrées par la décharge d'eau souterraine en zone côtière. À titre d'exemple, la figure 2.16 montre l'effet de la résolution spatiale sur la représentation des panaches d'eau souterraine tels que mesurés en employant un drone (plus précis) et un avion (moins précis).

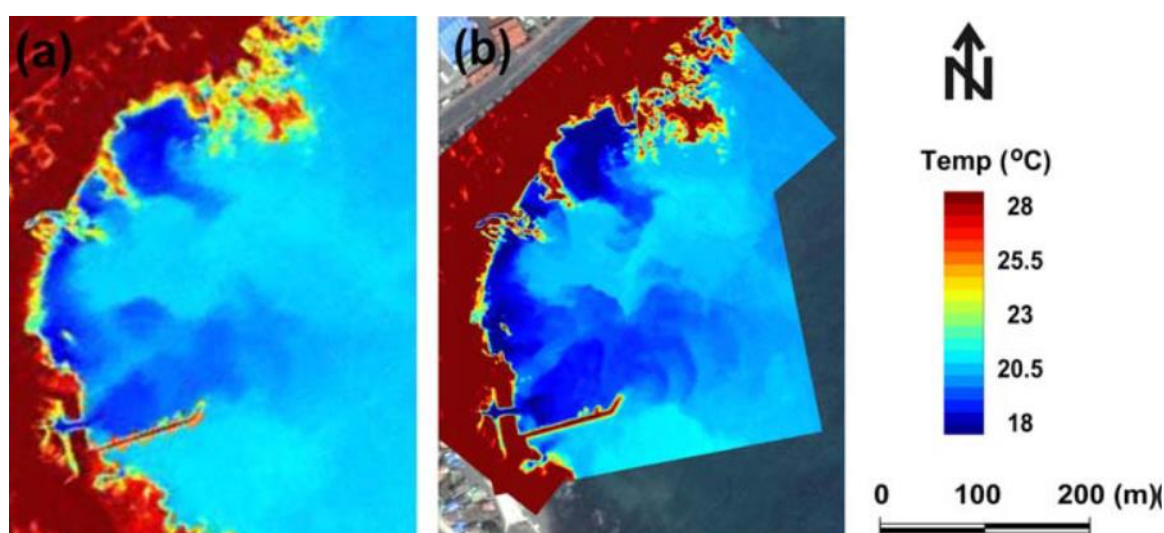


Figure 2.16: Comparaison des images thermiques prises par a) avion b) drone ([Lee et al., 2016](#))

2.2.1.3 Les caméras thermiques

Les caméras thermiques ont connu une évolution drastique après leur première apparition en 1965. Elles sont capables de détecter ce que l'œil humain est incapable de percevoir. Elles permettent notamment la détection d'anomalies thermiques ([Rai et al., 2017](#)). Les caméras thermiques sont de deux grandes catégories, soit les caméras à scanner de numérisation et les caméras à matrice plan-focal 2-D (IRFPA). La première enregistre des points ou des lignes successives tout en balayant la scène cible, tandis que les IRFPA enregistrent simultanément tous les objets de la scène à travers les capteurs élémentaires de la matrice. La technologie des IRFPA est la plus utilisée en raison de sa rapidité et sa haute résolution. Les détecteurs utilisés sont généralement de deux types,

soit les détecteurs de photons et les détecteurs thermiques. Les premiers convertissent les radiations électromagnétiques en signal électrique, ils sont plus chers et sensibles aux petites variations de température. Quant aux détecteurs thermiques, ils sont composés de deux types de capteurs, les capteurs ferroélectriques et les capteurs microbolomètres qui reçoivent les radiations thermiques et se chauffent avant de convertir la température en signal électrique (figure 2.17).

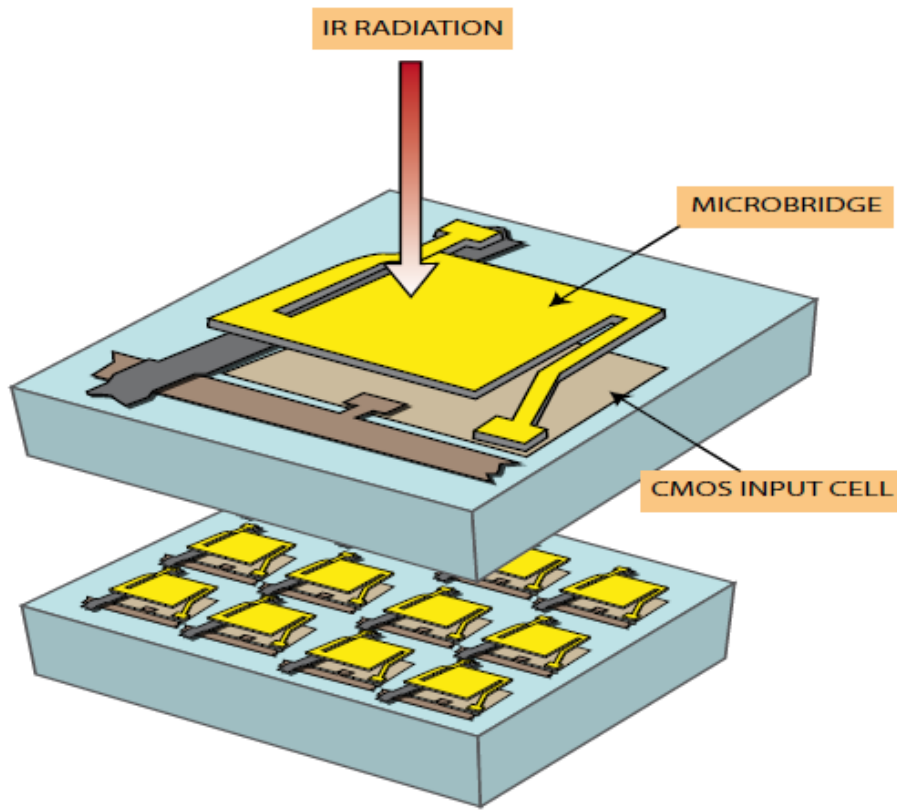


Figure 2.17: Schéma d'un détecteur microbolomètre ([FLIR, 2011](#))

La figure 2.18 illustre le schéma des modules d'un capteur microbolomètre. Ce type de capteur est le plus répandu, il ne nécessite pas de refroidissement et est efficace en matière de consommation d'énergie. Les lentilles pour les caméras thermiques sont faites de germanium, un metalloïde transparent aux rayons IR. Le germanium influence l'intégration des systèmes de refroidissement selon la taille de la lentille employée et la distance focale ([Rai et al., 2017](#)).

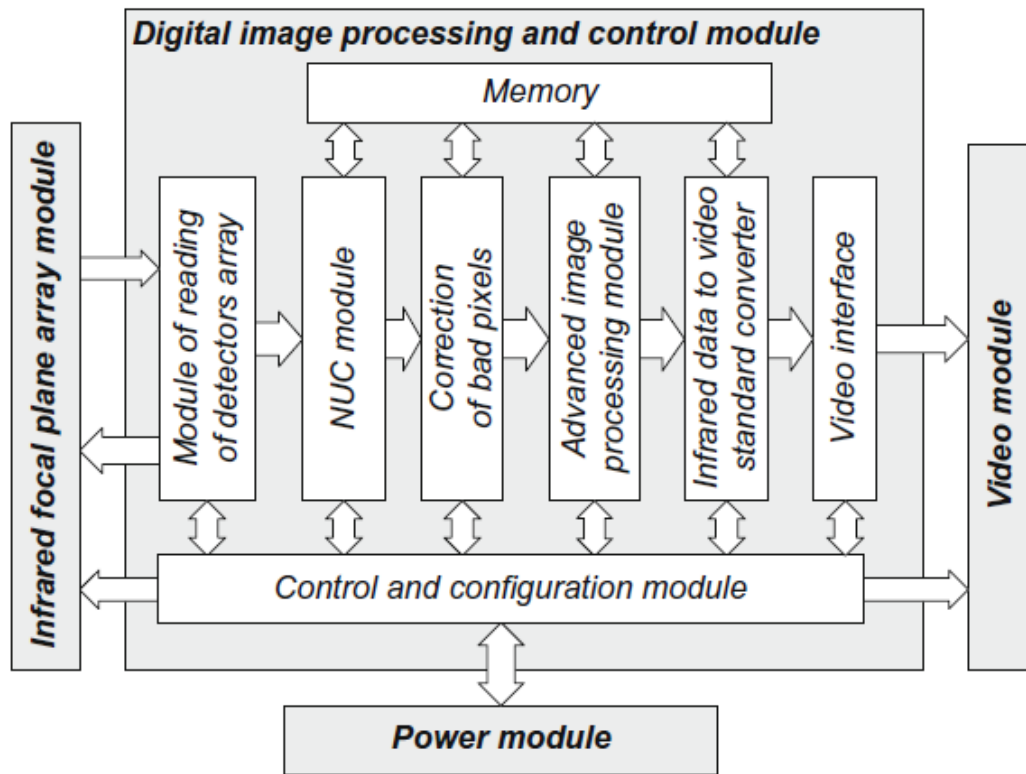


Figure 2.18: Schéma des modules d'un capteur microbolomètre ([Sosnowski et al., 2018](#))

2.2.2 Acquisition et traitement des images

La réalisation des missions de terrain par aéronef téléguidé requiert un ajustement selon les conditions météorologiques. Les consignes exigées par les constructeurs d'UASs pour assurer la stabilité des vols et l'acquisition d'images à haute résolution doivent être respectées. Ces consignes peuvent notamment concerner la température de l'air et la vitesse du vent. Outre les conditions météorologiques, le choix des périodes d'acquisition est important en vue d'optimiser le ratio signal/bruit ([Cardenas et al., 2014](#)).

2.2.2.1 Critères optimaux d'acquisition des images thermiques

L'altitude de prise de vue des images influence la résolution spatiale et le nombre d'images requises pour couvrir une zone d'étude. Plus l'altitude est grande, plus la résolution et le nombre d'images diminuent ([Wawrzyniaka et al., 2013](#)). La vitesse de vol semble cruciale pour une meilleure prise de vue. Lorsque la vitesse est grande, l'UAS perd sa stabilité lors des captures, ce

qui réduit la qualité des images ([Lisein et al., 2014](#)). Selon [Cardenas et al. \(2014\)](#), pour la détection des anomalies thermiques du sol, il est préférable de réaliser des missions entre 12:00 AM et 8:00 AM, lorsque les basses températures sont facilement identifiables sur les images (figure 2.19). Le contraste thermique entre les cours d'eau et les objets périphériques est presque constant pendant la nuit, ce qui facilite la classification et l'identification du cours d'eau sur les images thermiques. Les différences entre les composantes surfaciques sont alors considérables (figure 2.20).

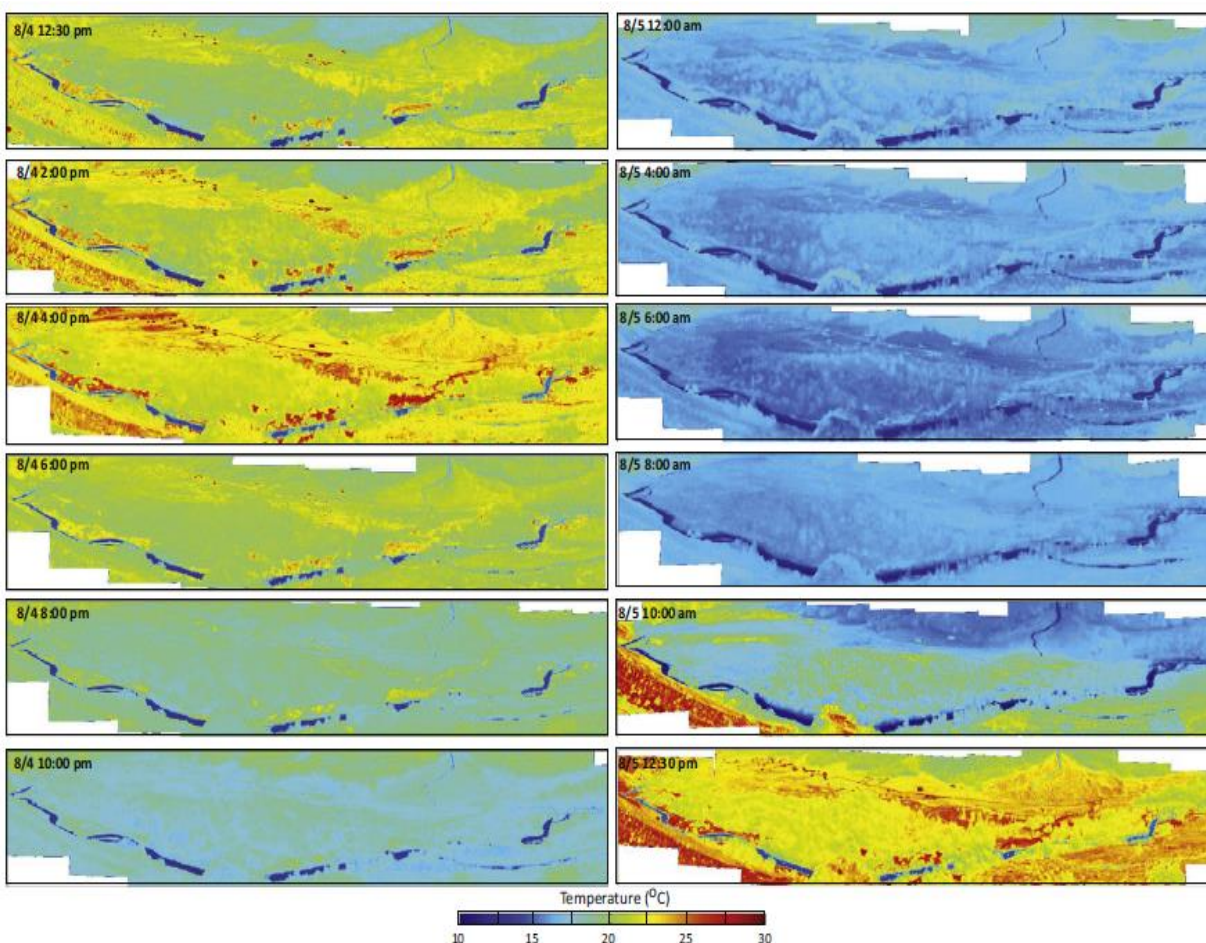


Figure 2.19: Prises de vue thermiques de la rivière Urbash et de la plaine inondable Sandey pendant différentes heures de la journée ([Cardenas et al., 2014](#))

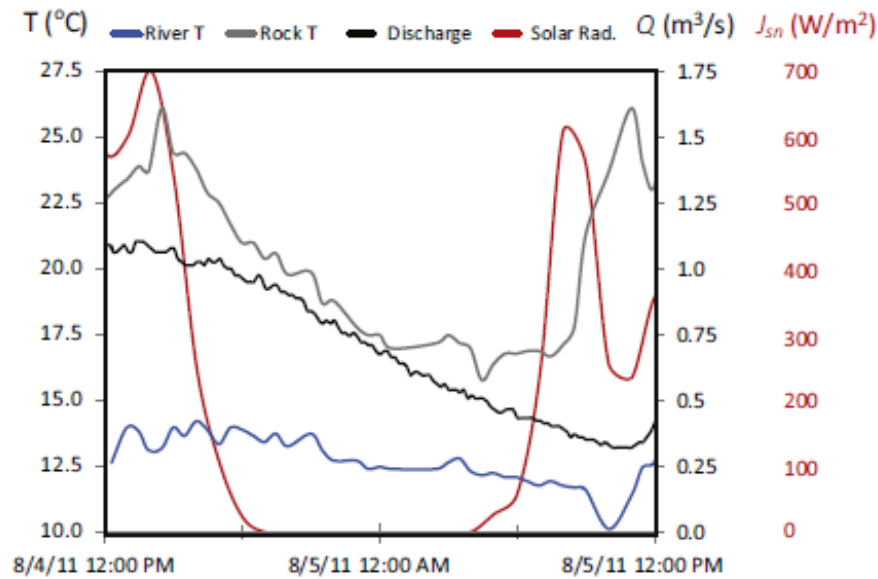


Figure 2.20: Température de la rivière Urbash et du roc avec la variation des radiations solaires et du débit ([Cardenas et al., 2014](#))

Les paramètres météorologiques ayant la plus grande influence sur les images thermiques incluent (1) les radiations solaires, (2) la température de l'air, (3) la vitesse du vent, (4) l'humidité relative et (5) la visibilité,

2.2.2.2 Traitement des images thermiques

Le développement du marché des UASs a poussé les entreprises de photogrammétrie et de télédétection à développer des solutions pour le traitement des images, dont le géoréférencement et le mosaïquage pour la restitution spatiale des zones survolées et la génération de modèles 3D.

2.2.2.2.1 Géoréférencement

Le géoréférencement consiste à positionner chaque image dans son contexte spatial pour pouvoir réaliser des calculs et des croisements avec d'autres données. Les approches de géoréférencement reposent sur des techniques complexes en termes de calculs et de corrections. Cependant, grâce aux développements technologiques, ces techniques deviennent de plus en plus simples d'utilisation et performantes. Lors de la prise des images, quatre erreurs systématiques peuvent nuire au processus de géoréférencement, à savoir (1) la non intersection des axes fiduciaires en un

point principal, (2) les distorsions causées par les lentilles et l'atmosphère, (3) la courbure de la terre et (4) le retrait ou l'expansion des matériaux photographiques ([Massasati, 2002](#)). Le géoréférencement est principalement basé sur des formules mathématiques de colinéarité et de rotation qui permettent le passage du système de coordonnées de l'image au système de coordonnées spatial ([Kraus, 2007](#)) (figure 2.21). La méthode indirecte de géoréférencement a pour objectif d'introduire les coordonnées des points connus pour simplifier l'orientation externe, tandis que la méthode directe se base sur le GPS lors de la prise des vues pour la densification des points de mesures sur les images et rend le calcul des paramètres de l'orientation externe plus automatique ([Cramer et al., 2001](#)).

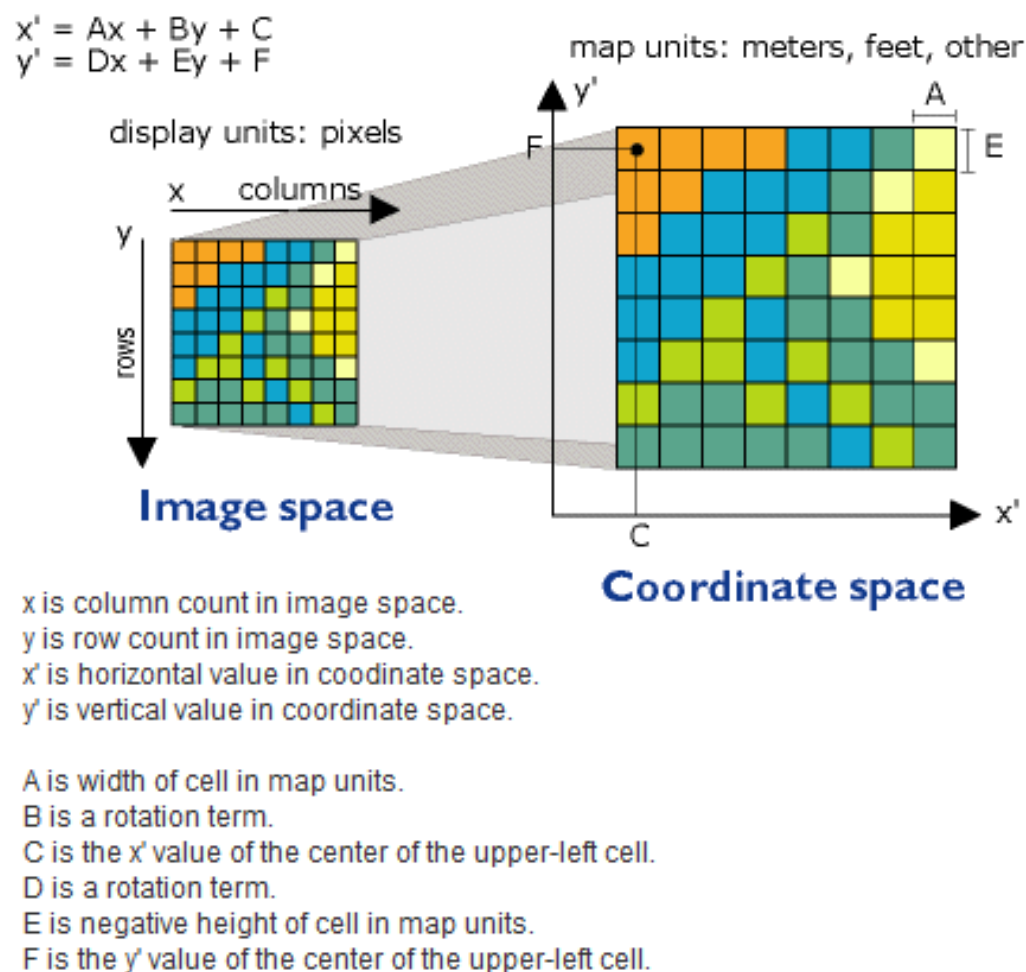


Figure 2.21: Équations de passage de système de coordonnées images au système de coordonnées spatial ([ESRI, 2020](#))

2.2.2.2.2 Mosaïquage

Le mosaïquage des images est un processus de photogrammétrie qui vise la reconstitution des zones survolées selon des traitements mathématiques. On distingue deux méthodes principales. La première consiste en un mosaïquage basé sur l'orientation interne et externe des images pour la reconstitution du terrain et la minimisation des erreurs dues à la rotation et la translation de l'imageur. L'approche prend en considération les coordonnées GPS et les orientations lors des prises de vue ainsi que les points de control GCPs. La seconde approche correspond au mosaïquage par approche mathématique pour la reconstitution des géométries des paires d'images pour assurer leur alignement et la minimisation des distorsions (figure 2.22). Cette approche suppose que la distorsion des lentilles est négligeable ou connue et que la zone survolée est presque plane ([Yuhua et al., 2016](#)).

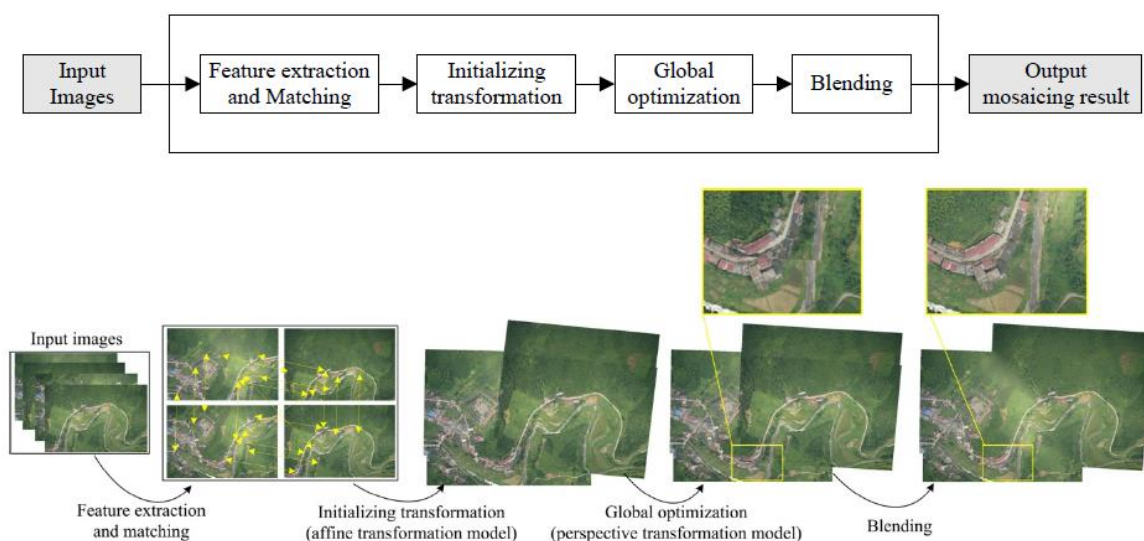


Figure 2.22: Schéma de mosaïquage par approche géométrique ([Yuhua et al., 2016](#))

2.2.2.2.3 Correction du vignettage

Le vignettage est l'assombrissement circulaire du centre des images vers leurs bordures. L'effet est causé par le chemin emprunté par les ondes et à leur atténuation le long de cette trajectoire ([Lelong et al., 2008](#)). Le principe pour l'élimination de cet effet consiste en la sommation de l'image avec un filtre circulaire plus sombre au centre, avec dégradation de l'intensité des pixels

vers les bordures (figure 2.23). L'application du filtre d'anti-vignettage nécessite la conversion de l'image de son format RGB en HLS (hue saturation lightness) avec une reconversion en RGB après son application ([Lelong et al., 2008](#)).

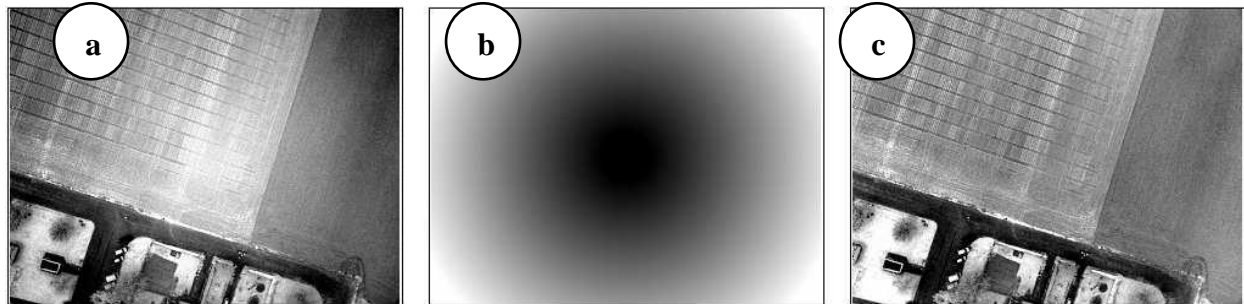


Figure 2.23: Exemple de correction de vignettage **a)** image originale **b)** filtre d'anti-vignettage **c)** image résultante ([Lelong et al., 2008](#))

2.2.2.3 Algorithmes de classification et détermination des anomalies

La phase de classification des données pour la détermination des anomalies thermiques constitue une étape subséquente à la correction des images, à leur géoréférencement et au mosaïquage. Différentes méthodes sont utilisées pour l'analyse des images, dont les méthodes supervisées et non supervisées ainsi que les méthodes orientées objet.

2.2.2.3.1 Méthode supervisée

Cette méthode consiste en l'ajout de nouveaux éléments à une classification prédéfinie. Plusieurs algorithmes sont développés dans cette perspective, dont le classificateur flou, le SVM (*support vector machine*), la méthode K-NN (*K Nearest Neighbours*) et le classificateur LD (*Logistic Discrimination classifier*). Le classificateur flou intègre la probabilité pour l'affectation d'un objet à une classe. Pour un objet O , il affecte plusieurs probabilités (P_i) calculées par la fonction d'appartenance d'un ensemble flou selon le nombre de classes (C_i). Généralement, l'objet doit appartenir à la classe pour laquelle il a la plus grande probabilité. L'algorithme calcule aussi l'indicateur de stabilité des mesures ΔP_i , lequel est idéal lorsque $P_i = 1$ et les autres $P_j = 0$ avec $i \neq j$ pour que l'objet 'O' appartienne à la classe C_i ([Marçal et al., 2007](#)). L'algorithme SVM s'intéresse à résoudre un problème d'optimisation linéaire. En passant d'un espace X à un espace plus grand H à travers des fonctions de noyau (Kernel) qui sont généralement des fonctions

gaussiennes et polynomiales ([Marçal et al., 2007](#)). L'objectif est de s'assurer que la distance entre les bordures des classes soit maximale. L'algorithme K-NN est basé sur le calcul des distances euclidiennes entre une observation x_0 avec toutes les autres observations (objets ponctuels ou pixels). En se basant sur les plus proches voisins (distance minimale), il classe les objets souhaités un par un. L'algorithme LD fait référence au théorème de Bayes. Il vise à assigner l'observation x_0 à une classe k selon un calcul de probabilité.

2.2.2.3.2 Méthodes non supervisées

Les méthodes non supervisées visent à traiter les éléments ou pixels et à les affecter à des classes. L'algorithme le plus répandu est le FCM (*Fuzzy C-means clustering*) qui s'utilise pour la reconnaissance des formes ([Bezdek, 1981](#)).

L'algorithme est itératif et repose sur le calcul d'une fonction objectif ([Bezdek et al., 1984](#)). L'utilisation de cet algorithme a montré sa capacité pour la détection des formes pour les images par réflectance spectroscopique dans le proche infrarouge ([Mansfield et al., 1998](#)).

2.2.2.3.3 Méthodes de classification orientées objet

La méthode de classification orientée-objet est l'une des plus utilisées pour le traitement d'images. Elle est plus précise que la méthode orientée-pixel pour les différentes résolutions d'images ([Estoque et al., 2015](#)). La méthode de classification orientée-objet fut développée notamment en raison du besoin de techniques précises pour l'interprétation et en réponse aux contraintes imposées par l'augmentation de la résolution des images ([Veljanovski et al., 2011](#)). L'algorithme de la méthode se résume en trois grands axes : (1) la segmentation de l'image selon des caractéristiques telles que la géométrie et la texture, (2) la classification sémantique et (3) la post-classification pour la vérification et l'élimination des erreurs (figure 2.24). L'algorithme fut développé pour la première fois dans le logiciel *eCognition* en 2000 avant qu'il soit adopté par d'autres logiciels de traitement des images de télédétection, dont *ERDAS*, *ArcGIS* et *ENVI* ([Veljanovski et al., 2011](#)).

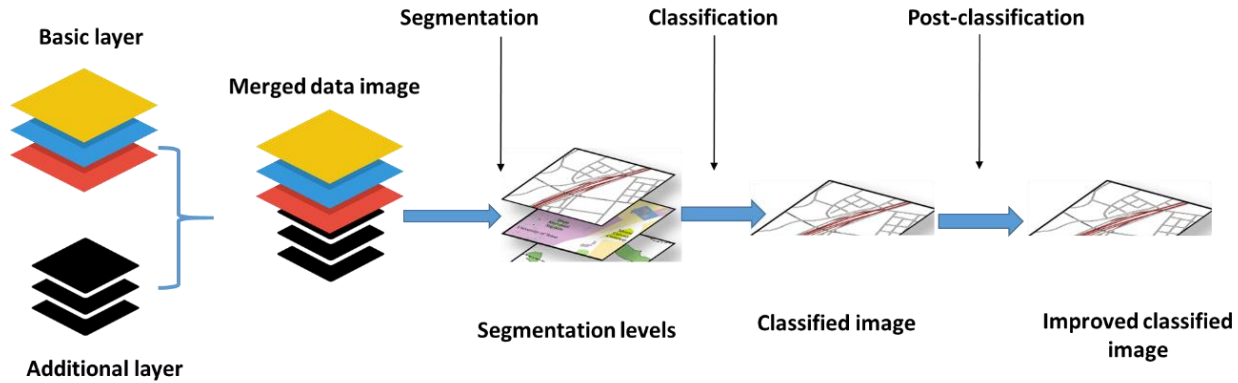


Figure 2.24: Processus de classification Orientée-Objet ([Veljanovski et al., 2011](#))

2.2.2.3.4 La méthode de classification par Grouping Analysis

La méthode par *Grouping Analysis* (ci-après GA) est applicable sur des jeux de données comportant une ou plusieurs variables. Elle vise la création de groupes de données tout en permettant de maximiser les ressemblances entre les membres de chaque groupe tout en maximisant la différence entre les groupes. Cette méthode peut intégrer des contraintes spatiales en termes de distance et de voisinage. Elle s'appuie sur l'algorithme *F-statistique* de Calinski-Harabasz. Cet algorithme calcule en premier lieu une valeur R^2 qui indique la capacité de classification de la population selon les champs spécifiés. Pour un R^2 plus grand, la variable ou le champ choisit divise efficacement les entités de la population ([Calinski et Harabasz, 1974](#); [Venkatramanan et al., 2015](#); <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/tool-reference/spatial-statistics/how-grouping-analysis-works.htm>). L'évaluation du nombre optimal de groupes se fait selon le calcul d'un ratio des similarités et des différences entre les groupes :

$$\frac{R^2}{n_c - 1} \bigg/ \frac{1 - R^2}{n - n_c} \quad \text{Éq. 30}$$

$$R^2 = \frac{SST - SSE}{SST} \quad \text{Éq. 31}$$

où le terme SST représente la différence entre les groupes et le terme SSE représente les similarités entre les groupes :

$$SST = \sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{n_v} (V_{ij}^k - V^k)^2 \quad \text{Éq. 32}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{n_v} (V_{ij}^k - V_t^k)^2 \quad \text{Éq. 33}$$

où n représente le nombre d'entités, n_i le nombre des entités d'un groupe i , n_c le nombre de groupes, n_v le nombre des variables/champs pour la classification, V_{ij}^k la valeur de la k^{th} variable de j^{th} entité dans le groupe i^{th} , V^k la moyenne des valeurs de la variable k^{th} et V_t^k La moyenne des valeurs de la variable k^{th} pour le groupe i . La méthode génère à la fois une classification spatiale des entités par nombre de groupes et un rapport qui détaille les calculs statistiques réalisés (annexe C). Cette méthode de classification est celle utilisée dans le cadre du présent projet. Elle est appliquée sur des données ponctuelles de température pour la délimitation des zones susceptible de correspondre à des exfiltrations des eaux souterraines tant par les images thermiques Landsat 8 que par celles acquises par drone.

2.3 Mesures thermiques *in situ*

Les essais *in situ* par sondes thermiques dans les zones humides permettent de collecter des données avec une très haute résolution thermique. Cette résolution varie selon le type de sonde utilisée et la technologie employée. Ces données présentent une base de comparaison par rapport aux données thermiques acquises par télédétection. L'utilisation des montages intégrant des données géoréférencées permet l'application des méthodes d'interpolation géospatiales qui demeurent cruciales pour la reconstitution de cartes de température.

2.3.1 Généralité sur les sondes thermiques et les fibres optiques

L'apparition des sondes thermiques programmables à haute résolution permet aujourd'hui de surmonter les problèmes de précision et de la représentativité des mesures collectées par les anciens thermomètres ([Webb et al., 2008](#)). Les nouvelles générations de sondes ont notamment permis d'améliorer la compréhension du comportement thermique des cours d'eau ([Webb et al., 2008](#)). En parallèle aux sondes thermiques, l'utilisation des fibres optiques a permis des mesures de

température à très haute précision appliquées à des cours d'eau ayant des centaines de kilomètres ([Wawrzyniak, 2012](#)).

2.3.1.1 Sondes thermiques

Les mesures de températures s'appuyant sur l'utilisation de sondes thermiques suivent généralement un protocole en quatre phases, soit (1) le plan d'étude, (2) l'échantillonnage, (3) le traitement des données et (4) l'archivage et le stockage des données ([Dunham et al., 2005](#)). Le plan d'étude implique le choix de la sonde selon les objectifs de l'étude. Dans le marché des sondes thermiques, on trouve plusieurs compagnies produisant des capteurs ayant différentes caractéristiques techniques (Annexe B.2). En principe, les critères à prendre en considération incluent la précision, la durabilité, la capacité de mémoire, la résistance à la pression d'eau et les possibilités de programmation ([Dunham et al., 2005](#)). L'échantillonnage sur le terrain doit prendre en considération les intervalles de température anticipées sur le site d'étude et assurer la protection et la préservation des données et des sondes contre les perturbations externes. Le traitement des données se fait selon les objectifs des études mais nécessite toujours une vérification et une analyse préliminaire de la correspondance des mesures réalisées avec la nature du terrain. La traçabilité des missions de terrain nécessite l'adoption des techniques d'archivage des données au sein de fichiers structurés (Annexe B.3). La figure 2.25 illustre un exemple de montage utilisé pour l'acquisition de données thermiques avec une sonde de type *CDT diver*. Le montage est constitué d'une bouée à laquelle est attachée une sonde *CTD diver* qui permet la mesure de la conductivité, de la température et de la pression d'eau. La sonde est attachée par une corde à un ancrage de métal pour assurer sa stabilité. La bouée est tirée par un bateau sur lequel un GPS est installé.



Figure 2.25: Montage d'une sonde thermique pour la collecte des mesures *in situ* ([McCaul et al., 2016](#))

2.3.1.2 Fibre optique (DTS-FO)

La fibre optique est devenue de plus en plus importante pour la réalisation de suivis thermiques au cours des trente dernières années. Elle s'utilise dans plusieurs domaines, dont la détection du feu dans les tunnels, la détection des fuites de gaz et d'eau dans les pipelines et pour l'évaluation des zones d'exfiltration d'eau souterraine ([Failleau et al., 2017](#)). Les capteurs de température distribuée par fibre optique DTS-FO sont sensibles à l'atténuation du signal au niveau du FO suite aux phénomènes de diffusion, de dispersion chromatique et de réflexions parasites ([Failleau et al., 2017](#)). Le calcul de la température par un système FO est un résultat de traitement du signal rétrodiffusé (**figure 2.26**).

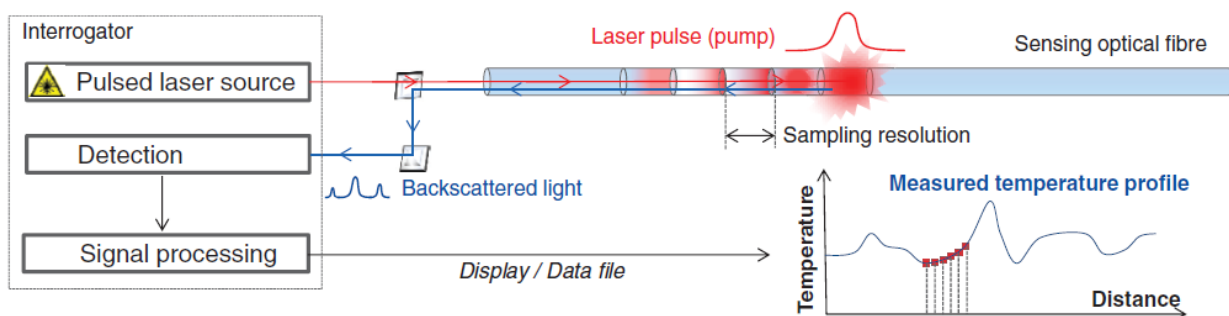


Figure 2.26: Schéma de mesure de la température par DTS-FO ([Failleau et al., 2017](#))

À titre d'exemple, [Macfarlane et al. \(2002\)](#) ont utilisé la DTS-FO pour la détermination des caractéristiques physiques du sol par le pompage et la réinjection d'eau chaude dans deux puits séparés de 13 m (figure 2.27).

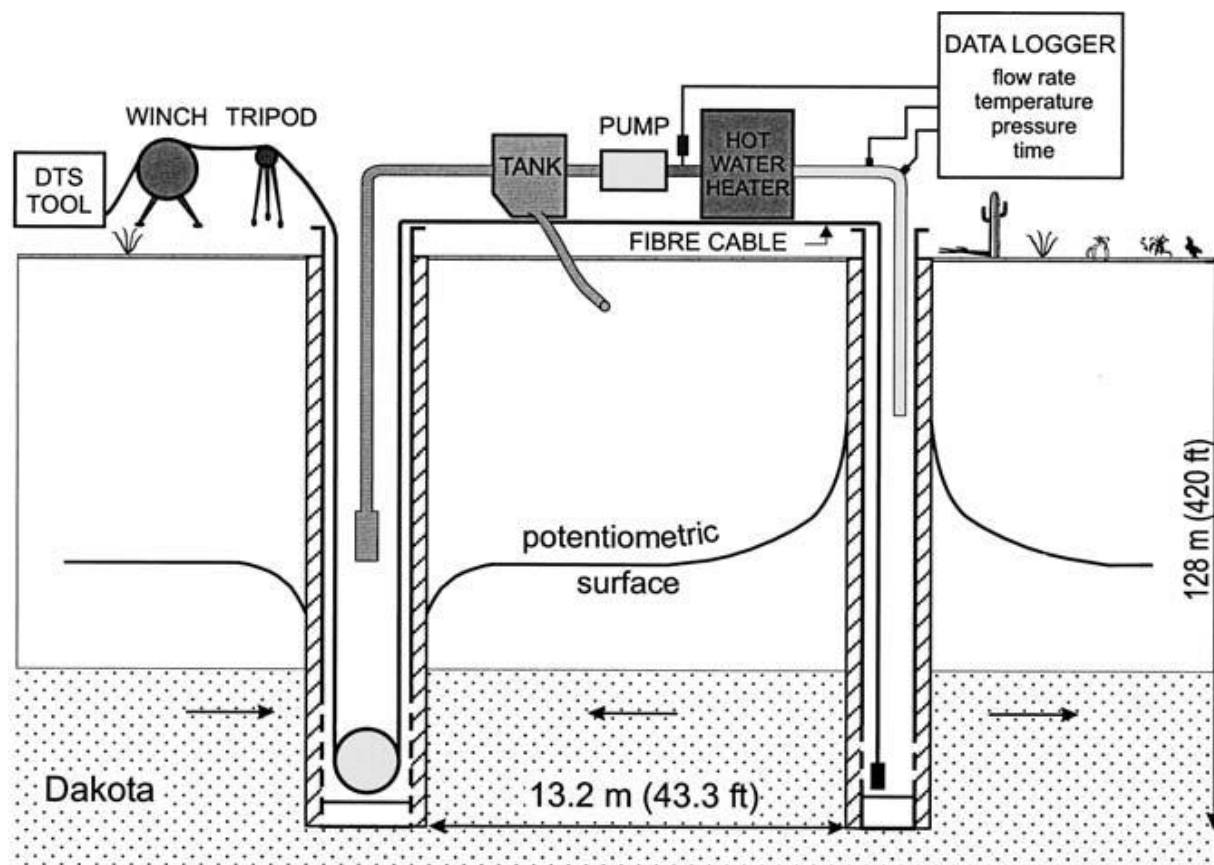


Figure 2.27: Schéma de l'utilisation des DTS pour le suivi du changement de température entre deux puits par pompage et réinjection de l'eau chaude ([Macfarlane et al., 2002](#))

La détection distribuée de la température par FO peut aussi servir à la détermination des exfiltrations d'eau souterraine. La complexité des installations permettant de couvrir des grandes surfaces d'étude et les frais du matériel et du personnel, ainsi que le temps important de traitement des données rendent toutefois l'utilisation des DTS plus onéreuse que la télédétection IR, que ce soit par caméras aéroportées ou portatives ([Har et al., 2015](#)). Selon les mêmes auteurs, l'avantage majeur des DTS-FO concerne leurs capacités à prendre des mesures de température en continu, ce qui permet une analyse détaillée de systèmes en régime transitoire. Les DTS ont également permis de documenter la variabilité spatiale des exfiltrations au sein de tourbières ([Lowry et al., 2007](#)).

2.3.2 Traitement et cartographie des données *in situ*

La compréhension spatiale des données de mesures par les sondes thermiques ou par système de mesures distribuées de température par fibre optique DTS-FO nécessite l'application des fonctions mathématiques d'interpolation spatiale pour l'estimation de la température là où les mesures *in situ* sont absentes ([Azpurua et Dos Ramos, 2010](#)). La précision des données dépend du nombre de points de mesures, de leur dispersion spatiale et de la méthode d'interpolation choisie.

2.3.2.1 Méthodes d'interpolation spatiale

Plusieurs méthodes d'interpolation sont développées pour la cartographie de propriétés mesurées de façon ponctuelle. Ces méthodes sont utilisées dans divers domaines dont l'exploration minière, la météorologie, la géochimie et la cartographie thermique. Les méthodes les plus utilisées dans les systèmes d'informations géographiques (SIG) incluent le krigeage, la pondération par l'inverse de distance IDW et le *spline* ([Azpurua et Dos Ramos, 2010](#)). La méthode de krigeage porte le nom de l'ingénieur minier sud-africain qui l'a développé pour la première fois en 1951. Elle est considérée parmi les méthodes géostatistiques les plus utilisées ([Siu-Ngan Lam, 2013](#)). Son objectif est d'estimer la valeur d'une variable régionalisée sur un site non échantillonné S_0 à travers la combinaison linéaire des points échantillonnés adjacents selon ([Baillanrgeon, 2005](#)) :

$$z(s_0) = a + \sum_{i \in V(s_0)} \lambda_i z(s_i) \quad \text{Éq. 34}$$

Le calcul des λ_i se fait de telle sorte que la prévision soit non biaisée et la variance soit minimale ([Siu-Ngan Lam, 2013](#)). Ces poids dépendent de la dispersion des points et de leur dépendance spatiale. Le modèle de la méthode Krigeage s'écrit :

$$Z(s) = \mu(s) + \delta(s) \quad \text{Éq. 35}$$

où $\mu(\cdot)$ représente la structure déterministe pour l'espérance $Z(\cdot)$ et dépend du type de krigeage et $\delta(\cdot)$ représente une fonction aléatoire stationnaire déterminée par l'analyse du variogramme ([Baillanrgeon, 2005](#)). On distingue trois type de Krigeage selon la valeur de $\mu(\cdot)$, tel que rapporté au tableau 2.4.

Tableau 2.4: Trois types de krigeage employés dans les approches SIG

Krigeage	$\mu(.)$
Simple	Constante connue
Ordinaire	Constante inconnue
Universel	$\sum_{j=0}^p f_j(s)\beta_j$ Combinaison des fonctions linéaires

2.3.2.1.1 *Pondération inverse à la distance (IDW)*

La méthode d'interpolation *IDW* est moins complexe que le krigeage en termes de calcul. Son principe est de donner plus d'influence et de poids aux points les plus proches au point d'estimation par rapport aux points plus distants. Elle requiert une dispersion spatiale adéquate des points puisqu'elle est sensible aux points aberrants ([Childs, 2004](#)). L'estimation selon l'*IDW* s'écrit :

$$E(x, y) = \sum_{j=0}^n w_j E(x_j, y_j) \quad \text{Éq. 36}$$

$$\text{Avec : } w_i = \frac{h_i^{-p}}{\sum_{j=0}^n h_j^{-p}} \quad \text{Éq. 37}$$

où p est un nombre réel (généralement $p = 2$) et h_i est distance euclidienne entre le point estimé et les points adjacents :

$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad \text{Éq. 38}$$

où (x, y) sont les coordonnées du point interpolé et (x_i, y_i) sont les coordonnées des points adjacents.

2.3.2.1.2 *Spline*

La méthode d'interpolation spatiale *spline* s'appuie sur la densification des points interpolés en passant par les points échantillonnés et en minimisant les courbures ([Azpurua et Dos Ramos, 2010](#)).

Elle utilise des formules mathématiques de lissage. Elle est sensible aux points aberrants et donne de bons résultats lorsque les points connus sont densément distribués ([Mitas et Mitsova, 2005](#)). Cette méthode est précise mais engendre parfois des anomalies ([Siu-Ngan Lam, 2013](#)). Les formules mathématiques proposées par ([Mitas et Mitsova, 2005](#)) pour la minimisation de la somme de déviation et le calcul de l'interpolation se résument comme suit :

$$\sum_{j=0}^N |z_j - F(r_j)|^2 w_j + w_0 I(F) = \text{minimum} \quad \text{Éq. 39}$$

où w_j et w_0 représentent les poids positifs et $I(F)$ est fonction semi-norme de lissage (tableau 2.5). La solution de la fonction de minimisation s'écrit :

$$F(r) = T(r) + \sum_{j=0}^N \lambda_j R(r, r_j) \quad \text{Éq. 40}$$

où $T(r)$ est une fonction de tendance, λ_j représente des constantes déterminées par des contraintes d'optimisation du problème d'interpolation et $R(r, r_j)$ est une fonction qui dépend du choix de $I(F)$.

Tableau 2.5: Méthodes semi-norme de lissage ([Siu-Ngan Lam, 2013](#)).

Méthode	I(F)
<i>Membrane</i>	$\int [F_x^2 + F_{xy}^2] dr$
<i>Minimum curvature</i>	$\int [F_{xx}^2 + F_{yy}^2] dr$
<i>Thin plate spline</i>	$\int [F_{xx}^2 + F_{yy}^2 + 2F_{xy}^2] dr$
<i>Thin plate spline+ tension</i>	$\int [F_x^2 + F_y^2] + [F_{xx}^2 + \dots] dr$
<i>Rugular thin plate spline</i>	$\int [F_{xx}^2 + \dots] + \tau^2 [F_{xxx}^2 + \dots] dr$
<i>Regular spline with tension</i>	$\sum_{mn} c_{mn(\varphi)} \int [F_x^{m_y n}] dr$

[Mitas et Mitasova \(2005\)](#) ont réalisé un traitement comparatif permettant de visualiser l'effet des différentes méthodes d'interpolation spatiale préalablement discutées (figure 2.28). Pour cet exemple, l'interpolation par krigeage (figure 2.28b) est semblable à celle du *spline* (figure 2.28d) avec un lissage plus fin de la topographie, tandis que l'interpolation IDW (figure 2.28c) fait apparaître de petites déformations régulières.

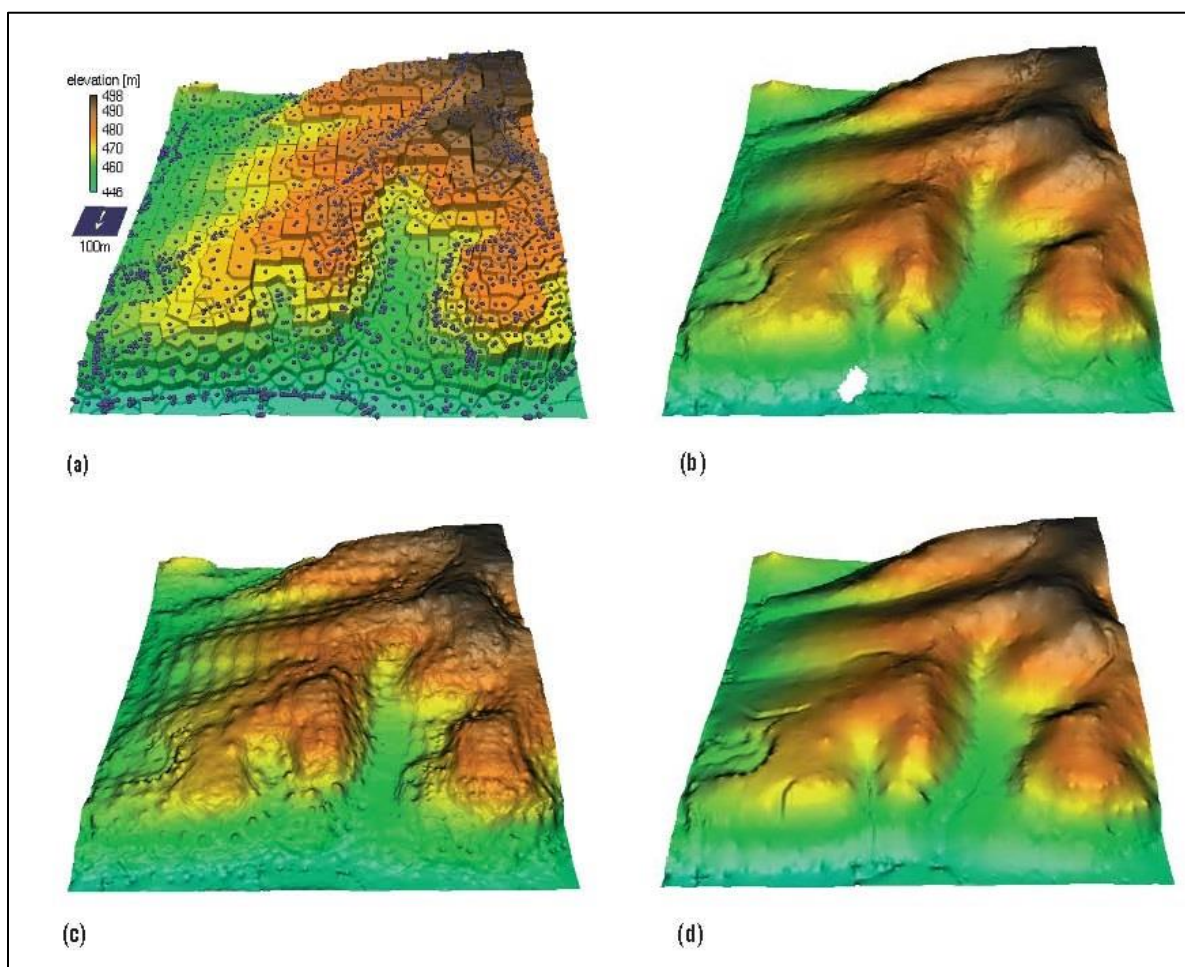


Figure 2.28: Comparaison des méthodes d'interpolation spatiale **a)** données brutes avec découpage par diagramme de voronoi **b)** méthode de krigeage **c)** méthode IDW et **d)** méthode *spline* (Modifiée de [Mitas et Mitasova \(2005\)](#)).

CHAPITRE 3 MATERIEL ET METHODES

Les méthodologies développées dans le cadre de ce projet de maîtrise impliquent (1) le traitement d'images optiques et thermiques satellitaires, (2) l'acquisition et le traitement d'images optiques et thermiques par drone et (3) la modélisation de la température du sol. Les traitements réalisés sur les images optiques et thermiques sont largement appuyés sur l'utilisation des systèmes d'informations géographiques (SIG). Les sous-sections qui suivent présentent les principales sources de données ainsi que les méthodologies employées pour l'acquisition et le traitement de données selon les trois volets précités.

3.1 Région d'étude et sites pilotes

La région d'étude est localisée en Abitibi-Témiscamingue (figure 3.1), alors que les approches méthodologiques développées dans le cadre du présent projet ciblent spécifiquement les formations fluvioglaciaires (eskers et moraines). La région de l'Abitibi-Témiscamingue est sélectionnée en raison de l'importance des ressources en eau souterraine s'y trouvant. À ce jour, il est estimé qu'environ 70% de la population de la région dépend de l'eau souterraine pour son approvisionnement en eau potable ([Cloutier et al., 2016](#)). Il s'agit également d'une région ayant récemment fait l'objet de vastes études hydrogéologiques réalisées dans le cadre du *Programme d'Acquisition de Connaissances sur les Eaux Souterraines du Québec* ([Cloutier et al., 2013](#); [Cloutier et al., 2016](#); [Larocque et al., 2018](#)). Les données générées dans le cadre de ce programme fournissent des connaissances et des infrastructures de terrain utiles pour optimiser le développement d'approches novatrices en hydrogéologie. Les formations fluvioglaciaires ont été ciblées spécifiquement en raison de leur fort potentiel aquifère ([Nadeau et al., 2015](#)) et de la qualité de l'eau souterraine s'y trouvant ([Cloutier et al., 2016](#)). Il s'agit également de formations géologiques jugées vulnérables au sens de l'approche DRASTIC ([Aller et al., 1987](#)) et hébergeant des aquifères susceptibles de contribuer au développement et au maintien d'écosystèmes dépendants de l'eau souterraine ([Nadeau et al., 2015](#); [Rosa et al., 2018](#)). Les données climatologiques de la station de Mont-Brun (station 7085106 du réseau d'*Environnement et Ressources Naturelles Canada*) suggèrent des températures mensuelles moyenne variant entre -17,9 °C en janvier et 16,7 °C en juillet, avec des précipitations totales annuelles atteignant 985 mm, dont 705 mm sous forme liquide (pluie) et l'équivalent de 280 mm sous forme de neige (normales

climatiques entre 1981 et 2010). La période libre de neige s'étend généralement de mai à octobre, inclusivement.

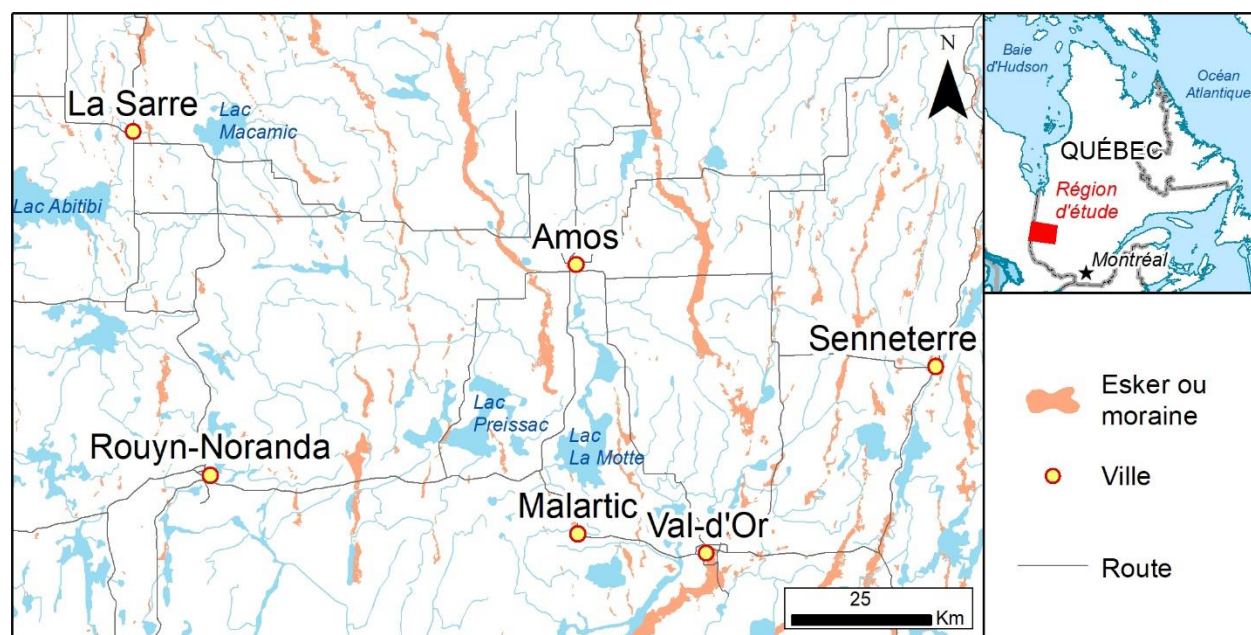


Figure 3.1: Région d'étude ([Thibaudeau et Veillette, 2005](#))

Le bloc diagramme de la figure 3.2 illustre, de façon conceptuelle, l'environnement hydrogéologique typiquement observé au niveau des eskers et moraines de l'Abitibi-Témiscamingue. La figure 3.2 illustre un esker (matrice de sable et de gravier) reposant soit directement sur le socle rocheux fracturé (roches archéennes) ou sur un dépôt de till (matrice compactée de silt et de sable). L'esker est bordé sur ses flancs par des dépôts glaciolacustres d'eau profonde (varves de silt et d'argile déposées au sein du paléo-lac proglaciaire Barlow-Ojibway). De vastes complexes de milieux humides (principalement des tourbières) sont fréquemment observés sur les flancs de l'esker, au contact avec des dépôts glaciolacustres d'eau profonde ([Rosa et al., 2018](#)). Au sein de la région d'étude, la position de la nappe d'eau souterraine dans les eskers est généralement contrôlée par l'élévation des dépôts glaciolacustres d'eau profonde se trouvant sur leurs flancs. Les eskers sont caractérisés par des conductivités hydrauliques élevées, ce qui favorise la recharge et l'écoulement de l'eau souterraine. La matrice de sable et gravier y engendre une porosité propice à l'emmagasinement d'eau. Les sédiments glaciolacustres observés sur les flancs des eskers sont pour leur part moins perméables. Ces derniers tendent donc à contenir (piéger) l'eau souterraine au sein de l'esker. Dans les conditions de recharge prévalant dans région, les charges hydrauliques dans les eskers tendent à atteindre un seuil d'élévation imposé par les

dépôts glaciolacustres d'eau profonde se trouvant à la marge des eskers. Au-delà de ce seuil, l'eau de l'esker engendre des résurgences ponctuelles et diffuses, ces dernières alimentant des sources, ruisseaux et milieux humides. Cette interprétation théorique de l'environnement hydrogéologique des eskers fut notamment documentée par [Nadeau *et al.* \(2015\)](#); [Cloutier *et al.* \(2016\)](#); [Nadeau, S. *et al.* \(2018\)](#); [Rey, N. *et al.* \(2018\)](#) et [Rosa *et al.* \(2018\)](#). L'hypothèse de travail sous-jacente aux méthodologies développées dans le cadre de la présente étude veut que la position de la nappe sous la surface du sol au sein des eskers engendre un effet mesurable sur la température de surface du sol.

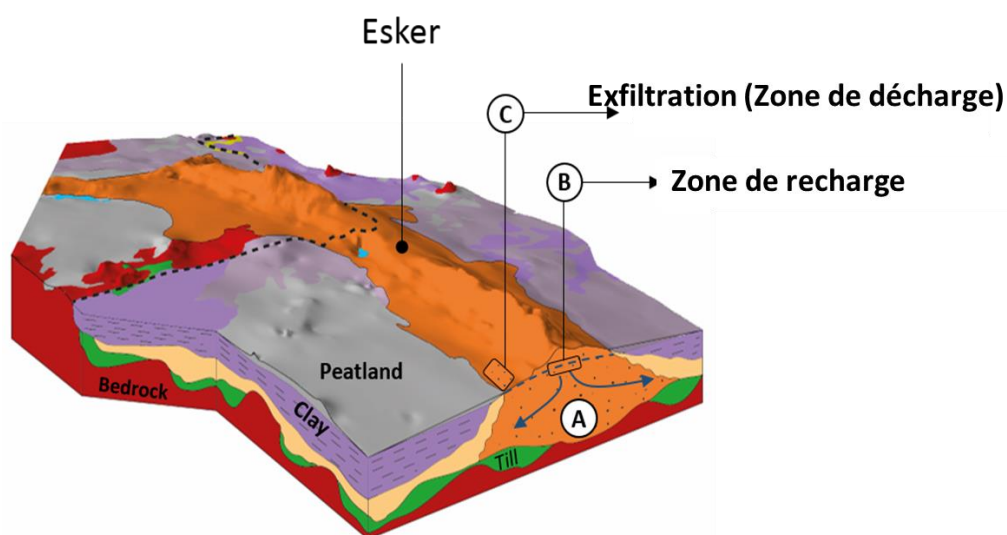


Figure 3.2: Schéma conceptuel de l'environnement hydrogéologique d'un esker d'Abitibi-Témiscamingue (adapté de Nadeau *et al.*, 2015)

Malgré l'importance des formations fluvioglaciaires pour leur potentiel aquifère, ces dernières sont soumises à des pressions anthropiques importantes liées notamment à l'extraction de sable et gravier. Les données recensées par [Nadeau *et al.* \(2015\)](#) ont révélé que plus de 500 sites d'extraction de sable et gravier se trouvent directement sur les formations fluvioglaciaires de la région. En plus d'augmenter la vulnérabilité de l'eau souterraine en raison de la réduction de l'épaisseur de matériel non saturé, ces sites sont susceptibles d'engendrer des anomalies thermiques marquées en raison de la création de vastes secteurs de sols inorganiques affleurant (suivant la déforestation et le retrait du couvert pédologique préalable à l'extraction).

La différence d'échelle entre la région d'étude (figure 3.1) et l'objet cible (formations fluvioglaciaires; figure 3.2), implique l'utilisation d'approches permettant un passage multi-

échelles (figure 3.3). La méthodologie développée ici s'appuie sur des outils de télédétection thermique offrant différentes résolutions et sur des techniques d'analyses s'appliquant à différents contextes. La figure 3.3 illustre le concept de l'approche. Les données satellitaires permettent l'étude des formations fluvioglaciaires dans leur ensemble, à la fois pour des secteurs boisés et pour des zones de sol inorganique affleurant. L'approche par drone permet pour sa part l'acquisition de données plus précises, au niveau de secteurs ciblés présentant un intérêt hydrogéologique particulier à partir des résultats de classification appliqués sur l'indice TVDI calculé à partir des images thermiques satellitaires.

L'approche régionale repose sur l'utilisation d'images thermiques *Landsat 8* d'une résolution spatiale modifiée à 30 x 30 m, sur lesquelles le calcul de l'indice TVDI est réalisé (Éq. 28). Les indices TVDI sont traités par approche SIG selon une classification s'appuyant sur l'outil *Grouping Analysis* (GA) disponible dans *ArcGIS* (Voir section 2.2.2.3.4). L'approche permet de déterminer des zones d'intérêt pour l'acquisition de données locales (figure 3.3A). Ces zones peuvent subséquentement être ciblées pour l'acquisition de données à plus haute résolution grâce à la réalisation de vols par drone (figure 3.3A, 3.3B, 3.3C). Dans le cadre de l'étude, deux sites pilotes ont été retenus pour l'acquisition de données par drone. Le premier site correspond au tronçon de l'esker Saint-Mathieu / Berry situé entre les municipalités de La Motte et d'Amos d'une surface de 30 km² (figure 3.4). Au total, 42 vols par drone ont été réalisés sur ce tronçon d'esker propice à l'étude des zones d'exfiltration d'eau souterraine en marge d'esker, pour des zones boisées et d'eau affleurante (figure 3.3A). Le second site pilote correspond à un site d'extraction de sable et gravier situé sur un esker, à la limite entre les municipalités de Rivière-Héva et de Malartic d'une superficie de 3 hectares (figure 3.5). Ce lieu est propice à l'étude des températures de surface d'un esker pour des conditions de sol inorganique affleurant (figure 3.3A).

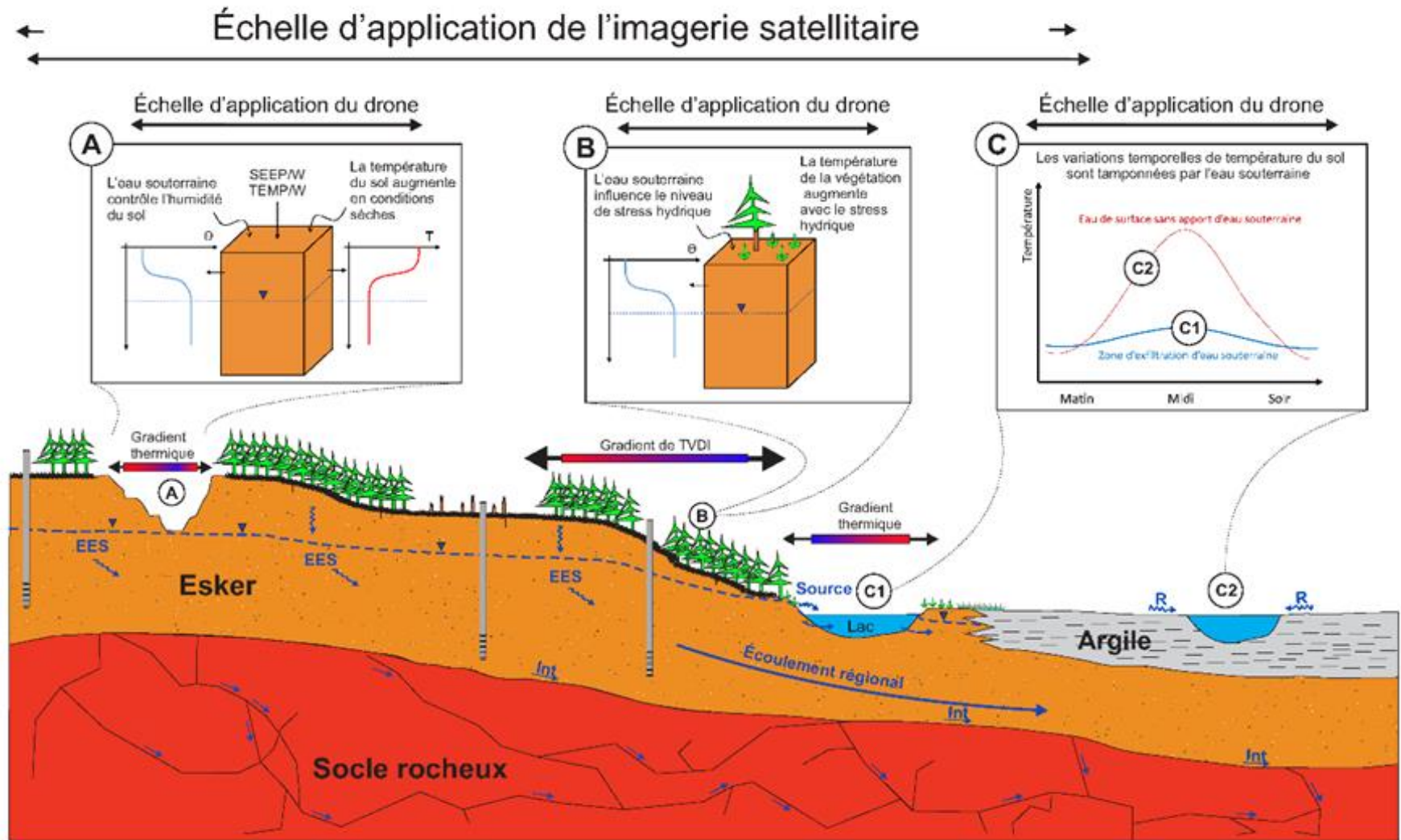


Figure 3.3: Représentation du domaine d'application des approches méthodologiques retenues

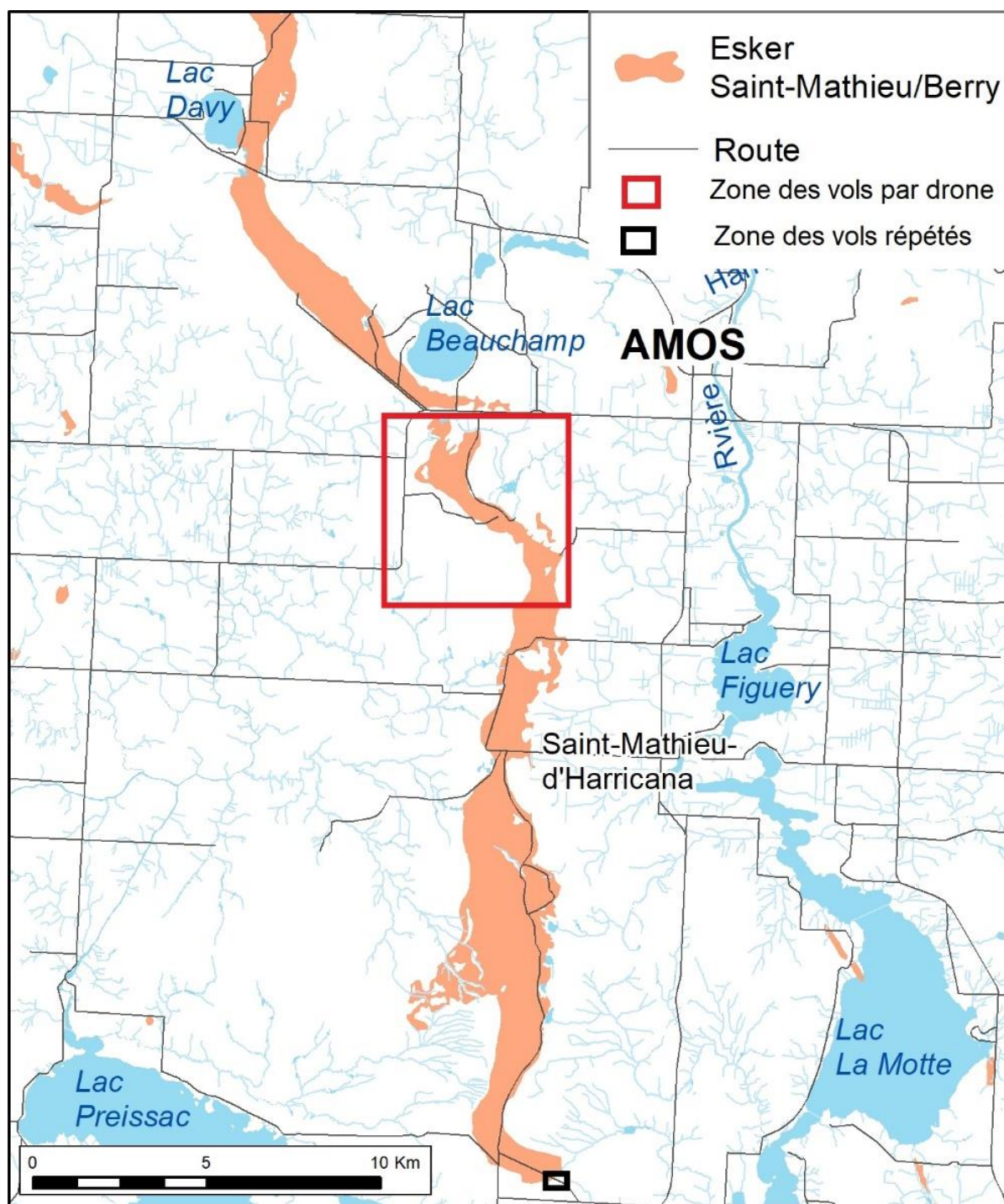


Figure 3.4: Site pilote 1 – Esker Saint-Mathieu / Berry ([Thibaudeau et Veillette, 2005](#))

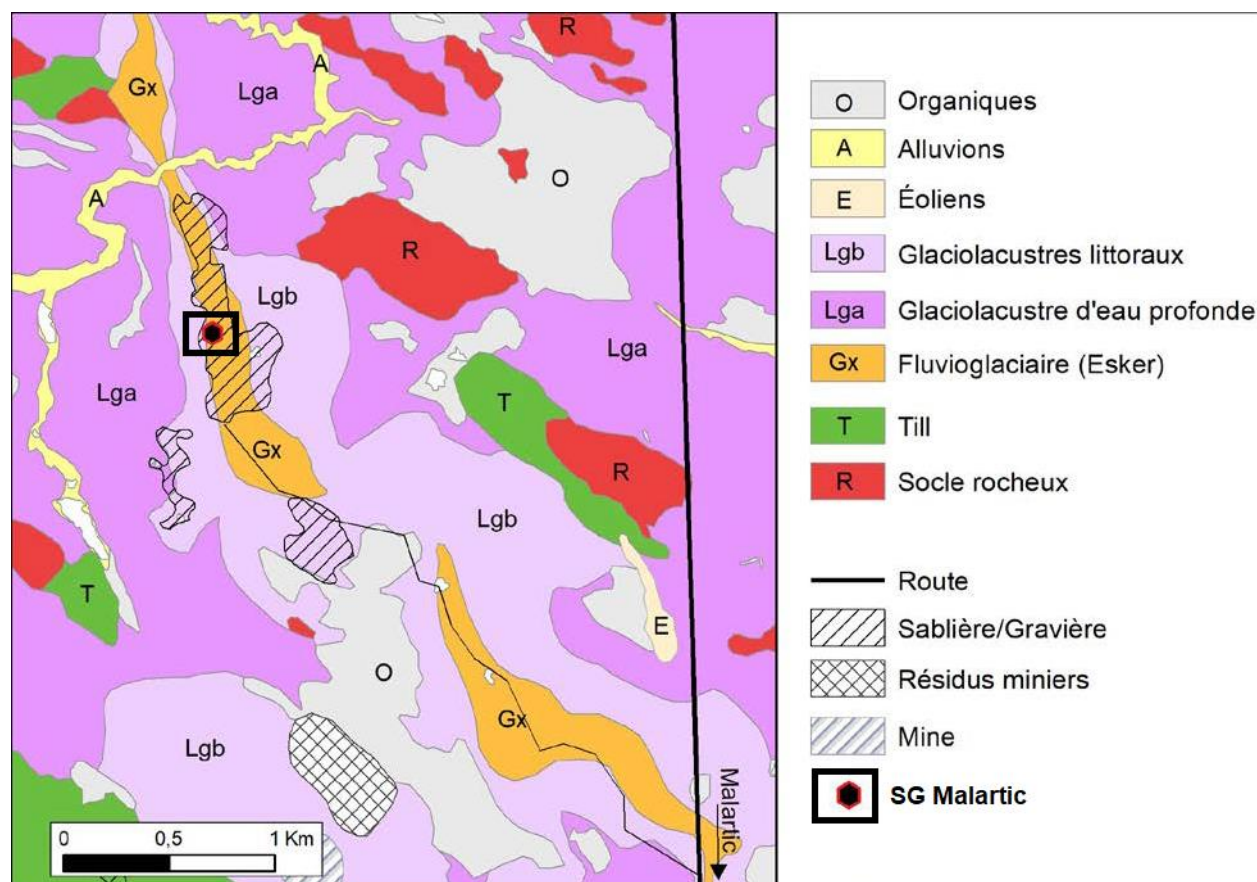


Figure 3.5: Site pilote 2 – Site d'extraction de sable et gravier de Malartic / Rivière-Héva
([GRES-UQAT et SESAT, 2013](#))

3.2 Imagerie thermique satellitaire

3.2.1 Source des données

Les données satellitaires Landsat 8 issues du *U.S. Geological Survey* (USGS) ont été employées dans le cadre de la présente étude. Ces données peuvent être téléchargées directement à partir du site Internet du USGS. Le cycle du satellite Landsat 8 est de 16 jours, ce qui permet l'acquisition d'environ de 22 à 23 images par année pour la région d'étude. Néanmoins, seules les images présentant une faible couverture nuageuse (<30%) furent conservées. Les données Landsat 8 de l'années 2017 se sont avérées optimales pour les besoins de la présente étude. Le tableau 3.1 illustre les scènes (images) téléchargées et traitées dans le cadre du projet. Le couvert nival étant observé en région pour la période allant de novembre à avril, les images acquises entre les mois de mai et d'octobre (en gras dans le tableau 3.1) furent priorisées pour l'analyse. Les données ont été extraites

pour une zone couvrant environ 36000 km², entre les latitudes de 47,793567 N et 49,930975 N et les longitudes 79,559891 O et 76,404644 O.

Tableau 3.1: Scènes du Landsat 8 de l'année 2017 utilisées dans ce projet

Date (aaaa-mm-jj)	Intervalle temporel des images (UTC)	Coordonnées du centre des scènes WGS84		Résolution spatiale des images thermiques
		Longitude	Latitude	
2017-01-15	16:02:05 à 16:02:37	78°01'07.32''W	48°51'58.07''N	30 m
2017-03-04	16:01:46 à 16:02:17	78°01'13.80''W	48°51'58.00''N	30 m
2017-06-08	16:01:36 à 16:02:07	77°59'35.45''W	48°51'58.00''N	30 m
2017-08-27	16:02:02 à 16:02:33	77°59'35.09''W	48°51'58.10''N	30 m
2017-09-12	16:02:02 à 16:02:34	77°59'03.12''W	48°51'58.28''N	30 m
2017-10-14	16:02:13 to 16:02:45	78°01'06.71''W	48°51'58.18''N	30 m
2017-12-17	16:02:07 to 16:02:39	78°00'59.62''W	48°51'59.11''N	30 m

3.2.2 Calcul des températures de surface

Les données *Landsat 8* ne permettent pas le téléchargement direct des scènes thermiques via le site Internet du USGS. L'extraction de la température de surface (ci-après LST pour *Land Surface Temperature*) doit être réalisée en utilisant des formules et algorithmes documentés dans la littérature scientifique ([Blackett, 2014](#); [Yu et al., 2014](#)). Dans le cadre de la présente étude, le calcul des températures de surface a été réalisé selon le *plugin* informatisé développé par [Milton et Ugur \(2016\)](#). Ce *plugin* libre d'accès se base sur le langage *Python* pour le développement des fonctionnalités et la bibliothèque *Geospatial Data Abstraction Library* (GDAL) est intégrée pour le traitement des images matricielles. Le *PyQt4* du logiciel *QGIS* est utilisé pour la conception des interfaces graphiques. L'atout de ce *plugin* réside dans sa capacité d'intégrer plusieurs algorithmes dont (1) l'équation de Planck, (2) l'algorithme *Mono-window*, (3) l'équation *Radiative transfer* et (4) l'algorithme *single channel*. L'équation de Planck telle qu'utilisée dans le cadre de la présente étude à partir d'images *Landsat 8* permet l'obtention de températures de surface avec une erreur

quadratique moyenne de 2.07 °C selon une interface graphique du plugin LST de QGIS ([Milton et Ugur, 2016](#)).

3.2.3 Cartographie thermique des eskers

Suivant le calcul des LST, deux extractions par masque (zone polygonale restreinte) ont été réalisées afin d'alléger les processus de traitement et de conversion des données dans *ArcGIS*. La première extraction par masque correspond à une zone rectangulaire de 253 km² couvrant une partie de l'esker Saint-Mathieu / Berry dans le secteur d'Amos. Les données incluses dans cette zone ont été analysées afin (1) d'identifier la meilleure plage temporelle pour l'interprétation des résultats de LST et (2) d'évaluer l'évolution des LST pour différents types de couverture du sol (asphalte, eau de surface, tourbières végétation dense, courte, brune et exfiltrations ponctuelles d'eau souterraine). L'identification de la meilleure plage temporelle pour l'interprétation des données a été effectuée via une comparaison des images acquises à différents moments de l'année (tableau 3.1). L'objectif des comparaisons était de cibler les images présentant les contrastes de température les plus marqués afin de faciliter la distinction des différentes composantes des images thermiques. L'évaluation des LST pour différentes catégories de couverture du sol a été effectuée suivant une sélection variée de nombre de points localisés au sein de la surface couverte par le polygone de sélection, pour chacune des classes de couverture de sol précitées. Les composantes du sol ont été sélectionnés suivant une inspection visuelle des images RGB. La seconde extraction par masque a été réalisée en incluant l'ensemble des formations fluvioglaciaires de la région, avec une zone tampon de 500 m en marge de ces dernières. Pour chacune des régions ainsi extraites, les données de LST matricielles ont été converties en données ponctuelles. Chaque point créé correspond au centre d'un pixel de la donnée matricielle source et possède des coordonnées géographiques et une valeur de LST. La conversion des données matricielles en données ponctuelles est requise pour l'application de calculs par l'entremise de l'outil *Grouping Analysis* dans *ArcGis*. Cet outil consiste en un algorithme de statistiques spatiales permettant d'identifier des groupes de données (1) partageant des similitudes vis-à-vis certaines caractéristiques définies par l'utilisateur et (2) étant spatialement associées (voir section 2.2.2.3.4). Une approche de regroupement en 10 classes fut appliquée pour chacune des zones extraites afin d'évaluer si les propriétés thermiques des eskers définissent des ensembles susceptibles d'être spatialement corrélés avec des conditions hydrogéologiques, les données thermiques pouvant être comparées

aux données hydrogéologiques préexistantes ([Cloutier et al., 2013](#); [Nadeau et al., 2015](#); [Cloutier et al., 2016](#); [Rey et al., 2018](#); [Rosa et al., 2018](#)).

3.2.4 Identification des zones d'exfiltration d'eau souterraine

Les données de LST disponibles à l'échelle des eskers de la région ont été transformées en TDVI suivant les méthodes de calcul décrites à la section 2.1.4.2. L'hypothèse sous-jacente à l'approche développée repose sur le postulat voulant que les zones d'exfiltration d'eau souterraine devraient engendrer des anomalies au niveau de la TVDI en raison de la décharge constante d'eau souterraine permettant le maintien de conditions humides, alors que les sols secs sont susceptibles de présenter des variations de TVDI plus marquées en réponse aux conditions atmosphériques. Le premier test réalisé visait à évaluer si l'outil *GA* permettait d'identifier un groupe spatialement associé aux exfiltrations ponctuelles d'eau souterraine. Pour s'avérer représentatif de la position des exfiltrations ponctuelles d'eau souterraine, un groupe devait inclure le plus grand nombre des exfiltrations ponctuelles ($n = 35$) identifiées par [Cloutier et al. \(2013\)](#) tout en couvrant la plus petite superficie possible. Un groupe de classification par l'outil *GA* répondant à ces critères fournirait alors une identification des parcelles du territoire au sein desquelles des exfiltrations d'eau souterraine seraient susceptibles d'être observées. La figure 3.6 résume l'approche employée et illustre les intersections entre des zones tampon et des cellules associées à un groupe. Cette intersection sert de critère pour la sélection d'un groupe jugé comme étant spatialement associé aux exfiltrations d'eau souterraine. Le second test ciblait l'identification de la meilleure image pour la réalisation des calculs de TVDI. Le test fut basé sur la comparaison graphique des données de LST de plusieurs dates en analysant plusieurs échantillons de sol y compris des exfiltrations ponctuelles parmi celle identifiées par [Cloutier et al. \(2013\)](#). Une tolérance de 100m était attribuée autour de ces sources pour avoir une moyenne de température plus représentative par rapport à une température ponctuelle, cela a permis de comparer le contraste de température entre les composantes du sol, spécifiquement celles montrant une humidité forte et proche de celle des exfiltrations souterraines. Cette approche va faciliter la classification et l'extraction des zones susceptibles à avoir des exfiltrations souterraines.

Le schéma de la figure 3.7 résume le processus adopté pour le traitement des images satellitaires et le choix des zones potentielles pour la réalisation des vols par drone. L'approche visait

essentiellement à identifier des zones susceptibles d'être associées à des anomalies locales en termes de LST ou de TVDI afin d'y réaliser l'acquisition de données de plus haute résolution.

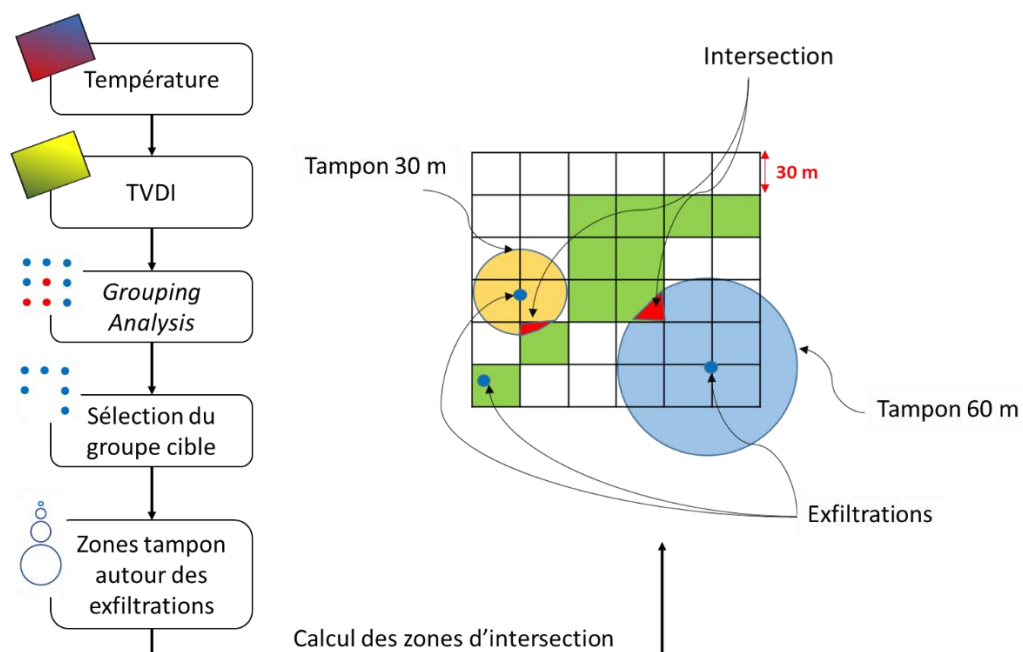


Figure 3.6: Schéma d'analyse spatiale des intersections des groupes de classifications et des zones tampons des exfiltrations

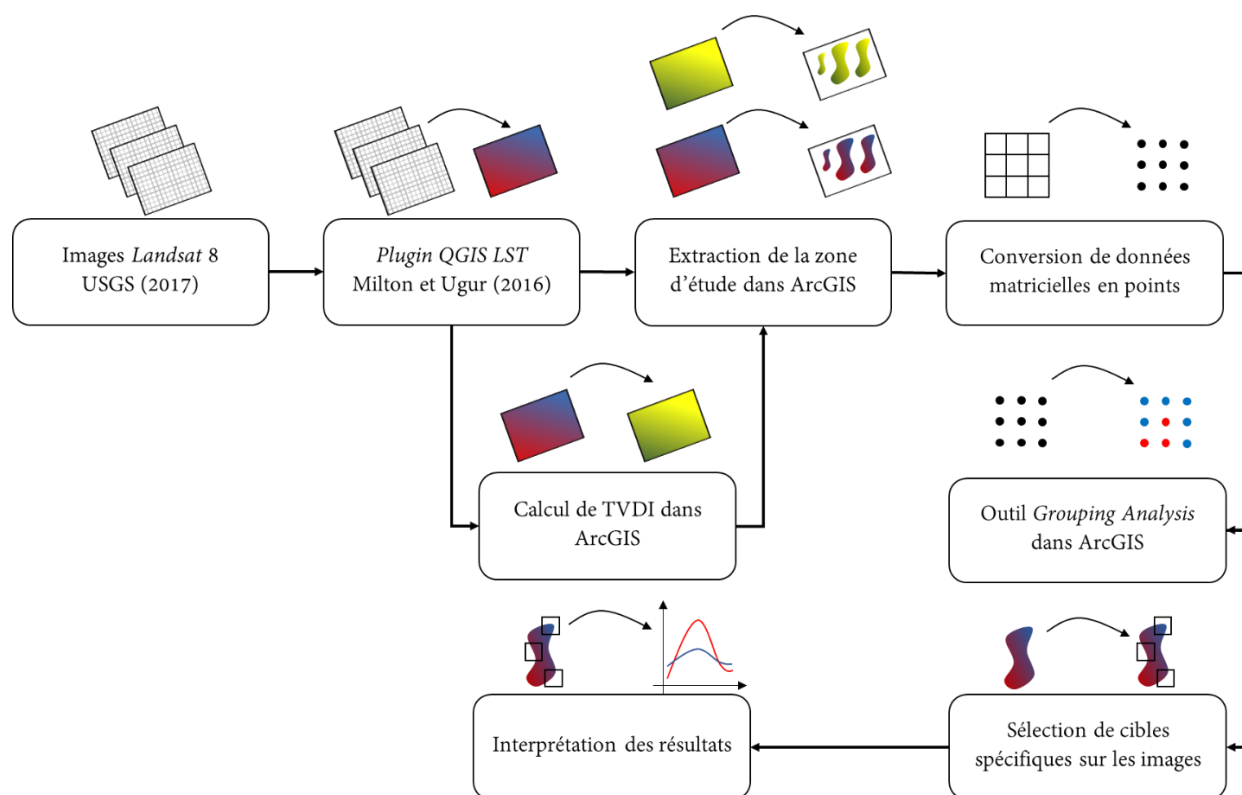


Figure 3.7: Schéma de traitement des images satellitaires thermiques pour la détermination des zones de vol par drone

3.2.5 Cartographie thermique de sols inorganiques affleurant

Bien que problématique du point de vue environnementale la présence de sites d'extraction de sable et gravier sur les formations fluvioglaciaires de la région offre la possibilité d'étudier le comportement thermique de sols inorganiques affleurants. L'absence de couverts forestier et pédologique ainsi que la présence de niveaux d'extraction situés à différentes élévations facilite l'étude de la température du sol. Ici, l'approche de télédétection thermique satellitaire ciblant le suivi des sites d'extractions de sable et gravier se concentre sur l'analyse de deux images thermiques satellitaires acquises lors de l'été 2017. L'identification des sites d'extraction de sable et gravier a été réalisée en appliquant une classification non supervisée des images visibles permettant l'extraction des zones associées à des sols inorganiques affleurants. Les données matricielles des zones ainsi identifiées ont subséquentement été transformées en données ponctuelles, format requis pour l'analyse statistique des températures. La figure 3.8 illustre le concept de l'approche développée. L'hypothèse de l'expérience veut que les zones d'extraction où

les sols affleurants sont proches de la nappe d'eau souterraine devraient (1) être plus froids lors de la période estivale et (2) présenter des variations thermiques moindres par rapport aux zones d'extraction où les sols inorganiques affleurants sont à une plus grande distance de la nappe d'eau souterraine. En termes simples, la présence d'eau souterraine peu profonde (à température relativement constante avoisinant 6°C) devrait favoriser le maintien de températures relativement froides et constantes dans les zones d'extraction se trouvant près de la nappe d'eau souterraine lors de la période estivale.

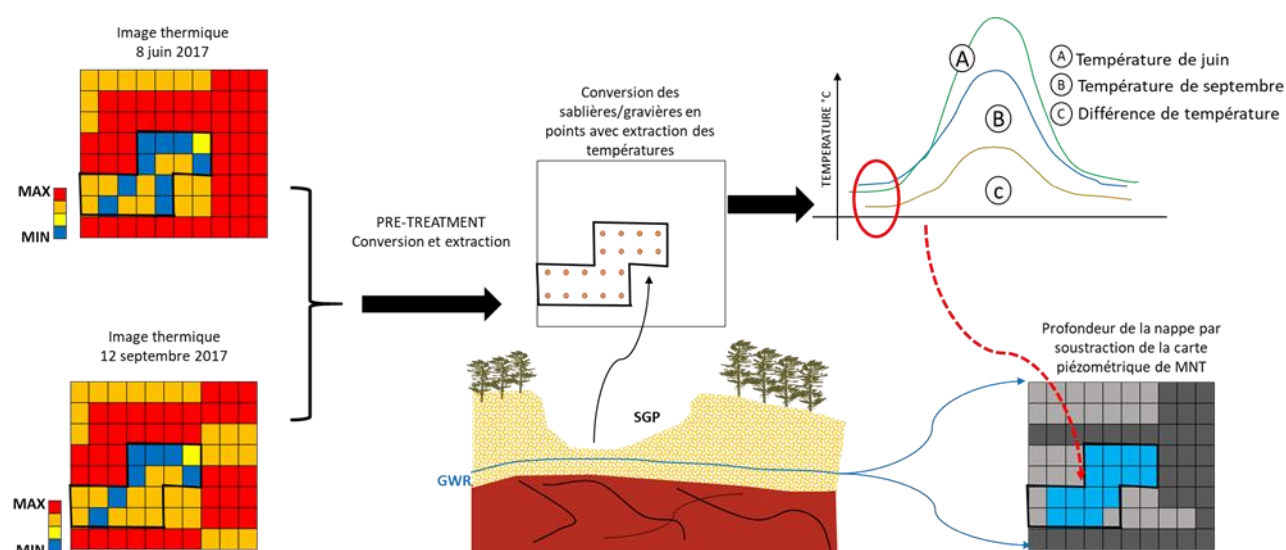


Figure 3.8: Schéma de traitement des SG par approche thermique. A) Histogramme de la température en juin. B) Histogramme de la température en septembre. C) la différence des températures entre juin et septembre.

3.3 Imagerie thermique haute résolution

3.3.1 Acquisition des données de terrain

Le pilotage d'un drone sur le territoire canadien exige le passage par un processus réglementaire pour l'obtention d'un certificat d'opération aérienne spécialisées (COAS) délivré par Transport Canada avant de procéder aux travaux du terrain (Annexe D). Les travaux ont nécessité l'utilisation d'un drone équipé d'une caméra thermique à haute résolution. Une caméra *Zenmuse XT2* de *DJI* a été utilisée en combinaison avec un drone professionnel *DJI Matrice 200* (figure 3.9) pour l'acquisition des images multispectrales et thermiques avec des résolutions spatiales de 0,06 m et

0,1 m, respectivement. La caméra *Zenmuse XT2* est équipée de capteurs *Microbolomètre VOx* non refroidis qui captent les signaux dans un spectre allant de $7.5\ \mu\text{m}$ à $13.5\ \mu\text{m}$. Elle permet la mesure de températures allant de -40°C à 550°C . L'automatisation des vols par drone a été réalisée par l'entremise de l'application *DJI GS Pro* selon les paramétrages rapportés au tableau 3.2. Dans le cadre de la présente étude, 68 vols ont été effectués, permettant l'acquisition d'environ 13200 images RGB et IRT (tableau 3.3).

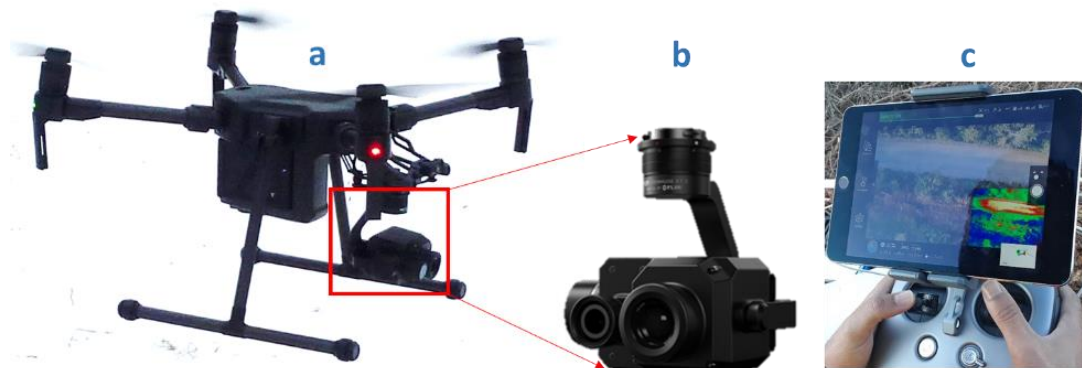


Figure 3.9: a) Drone DJI Matrice 200, b) Caméra DJI Zenmuse XT2, c) Contrôleur de commandes

Tableau 3.2: Paramètres des vols automatisés par l'application *DJI GS Pro*

Paramètre	Altitude	Nombre d'images RGB+IRT	Recouvrement latéral	Recouvrement frontal	Angle de tangage du cardan	Vitesse
Valeurs	70 m	≤ 200	90%	90%	-90°	2.5 m/s

Tableau 3.3: Sommaire des vols réalisés dans le cadre du projet

# Vol	Site	Date	Heure	Nombre d'images (TIR+RGB)	Mosaïque IRT	Mosaïque RGB
1	3	05/09/2019	16:53	188	89/94	OK
2		05/09/2019	17:10	198	NO	OK
3		05/09/2019	17:23	194	OK	OK
4		05/09/2019	17:36	192	OK	OK
5		05/09/2019	17:51	198	OK	OK
6		05/09/2019	18:36	196	OK	OK
7		05/09/2019	18:58	194	OK	OK
8		05/09/2019	19:48	144	OK	OK
9	2	12/09/2019	16:15	184	OK	OK
10		12/09/2019	16:33	192	OK	OK
11		12/09/2019	16:47	194	OK	OK
12	1	12/09/2019	17:11	194	OK	OK
13		12/09/2019	17:26	192	OK	OK
14		12/09/2019	17:43	194	80/97	OK
15		12/09/2019	18:19	190	OK	OK
16		12/09/2019	18:34	196	OK	OK
17		12/09/2019	18:55	198	85/99	OK
18		12/09/2019	19:41	198	60/99	OK
19		12/09/2019	19:53	192	77/96	NO
20		12/09/2019	20:11	194	OK	NO
21	5	15/09/2019	16:21	194	OK	OK
22		15/09/2019	16:38	186	OK	OK
23		15/09/2019	16:49	198	OK	OK
24		15/09/2019	17:10	196	OK	OK
25		15/09/2019	17:18	196	OK	OK
26	4	15/09/2019	18:00	196	OK	OK
27		15/09/2019	18:13	194	OK	OK
28		15/09/2019	18:49	192	OK	OK
29		15/09/2019	19:14	196	OK	OK
30	7	15/09/2019	19:31	196	OK	OK
31	11	16/09/2019	15:31	194	No	No
32	12	16/09/2019	15:54	192	OK	OK
33		16/09/2019	16:17	192	OK	OK
34		16/09/2019	16:43	198	OK	OK
35		16/09/2019	16:56	198	OK	OK
36		16/09/2019	17:12	190	OK	OK
37	10	16/09/2019	19:08	196	No	No
38	6	16/09/2019	19:41	196	OK	OK

# Vol	Site	Date	Heure	Nombre d'images (TIR+RGB)	Mosaïque IRT	Mosaïque RGB
39	4	17/09/2019	15:46	196	OK	OK
40		17/09/2019	16:02	192	OK	OK
41	13	17/09/2019	16:18	192	OK	OK
42	8	17/09/2019	16:32	198	NO	OK
Vol répété de l'expérience pour la détermination du temps optimal pour les vols thermiques 2019						
1	Site la Motte	7/08/2019	6:00	198	OK	OK
2		7/08/2019	8:30	198	OK	OK
3		7/08/2019	11:30	198	OK	OK
4		7/08/2019	13:30	198	OK	OK
5		7/08/2019	15:30	198	OK	OK
6		7/08/2019	17:30	198	OK	OK
7		7/08/2019	19:30	198	OK	OK
8		7/08/2019	21:30	198	OK	NO
Vol répété de l'expérience pour la détermination du temps optimal pour les vols thermiques 2020						
1	Site la Motte	17/06/2020	6:00	198	OK	OK
2		17/06/2020	8:00	198	OK	OK
3		17/06/2020	10:00	198	OK	OK
4		17/06/2020	12:00	198	OK	OK
5		17/06/2020	14:00	198	OK	OK
6		17/06/2020	16:00	198	OK	OK
7		17/06/2020	18:00	198	OK	OK
8		17/06/2020	20:00	198	OK	OK
9		17/06/2020	22:00	198	OK	NO
Vol répété sur le site de la SG Malartic						
1	SG Malartic	20/06/2020	6:00	192	OK	OK
2		20/06/2020	8:00	192	OK	OK
3		20/06/2020	10:00	192	OK	OK
4		20/06/2020	12:00	192	OK	OK
5		20/06/2020	14:00	192	OK	OK
6		20/06/2020	16:00	192	OK	OK
7		20/06/2020	18:00	192	OK	OK
8		20/06/2020	20:00	192	OK	OK
9		20/06/2020	22:00	192	OK	NO
OK : Toutes les images sont exécutées lors du mosaïquages par Pix4D NO : Problème de mosaïquage						

3.3.2 Traitement des données

Un premier traitement des images acquises par drone a été réalisé par l'entremise du logiciel libre d'accès *OpenDroneMap*. Néanmoins, ce logiciel se concentre principalement sur les images

multispectrales et ne permet pas le mosaïquage des images thermiques en format *R_JPEG*. Le logiciel commercial *Pix4Dmapper* fut donc retenu pour réaliser cette tâche. Ce logiciel assure le mosaïquage et le géoréférencement des images RGB et IRT. Il est connu par sa puissance en photogrammétrie et permet la production de modèles numériques de terrain (MNT) et la combinaison de données issues de plusieurs vols. Il permet également de traiter des scènes vidéo de haute définition et supporte plusieurs formats de données. Ses interfaces sont de surcroît conviviales, permettant ainsi une utilisation optimale. Le traitement des images par *Pix4Dmapper* est réalisé en trois étapes, soit (1) le positionnement des images dans un système de coordonnées (2) l'étape de calcul de densification des points et de production du MNT et (3) la génération des orthomosaïques ([Bojana et al., 2017](#)).

3.3.3 Variations thermiques spatiotemporelles sur l'esker SMB

L'acquisition de données par drone offre plus de flexibilité quant au moment d'acquisition des données. Or, les variations diurnes de température de l'air font en sorte que des données acquises très tôt le matin, en milieu de journée ou encore en fin de soirée pourraient présenter des différences marquées, bien qu'elles aient toutes été collectées au même endroit. En ce sens, des expériences de terrain visant à identifier le meilleur moment de la journée pour l'acquisition de données thermiques par drone s'avéraient essentielles. La revue de littérature réalisée dans le cadre de ce projet a révélé que ce type d'expérience demeure très peu documenté, hormis certaines exceptions applicables aux berges de rivières ([Cardenas et al., 2014](#)) et à des exfiltrations sur affleurements rocheux (([Mundy et al., 2017](#))). Ainsi, le 7 août 2019, huit vols consécutifs de 15 min furent réalisés à intervalles réguliers de 2 h, entre 6h00 et 22h00, au niveau d'un site connu pour la présence d'une zone d'exfiltration ponctuelle d'eau souterraine. La démarche visait (1) à permettre la comparaison d'images acquises à différents moments de la journée et (2) à fournir une évaluation de l'ampleur des variations thermiques de LST pour différentes couvertures de sol. Les données ainsi acquises ont été géoréférencées et mosaïquées avec le logiciel *Pix4DMapper*. Les traitements préliminaires ont révélé que la superposition des orthomosaïques présentait des erreurs (décalages selon le plan *xy*) induites par le manque de précision du système de positionnement par GPS du drone et par l'effet d'instabilité induit par le vent lors de la prise des images. Ainsi, un ajustement manuel des orthomosaïques fut réalisé dans *ArcMap* en utilisant une zone commune entre tous les vols et en induisant un changement de résolution de 0.1 à 0.2 m afin d'alléger le traitement et la classification

des images par la méthode du *GA*, suivant la conversion des données matricielles en données ponctuelles. Les *GA* ont en premier lieu été appliquées des regroupements des images avant vs après 15h30, heure à laquelle la température maximale de l'air fut enregistrée selon les données de la station météorologique la plus proche. Une seconde analyse par *GA* fut réalisée avec l'ensemble des données acquises afin d'identifier les secteurs où l'amplitude des variations thermiques journalières était la plus faible. L'hypothèse est que l'apport d'eau souterraine (température constante avoisinant 6° selon [Champagne \(1988\)](#)) en surface devrait en principe tamponner les fluctuations thermiques de la surface du sol. Si cette hypothèse est vraie, les zones spatialement associées à des exfiltrations d'eau souterraine devraient montrer des variations thermiques moins marquées que les sols périphériques. L'expérience précitée fut entièrement répétée à une seconde occasion, le 17 juin 2020, afin d'en tester la reproductibilité. Le schéma de la figure 3.10 illustre l'enchaînement des tâches réalisées pour la collecte et le traitement des images acquises par drone pour l'expérience du vol répétitif afin de déterminer les anomalies liées aux exfiltrations d'eau souterraine.

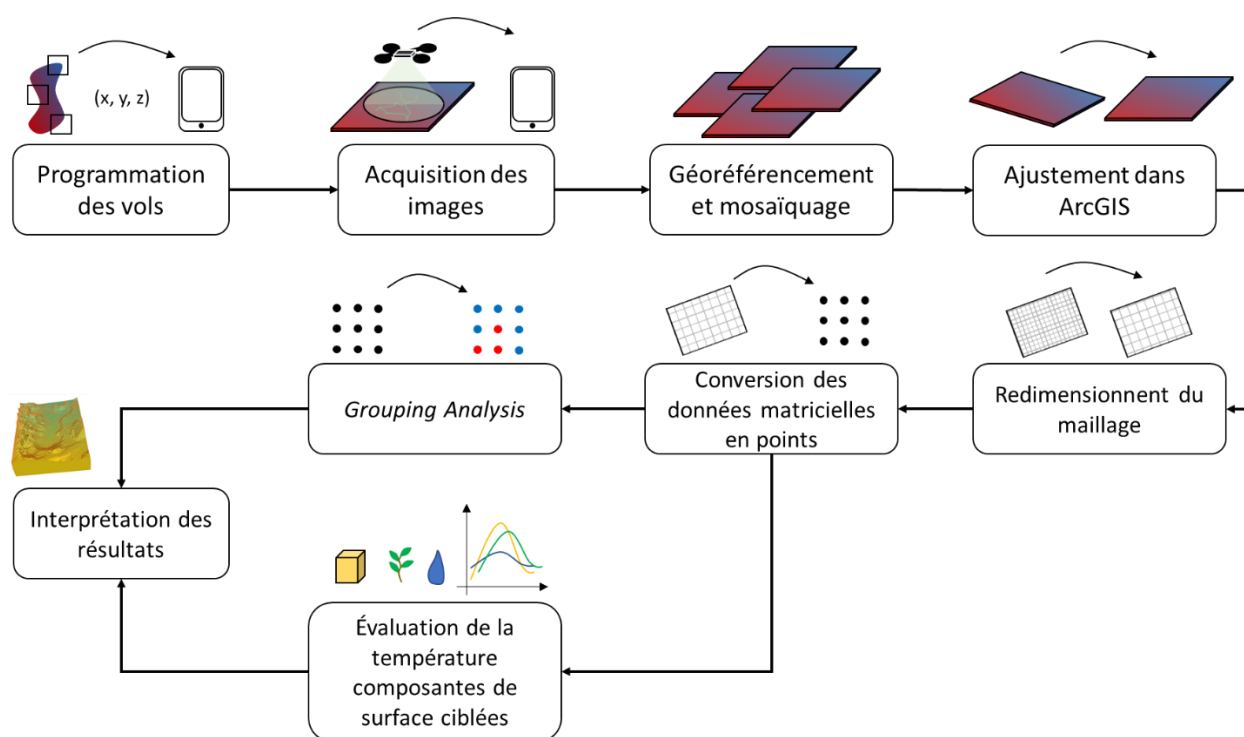


Figure 3.10: Schéma de traitement des images acquises par drone pour la détermination des anomalies froides

3.3.4 Variations thermiques spatiotemporelles à la gravière de Malartic

Une expérience s'appuyant sur la réalisation de vols à intervalles réguliers de 2 h, entre 6h00 et 22h00, fut réalisée sur un site d'extraction de sable et gravier localisé à Malartic. Le site présente de vastes surfaces de sols inorganiques affleurants (sans couvert forestier ni pédologique) situés à différentes élévations au-dessus de la nappe d'eau souterraine. Le site offre ainsi la possibilité de collecter des données thermiques à haute résolution au niveau de sols inorganiques sous lesquels la profondeur de la nappe d'eau souterraine est connue. Les données thermiques ont été acquises le 20 juin 2020. Les images ont été mosaïquées et géoréférencées pour un suivi spatiotemporel de la température de surface. Les températures de surface ont servi par la suite au calage d'un modèle combiné *SEEP/W* et *TEMP/W* afin de définir les propriétés hydrogéologique et thermique approximatives d'un sol meuble (esker et moraines).

pilotage de drone par la pratique sur plusieurs appareils, dont celui de l'UQAT, l'apprentissage des différents types de vol (automatique et manuel) et les techniques de rapatriement en cas de problèmes techniques. Il est nécessaire de réussir des examens théoriques et pratiques pour obtenir le certificat de la formation. L'examen menant à l'obtention du *Certificat de compétence en radio – Aéronautique*, émis par *Innovation, Sciences et Développement économique Canada*, a été également réussi. Ce dernier a permis d'assurer la communication radio lors des vols, notamment avec les installations de l'aéroport d'Amos.

3.4 Modélisation numérique

3.4.1 Contexte des démarches réalisées

En hydrogéologie, la modélisation numérique permet notamment (1) d'améliorer la compréhension théorique de processus hydrogéologiques, (2) de représenter mathématiquement un système en régime permanent ou transitoire et (3) d'émettre des prédictions relatives à l'évolution d'un système soumis à différentes conditions. Dans le cadre de la présente étude, la modélisation numérique a été employée afin de fournir une explication théorique des variations de température observées sur des images thermiques. Les composantes *SEEP/W* et *TEMP/W* du logiciel *Geostudio 2018 R2* ont été employés à cette fin. Il s'agit de modèles reposant sur la méthode des éléments finis pour la résolution des problèmes. La composante *SEEP/W* permet une analyse des processus d'écoulement de l'eau alors que la composante *TEMP/W* permet l'analyse des processus

thermiques dans le système. D'autres logiciels auraient permis la réalisation de simulations répondant à des objectifs similaires. À titre d'exemple, HEATFLOW-SMOKER- qui est un logiciel de modélisation 3D pour la simulation des écoulements souterrains et la résolution des problèmes du transport de l'énergie thermique ([Molson et Frind, 2020](#)). Le logiciel *COMSOL*, qui est basé lui aussi sur la discrétisation par la méthode des éléments finis, permet des simulations à usage général pour la modélisation de conceptions, d'appareils et de processus dans plusieurs domaines de l'ingénierie. Il permet l'intégration de modules (add-on) pour des simulations en électromagnétique, acoustique, flux de fluide et pour modéliser les réactions chimiques, les structures métalliques ainsi que les flux et le transfert de chaleur ([COMSOL, 2018](#)). le logiciel *TRNSYS* est approprié pour l'étude des systèmes géothermiques ([Persson et al., 2016](#)). Le logiciel *MT3DMS* permet aussi de simuler le transfert de chaleur ([Ma et Zheng, 2010](#)). Ici, La suite *GeoStudio 2018 R2* a été retenue en raison de son interface conviviale et de ses nombreuses applications potentielles en contexte minier.

L'approche par télédétection thermique s'avère pertinente pour l'évaluation des LST et TVDI à différentes échelles alors que l'application de la méthode de classification par *GA* fournit un outil SIG quantitatif pour l'interprétation des données (figure 3.11A, B). Néanmoins, les approches précitées se concentrent principalement sur la réponse thermique à la surface des objets survolés et ne permettent pas une analyse quantitative des liens entre les processus hydrologiques et thermiques. Afin de pallier cette lacune et de maximiser les retombées associées aux données d'imagerie thermique disponibles, des modèles théoriques 1D ont été développés. Ces modèles visent à simuler la température de surface du sol pour différentes profondeurs de nappe (figure 3.11C).

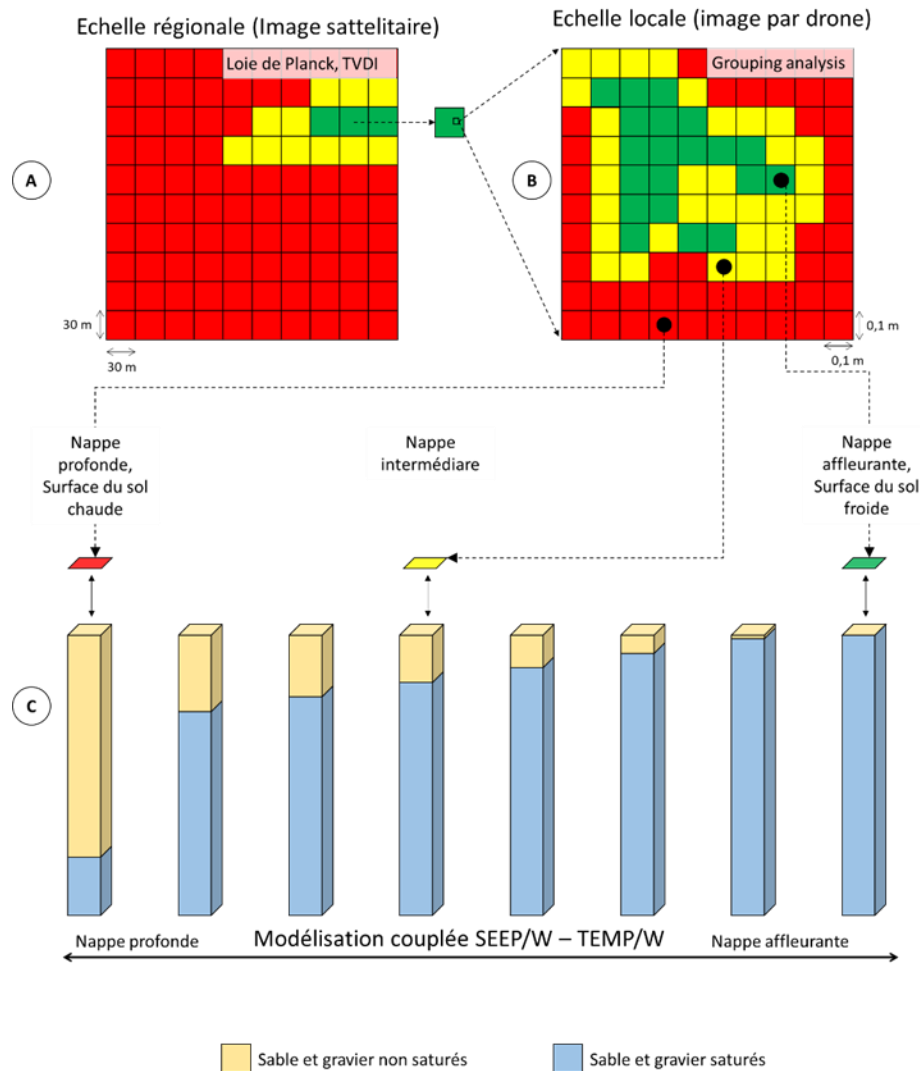


Figure 3.11: Conception de la combinaison de la télédétection thermique multi-échelle et de la modélisation (A) Représentation satellitaire avec calcul de TVDI, (B) Représentation de données thermiques par drone avec résultat de classification GA, (C) Schéma conceptuelle des scénarios de modélisation selon différentes profondeur de la nappe d’eau souterraine

3.4.2 Conception du modèle

La combinaison de *SEEP/W* et *TEMP/W* permet la prise en compte de l’effet induit par la position de la nappe d’eau souterraine sur le patron de distribution des températures au sein de l’ensemble de la zone non saturée. Chaque modèle comporte une analyse en régime permanent et une analyse en régime transitoire qui sont liées hiérarchiquement selon une relation d’héritage. Chacun des modèles illustre un système caractérisé par une profondeur de nappe différente (entre 0 m et 8 m)

afin de simuler l'effet de la profondeur de la nappe sur la température de surface. Les analyses en régime transitoire ont une durée d'une journée avec pas de temps horaire (1 heure).

Les principales étapes liées au développement des modèles sont illustrées à la figure 3.12. Les paramètres hydrogéologique employés pour la définition du matériel poreux représentatif des dépôts fluvioglaciaires sont principalement tirés des travaux de [Cloutier et al. \(2013\)](#) lesquelles documentent spécifiquement les eskers et moraines d'Abitibi-Témiscamingue. Les variations de teneur en eau et de conductivité hydraulique sont estimées dans *SEEP/W* à partir de fonctions théoriques prédéfinies pour des sols sableux. Les paramètres thermiques sont pour leur part estimés grâce à des données issues de la littérature scientifique pour des sols jugés similaires à ceux des formations fluvioglaciaires (tableau 3.4). La variation de la conductivité thermique et de la capacité thermique massique en fonction de la teneur en eau volumique sont tirées de [Jury et Horton \(2004\)](#) et illustrées aux figures 3.13A, 3.13B respectivement.

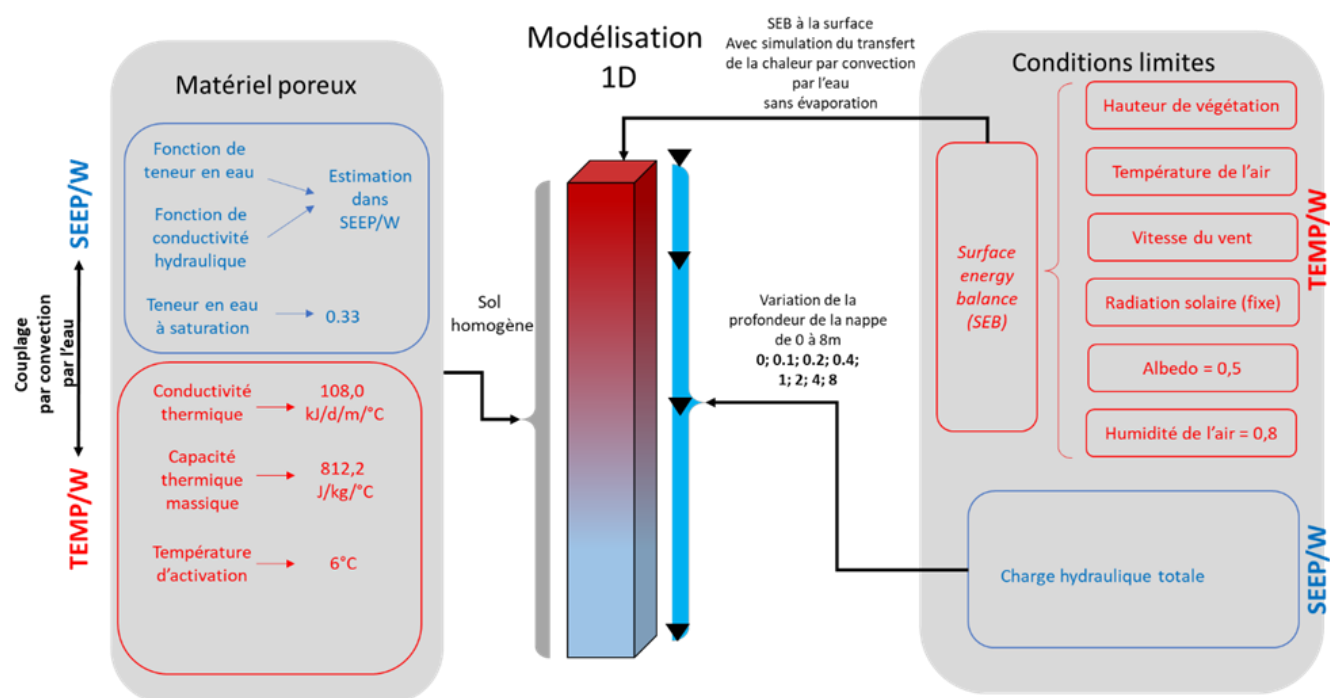


Figure 3.12: Architecture du modèle réalisé par combinaison de SEEP/W et TEMP/W

Tableau 3.4: Valeur des paramètres hydrogéologiques et thermiques employées dans le modèle

Propriété	Conductivité hydraulique saturée (m/s)	Teneur en eau volumique à saturation	Conductivité thermique J/s/m/°C	Capacité thermique massique J/kg/°C
Référence	(Cloutier et al., 2016)	Cloutier et al. (2016)	Jury et Horton. R. (2004)	Jury et Horton (2004)
Valeur	$4,6 \times 10^{-4}$	0,33	1,25	812,2

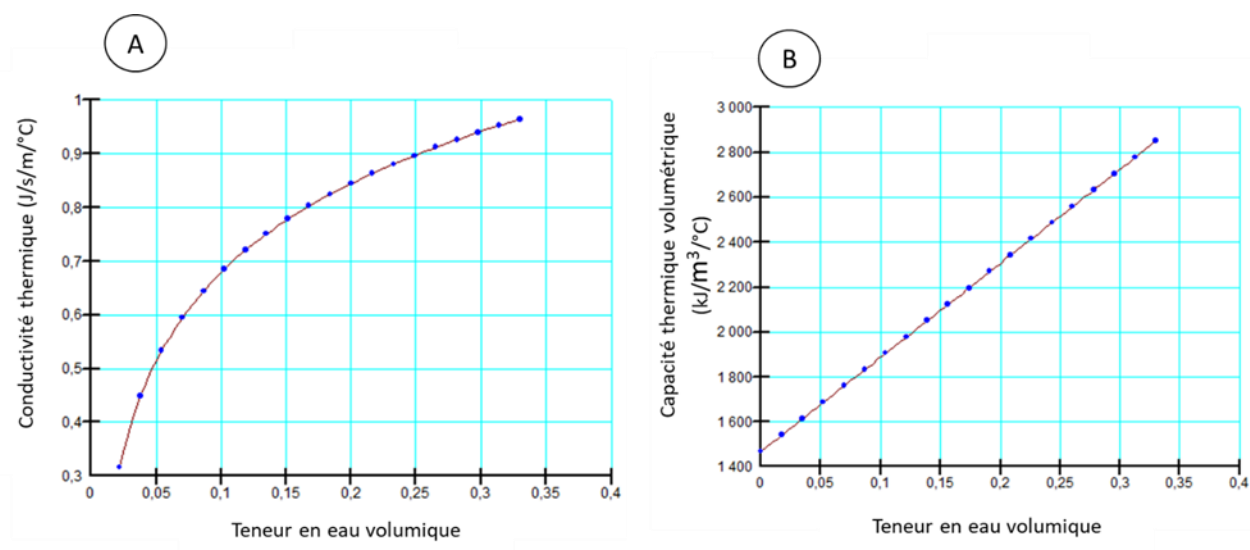


Figure 3.13: (A) Relation entre la conductivité thermique et la teneur en eau volumique, (B) Capacité thermique massique en fonction de la teneur en eau volumique

La température des eaux souterraines a été fixée à une valeur constante de 6°C pour les différents scénarios du modèle ([Champagne, 1988](#)). La position de la nappe représente une charge hydraulique constante et une ligne de température constante dans les modèles. Le maillage choisi pour les différents scénarios du modèle est de 0,01 m avec un pas temporel d'une heure pour les simulations en régime transitoire. Une condition limite nommée « *Surface energy balance* » est utilisée pour la simulation des températures et a été attribuée à la surface des modèles. La condition limite s'appuie sur des données relatives (1) à la température de l'air, (2) à la vitesse du vent, (3) à la radiation solaire, (4) à l'albédo, (5) à l'humidité relative, (6) à l'épaisseur de la neige et (7) à la hauteur de la végétation qui sont illustrés dans le tableau 4.2.

Chapitre 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les principaux résultats issus de la présente étude sont associés aux trois classes d'approches méthodologiques développées, soit (1) l'imagerie thermique satellitaire, (2) l'imagerie thermique haute résolution et (3) la modélisation numérique. La discussion proposée ici cible spécifiquement l'étude de la température de surface des formations fluvioglaciaires dans la perspective d'en tirer des informations hydrogéologiques.

4.1 Imagerie thermique satellitaire

4.1.1 Cartographie thermique des eskers

La cartographie thermique des eskers s'appuyant sur des images satellites fournit une évaluation des patrons de distribution spatiales de LST et de TVDI à l'échelle de la région. Les données associées à cette cartographie sont présentées ci-dessous, principalement dans le but d'évaluer comment les images satellites peuvent être exploitées pour l'étude de problématiques en hydrogéologie.

4.1.1.1 Variations spatiales

Les données satellitaires disponibles permettent d'évaluer les variations spatiales dans la LST et la TVDI des eskers à l'échelle de la région. Ces données sont présentées aux figures 4.1A et 4.1B. Sur ces images, l'emphasis est mise sur le territoire correspondant à l'étude PACES-AT1 ([Cloutier et al., 2013](#)) afin de permettre une meilleure visualisation des résultats. De façon générale, les valeurs de TVDI et de LST sont spatialement corrélées (Éq. 28). Des gradients de LST et de TDI sont observés sur la majorité des formations fluvioglaciaires et les valeurs minimales semblent souvent observées près des marges de ces formations. Ces observations sont cohérentes avec la prévalence de zones d'exfiltration d'eau souterraine sur les marges des eskers et moraines ([Nadeau et al., 2015](#); [Cloutier et al., 2016](#)).

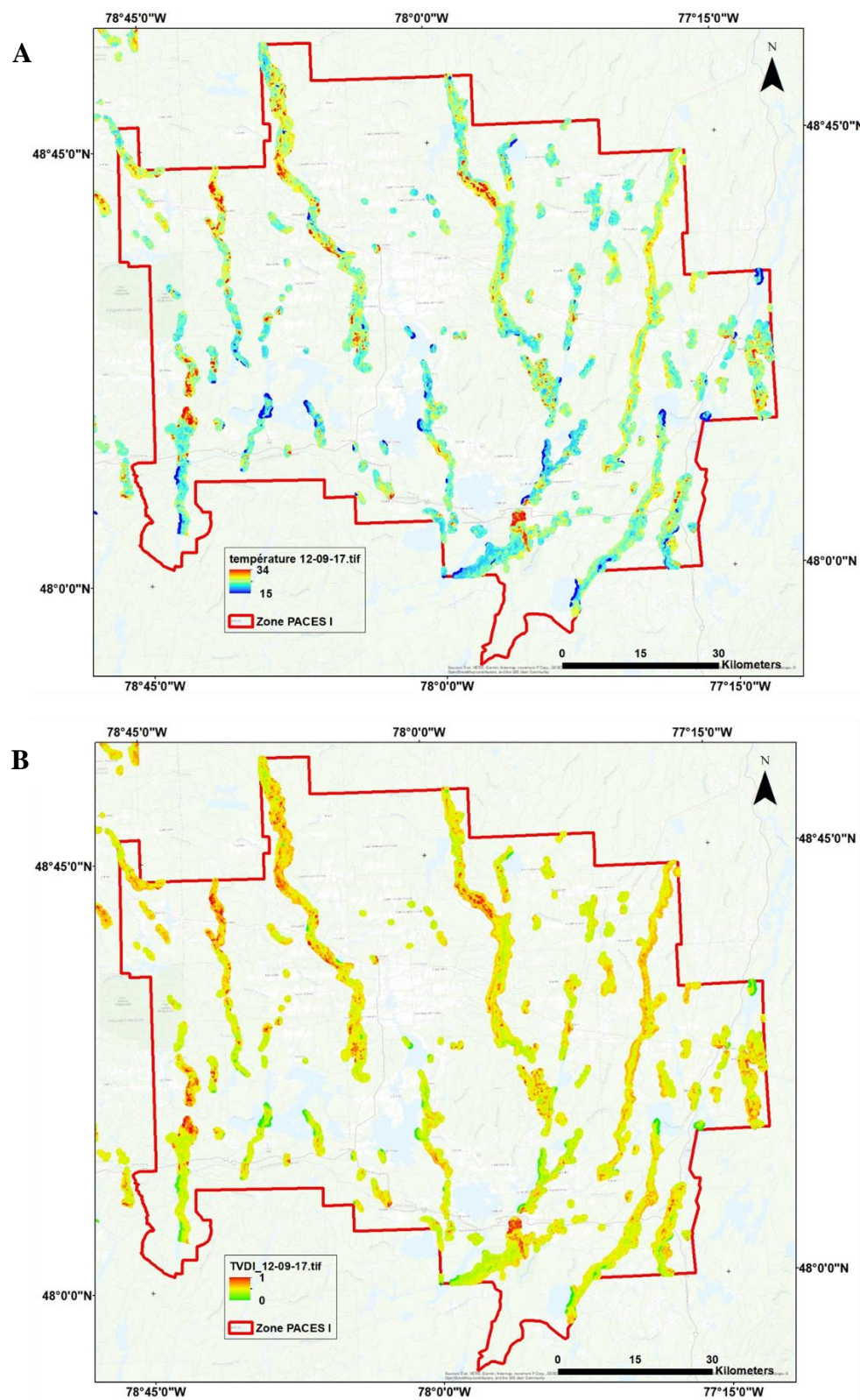


Figure 4.1: Cartographie des valeurs de LST et TVDI calculées pour les formations fluvioglaciaires de l'Abitibi

Les données illustrées à la figure 4.1 couvrent un vaste territoire, ce qui limite la visualisation des détails qui sont nettement mieux définis sur des images locales, comme sur la figure 4.2 qui représente le secteur de l'esker Saint-Mathieu / Berry près d'Amos. Cette image permet d'illustrer l'effet des zones anthropiques, lesquelles induisent des anomalies chaudes au niveau des valeurs de LST. C'est le cas notamment pour l'aéroport d'Amos, situé dans le coin nord-ouest de la figure 4.2. C'est à partir d'images locales que furent identifiés les secteurs d'intérêt pour l'acquisition d'images à haute résolution par drone.

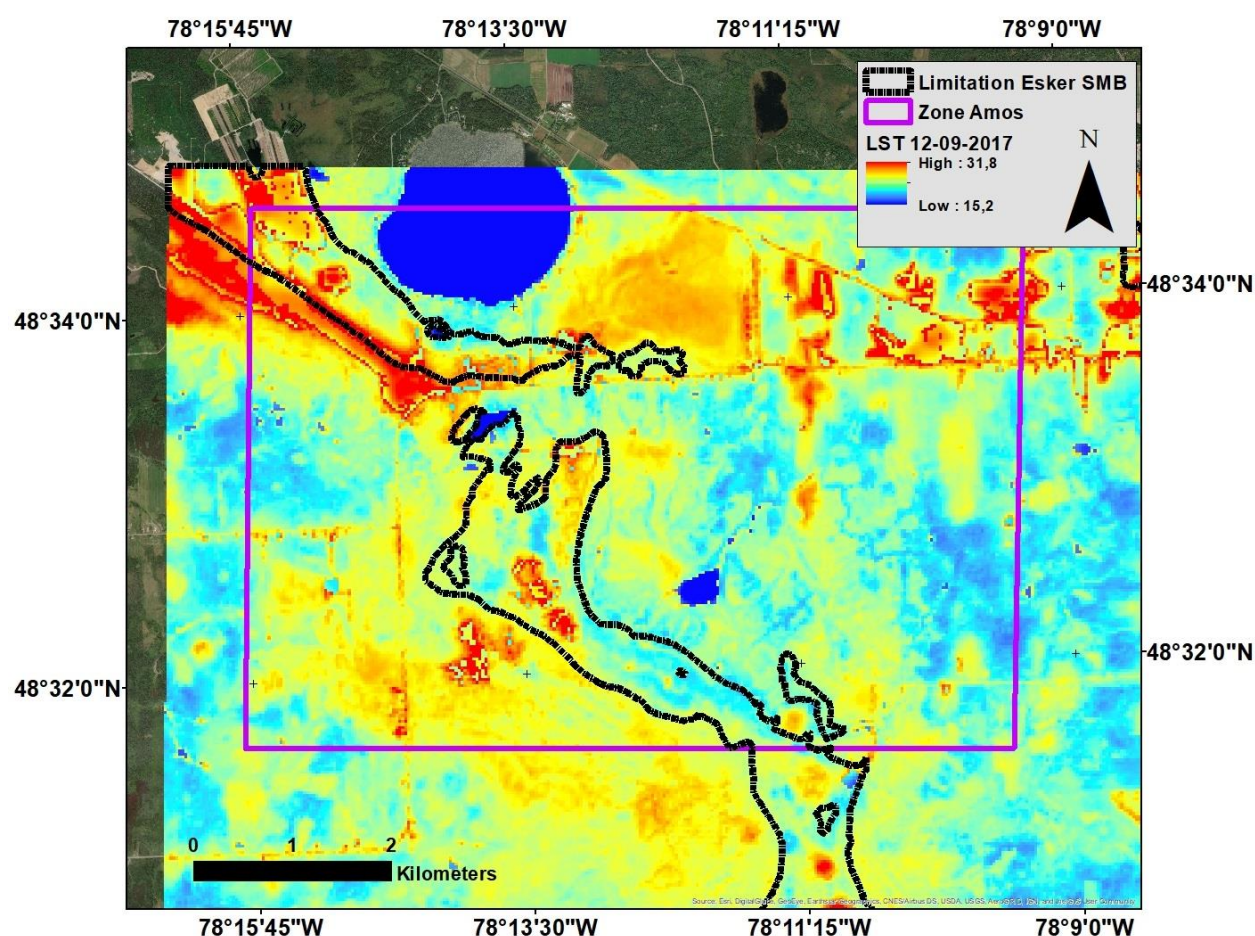
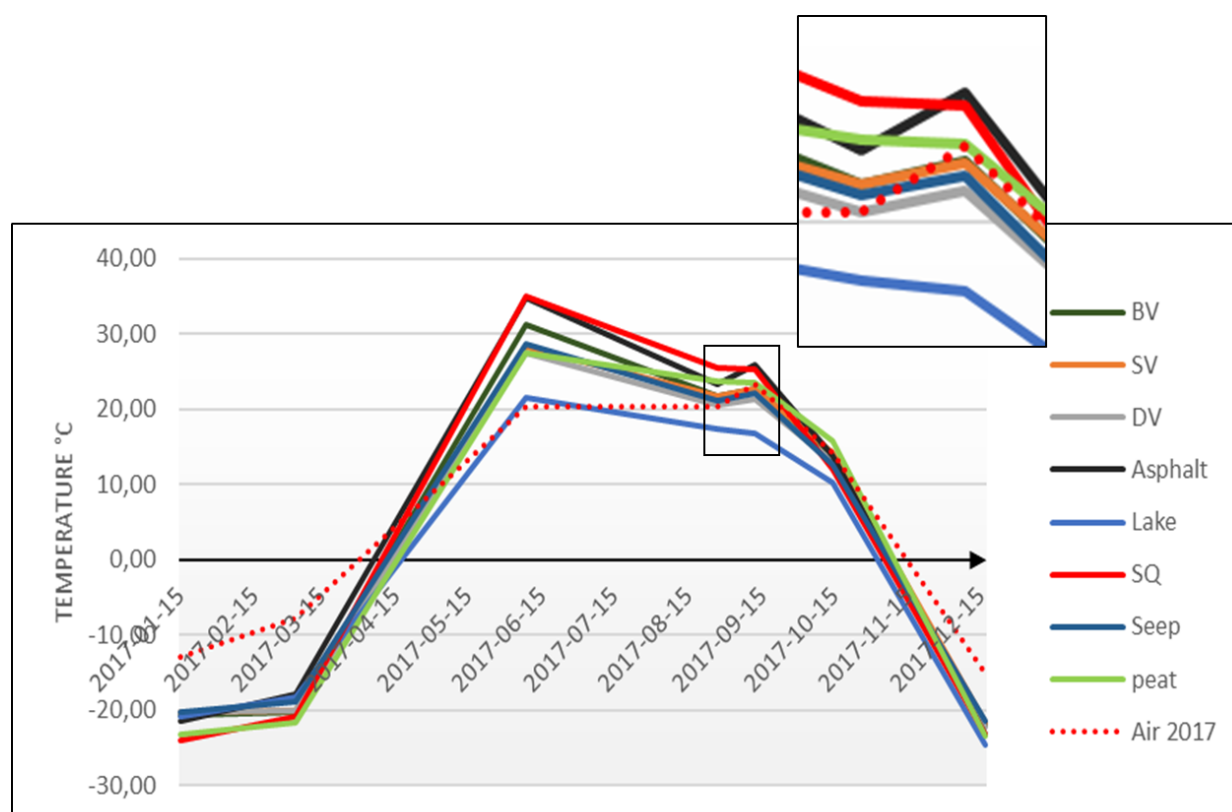


Figure 4.2: Valeurs de LST calculées en septembre 2017 pour la zone de l'esker Saint-Mathieu / Berry dans le secteur d'Amos

4.1.1.2 Variations temporelles

Tel que préalablement indiqué, le cycle du satellite *Landsat 8* est de 16 jours. Il en résulte que des images couvrant le même secteur peuvent être disponibles pour différentes plages temporelles. Bien que la sélection des images doit s'appuyer notamment sur la couverture nuageuse (des images à moins de 30% de couverture nuageuse sont requises), d'autres paramètres peuvent être considérés, dont la saisonnalité (figure 4.4). En ce sens, la figure 4.3 illustre la différence entre une gamme d'images acquises à différents moments de l'année, pour différentes catégories de couverture du sol. Toutes les composantes ciblées suivent la température de l'air de façon synchrone à l'échelle du cycle annuel. Des différences de température sont néanmoins associées au type de couverture de sol. Les données indiquent notamment que les lacs et les sources (exfiltrations d'eau souterraine) tendent à présenter des températures plus faibles (entre 14 et 21°C) que les autres types de couverture de sol, surtout en période estivale. Les zones d'exfiltration recensées dans le cadre du PACES-AT1, représentées par une moyenne de température sur une zone tampon de 100 m, sont légèrement distinctes de la température de la végétation qui les entoure (végétation dense DV, végétation courte SV, végétation brune BV et tourbières). Cela pourrait s'expliquer par des changements locaux induits par les exfiltrations d'eau souterraine, dont la diminution de la température de l'air et l'établissement de communautés végétales adaptées aux zones d'exfiltration ([Pfeifer et al., 2019](#)). Les zones anthropiques, telles les routes asphaltées et les zones d'extraction de sable et de gravier, présentent des valeurs de LST plus élevées (entre 21 et 35°C) que les autres composantes en période estivale. Les données suggèrent également que l'ampleur des différences thermiques entre les types de couverture du sol étudiées est plus marquée entre mai et octobre, alors que les différences entre les différents types de couverture du sol sont plus faibles lors de la période de gel. Un tel constat peut également s'observer par la comparaison d'images satellites acquises à différents moments de l'année pour une formation fluvioglacière. À titre d'exemple, la figure 4.5 présente les données de TVDI calculées pour un segment de l'esker Saint-Mathieu / Berry en juin, septembre et janvier. Ces images montrent des gradients thermiques plus marqués et mieux définis lors de la période estivale. L'image acquise en janvier ne permet pas la distinction de l'esker des autres composantes de surface. Ces observations suggèrent que les images satellitaires acquises en période estivale sont plus propices à l'évaluation de la distribution spatiale des zones d'exfiltration d'eau souterraine.



Classe	Signification selon l'image du visible du septembre 2017	Nombre de points de l'échantillon
BV	Végétation ayant une apparence brune	45
SV	Végétation courte	45
DV	Végétation dense	45
Asphalt	Asphalte	45
Lake	Lac	45
SQ	Sol d'une sablière/gravière	45
Seep	Exfiltration	45
Peat	Tourbière	45

Figure 4.3: La variation de la moyenne des températures des échantillons surfaciques sur l'esker SMB (Zone pilote) pendant l'année 2017

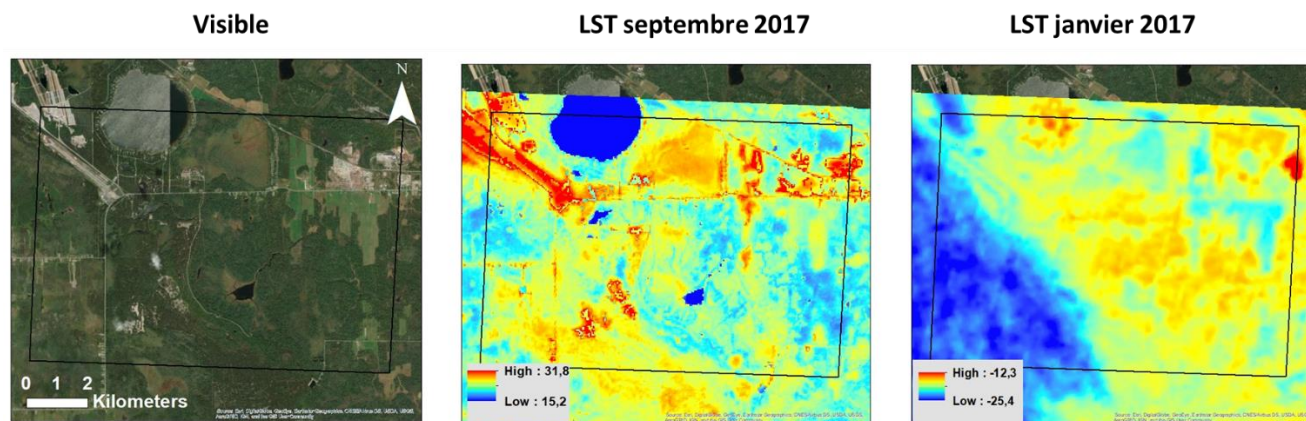


Figure 4.4: Comparaison des valeurs de LST calculées au niveau de l'esker Saint-Mathieu / Berry dans le secteur d'Amos sous l'effet de la saisonnalité

Les données de TVDI calculées présentent des variations spatiotemporelles cohérentes avec les données de LST comme en témoignent les données illustrées à la figure 4.5 pour les mois de janvier, juin et septembre 2017. Les données TVDI associées à un tronçon de l'esker Saint-Mathieu / Berry ont de surcroît été utilisées afin d'appliquer une classification par l'outil *GA* de *ArcGIS* (figure 4.6). Les regroupements ainsi créés permettent une séparation des données selon dix classes, lesquelles sont spatialement associées avec les valeurs de TVDI (figure 4.6 vs figure 4.5). Les classes s'avèrent de surcroît spatialement associées avec des composantes identifiables sur l'image visible. Les données de TVDI et l'analyse réalisée avec l'outil *GA* révèlent que les images acquises en janvier ne favorisent pas la détection des anomalies thermiques. Les données acquises en juin et septembre présentent des contrastes mieux définis. Néanmoins, l'analyse par *GA* appliquée sur l'image du mois de juin semble surestimer la proportion du territoire associé aux zones humides et aux lacs. En ce sens, il fut jugé ici que les images acquises en septembre s'avèrent optimales pour l'étude des distributions spatiales de LST et de TVDI sur les eskers. Ainsi, sauf si spécifié autrement, ce seront les images du mois de septembre qui seront discutées dans les sections subséquentes du présent mémoire, notamment pour l'identification des zones d'exfiltration d'eau souterraine et pour l'étude des zones de sols inorganiques affleurants.

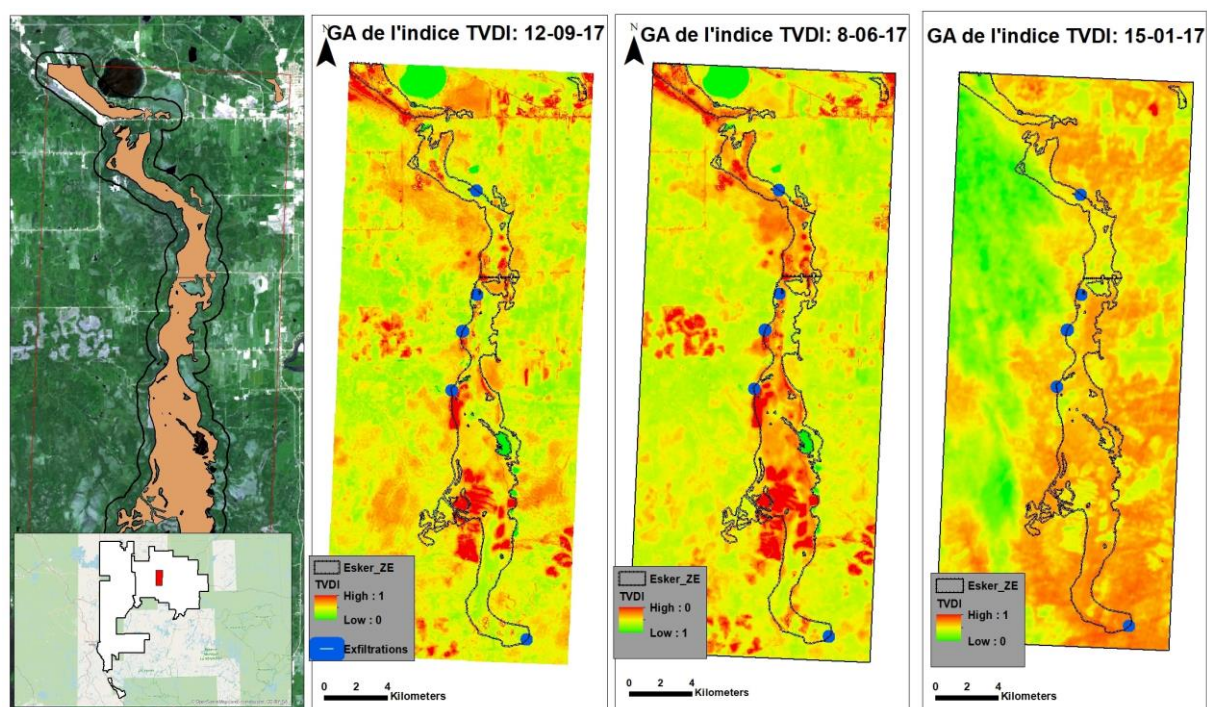


Figure 4.5: Calcul de TVDI pour des extraits des images de 1) septembre, 2) juin et 3) janvier, 2017 pour un tronçon de l'esker Saint-Mathier / Berry

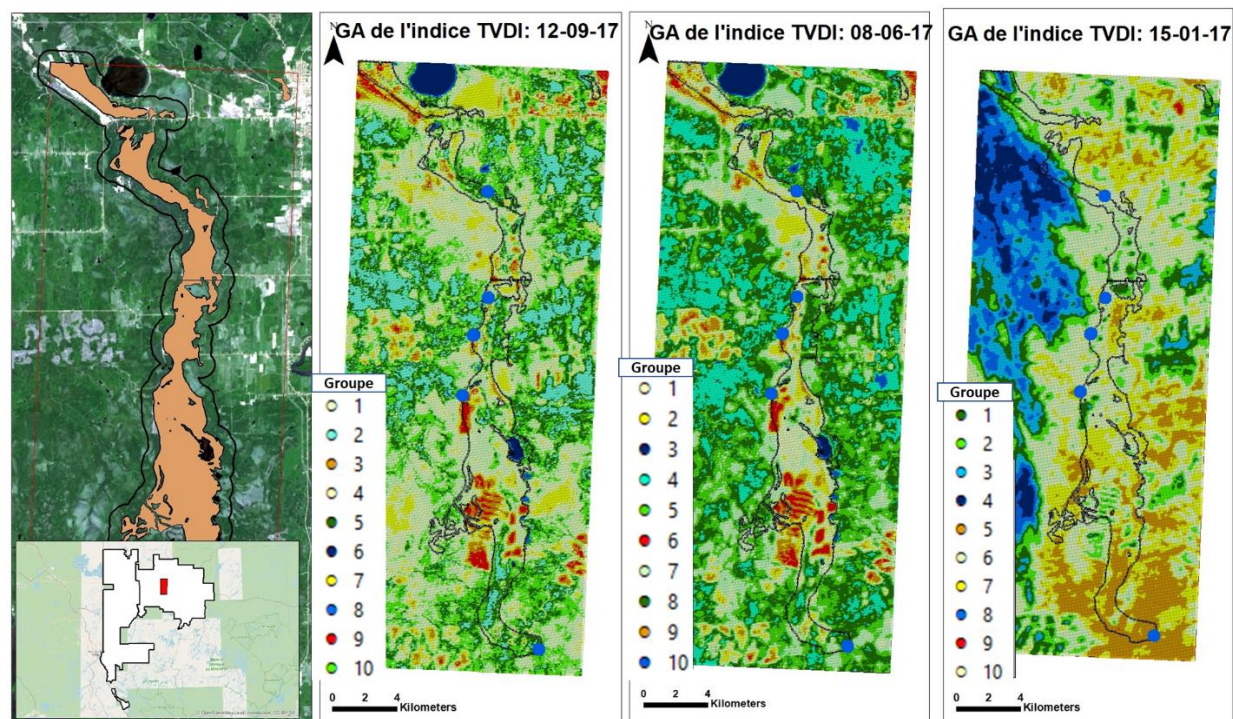


Figure 4.6: Calcul de TVDI pour des extraits des images de 1) septembre, 2) juin et 3) janvier, 2017

4.1.2 Identification des zones d'exfiltration d'eau souterraine

La classification par *GA* s'appuyant sur les données TVDI (septembre 2017) calculées pour l'ensemble des formations fluvioglaciaires (avec une zone tampon de 500 m) de la zone d'étude ont été utilisées afin de déceler une éventuelle corrélation spatiale avec les zones d'exfiltrations d'eau souterraines identifiées lors d'études antérieures ([Cloutier et al., 2013](#); [Nadeau et al., 2015](#)). Les études précitées avaient permis l'identification de 35 zones d'exfiltration ponctuelle d'eau souterraine sur un territoire de près de 10 000 km². Les résultats des calculs par *Grouping Analysis* ont été comparés à la position de ces zones d'exfiltration. Pour les calculs par *Grouping Analysis*, le groupe ayant le plus d'intersections avec les exfiltrations identifiées (avec variation de la zone tampon), représente une anomalie thermique appropriée. Les résultats ont permis d'identifier deux groupes de données (groupes 2 et 4) qui incluaient un plus grand nombre de zones d'exfiltration d'eau souterraine. Les données révèlent que les zones couvertes par le groupe 2 incluent 87% des exfiltrations d'eau souterraine identifiées lors des études antérieures (soit 30 des 35 exfiltrations identifiées), alors que la superficie totale couverte par ce groupe représente seulement 220,7 km², soit environ 12% de la surface totale investiguée (figure 4.7). Ces données tendent à indiquer que l'analyse des TVDI et leur traitement par *GA* pourrait s'avérer un outil pertinent pour évaluer la distribution spatiale des zones d'exfiltration d'eau souterraine sur les marges des formations fluvioglaciaires. Ces informations s'avèrent utiles notamment parce qu'une vaste proportion des zones associées aux formations fluvioglaciaires de la région ne sont pas accessibles par route. Ainsi, il est probable que de nombreuses zones d'exfiltration n'aient pas été identifiées dans le cadre des études antérieures. Or, la distribution spatiale de ces zones s'avère essentielle afin de mieux documenter la position de la nappe d'eau souterraine dans les formations fluvioglaciaires et d'identifier les secteurs susceptibles d'héberger des écosystèmes dépendant de l'eau souterraine. Les données produites ici fournissent donc des cibles pertinentes pour la recherche future de zones d'exfiltration d'eau souterraine sur les marges des formations fluvioglaciaires de la région, au sein de secteurs couvrant moins de 12% de la superficie totale des formations ciblées. La figure 4.8 illustre la distribution spatiale des points de données associées au groupe 2, à l'échelle du territoire PACES-AT1. Il s'agit de secteurs qui devraient être ciblés pour l'identification de zones d'exfiltration d'eau souterraine lors d'études ultérieures. Dans un tel contexte, les approches développées ici constituent des compléments utiles aux approches de terrain.

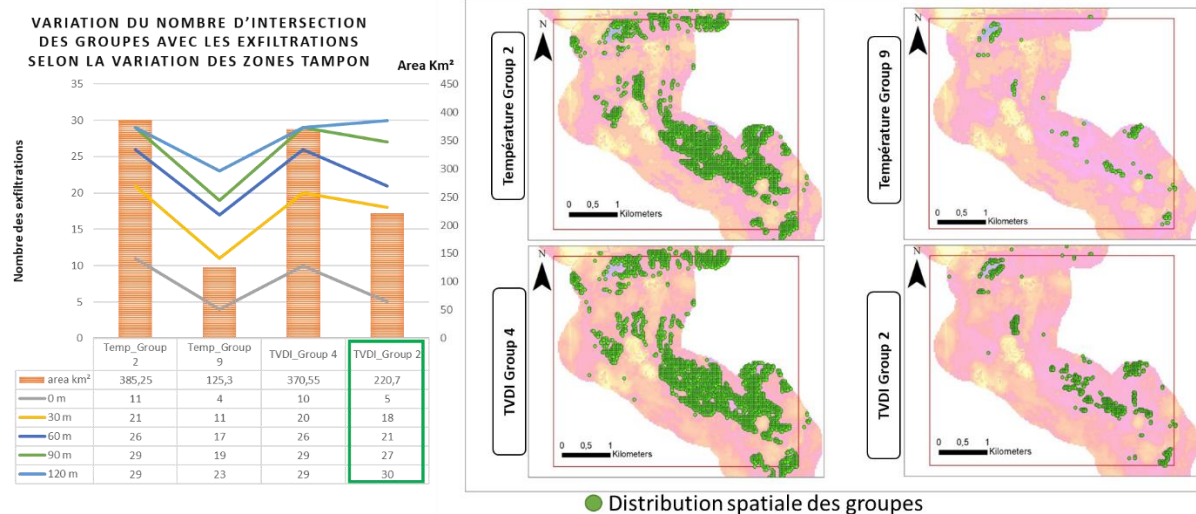


Figure 4.7: Analyse des groupes d'anomalies thermiques en fonction des intersections avec les exfiltrations du PACES-AT1 et de la surface couverte

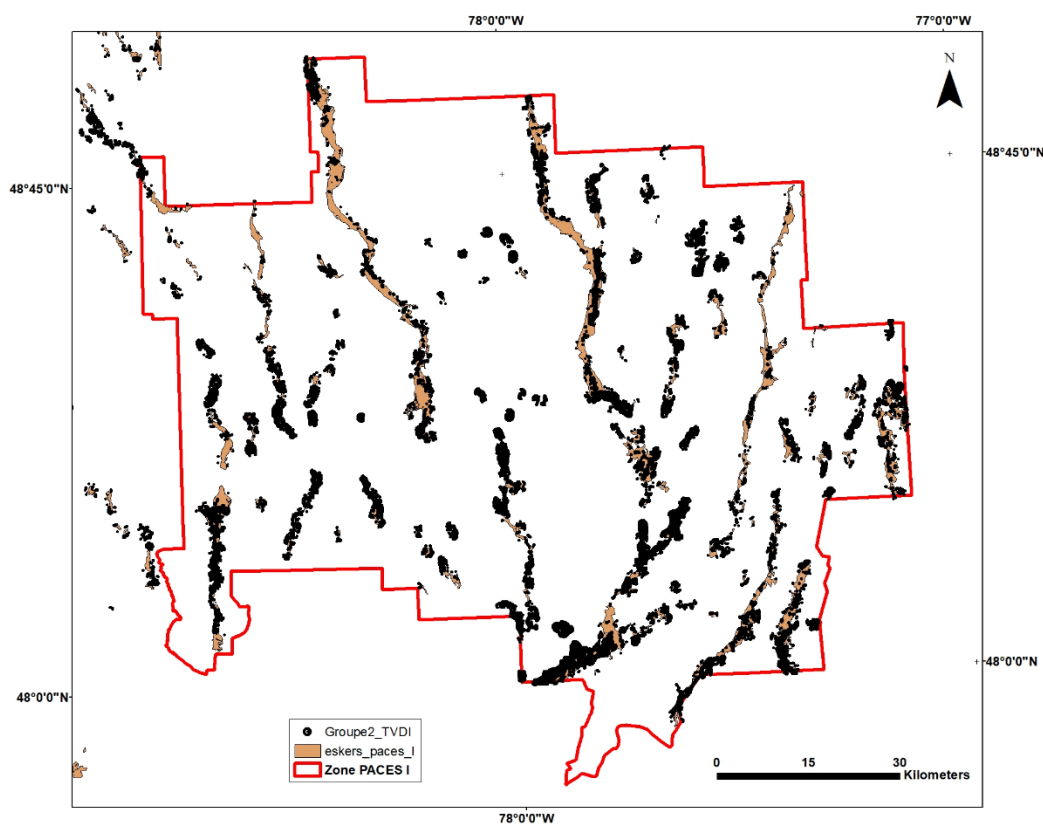


Figure 4.8: Distribution spatiale des valeurs de TVDI associées au groupe 2 évalué par l'approche de *Grouping Analysis*

4.1.3 Cartographie thermique des sols inorganiques affleurants

La classification non supervisée appliquée sur les images satellitaires (spectre visible) a permis de réduire significativement la superficie de la zone d'étude pour inclure uniquement les sols inorganiques affleurants (sans couvert végétal). Les filtres appliqués ont réduit le nombre de points (correspondant au centre des pixels) de 137 600 à 1 311. Les LST calculées aux mois de juin et septembre 2017 ainsi que les différences de températures calculées entre septembre et juin pour ces zones sont illustrées à la figure 4.9. Dans l'ensemble, les données de LST de juin et septembre montrent une corrélation significative (figure 4.9), ce qui tend à indiquer que les valeurs calculées sont cohérentes pour les deux images sélectionnées. En complément, les figures 4.10A et 4.10B montrent les LST mesurées en juin et septembre rapportées contre la profondeur de la nappe d'eau souterraine (valeur estimée par [Nadeau et al. \(2015\)](#)). La profondeur de la nappe issue de la référence précitée a été calculée selon une grille de 10 x 10 m, en soustrayant l'élévation de la surface piézométrique estimée par approche SIG de l'élévation de la surface du sol. Les données ne révèlent pas de corrélations significatives entre les LST mesurées pour les sols inorganiques affleurants et la profondeur de la nappe, telle que calculée par [Nadeau et al. \(2015\)](#). Cette observation va à l'encontre de l'hypothèse voulant que les zones caractérisées par de faibles épaisseurs non saturées pour des sols inorganiques devraient présenter une température plus faible en période estivale. Différents facteurs pourraient expliquer cette situation. D'une part, la position de la nappe d'eau souterraine estimée par [Nadeau et al. \(2015\)](#) s'appuie sur des interpolations régionales qui constituent des approximations alors que le modèle numérique de terrain de la région ne prend pas en compte la topographie précise des zones d'excavation, ce qui complique significativement les comparaisons. D'autre part, les sites d'extraction de sable et gravier présentent généralement des topographies très accidentées, avec des plateaux d'excavation situés à différentes élévations et des parois abruptes. Dans un tel contexte, il est possible que l'élévation des points sur lesquels les LST sont calculées soit associée à une erreur significative. Ces constats révèlent la pertinence de procéder à l'acquisition de données de haute résolution afin de mieux évaluer le potentiel de l'imagerie thermique pour l'évaluation de la profondeur de la nappe au sein de sites d'extraction de sable et de gravier.

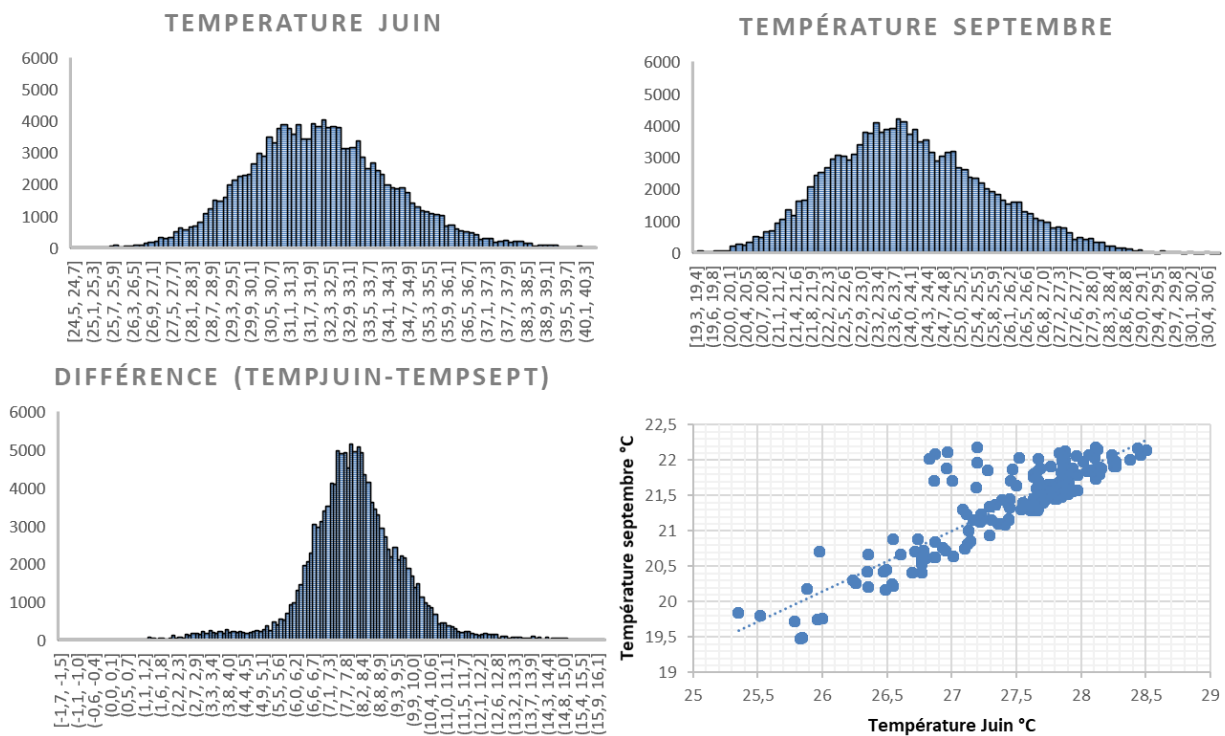


Figure 4.9: Les histogrammes de la température de juin, septembre et de la différence ainsi que le résultat du filtre permettant de retenir les pixels ayant une température faible pour les deux dates

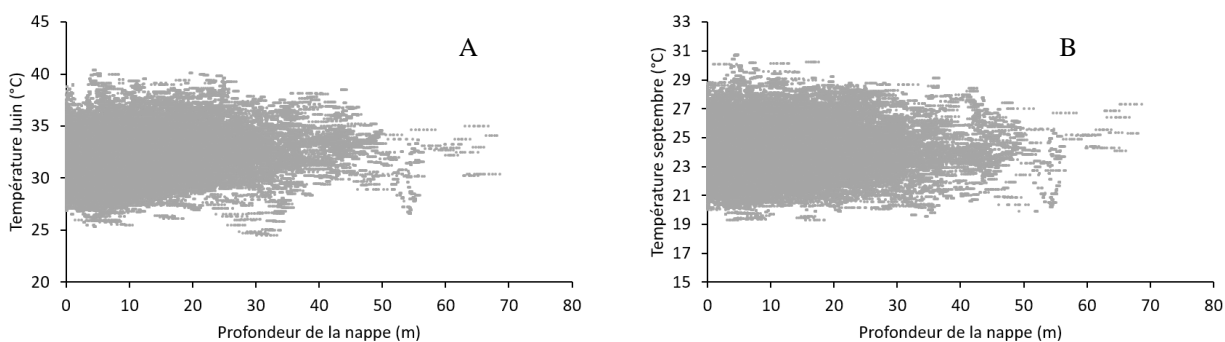


Figure 4.10: Comparaison des valeurs de LST calculées pour les sols inorganiques affleurants en A) juin et B) septembre 2017 avec les profondeurs de nappes calculées par [Nadeau et al. \(2015\)](#)

4.2 Imagerie thermique haute résolution

Les vols réalisés par drone ont permis d'acquérir des images à haute résolution, sur des maillages de 6 cm et 10 cm pour le visible et la thermique, respectivement. Cette résolution plus fine que celle associée aux images satellitaires permet la détection plus précise des objets de surface et une meilleure documentation des processus thermiques et hydrogéologiques étudiés. Les sous-sections qui suivent présentent les principaux constants associés aux images à haute résolution.

4.2.1 Variations thermiques spatiotemporelles sur l'esker SMB

La figure 4.11 illustre la position des zones retenues sur l'esker Saint-Mathieu / Berry pour l'acquisition d'images optiques et thermiques à haute résolution. Les 14 zones ont été retenues suivant l'analyse de l'image satellite de septembre 2017 (voir section 5.1 pour la description des images satellitaires). Ces zones ont été choisies afin d'évaluer les LST au niveau de secteurs correspondant (1) à des gradients thermiques identifiables sur l'image satellite, (2) à des points de données associés au groupe 2 des analyses de *Grouping Analysis* réalisées sur les images de TVDI et (3) à des exfiltrations d'eau souterraine identifiées lors d'études antérieures ([Cloutier et al., 2013](#)).

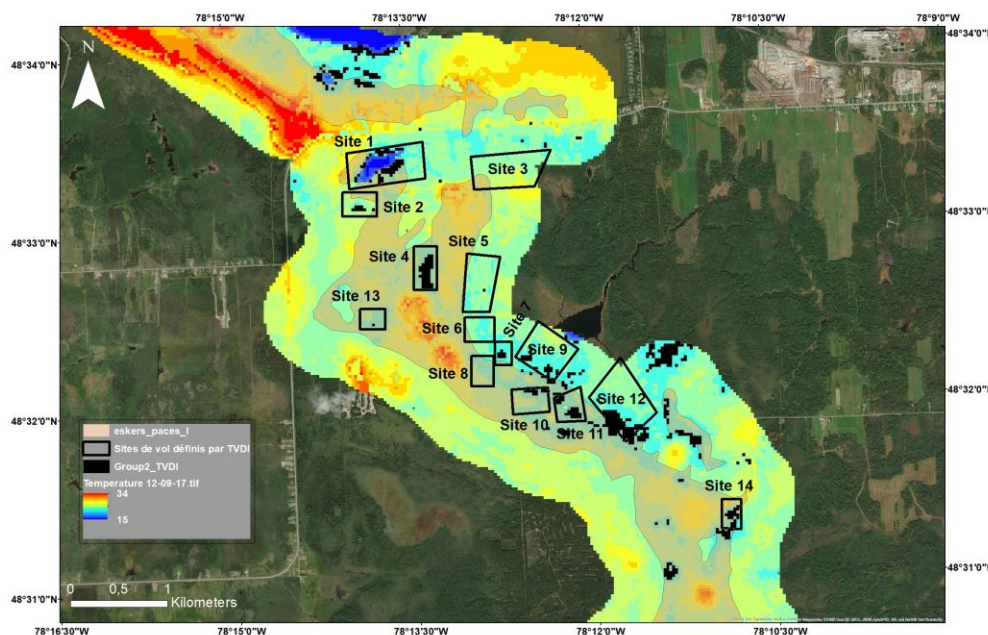


Figure 4.11: Localisation des 14 zones retenues pour l'acquisition d'images à haute résolution

La figure 4.12 présente une synthèse des données acquises alors que les orthomosaïques créées à partir des images acquises par drone sont présentées avec un plus grand niveau de détails dans l'annexe E.

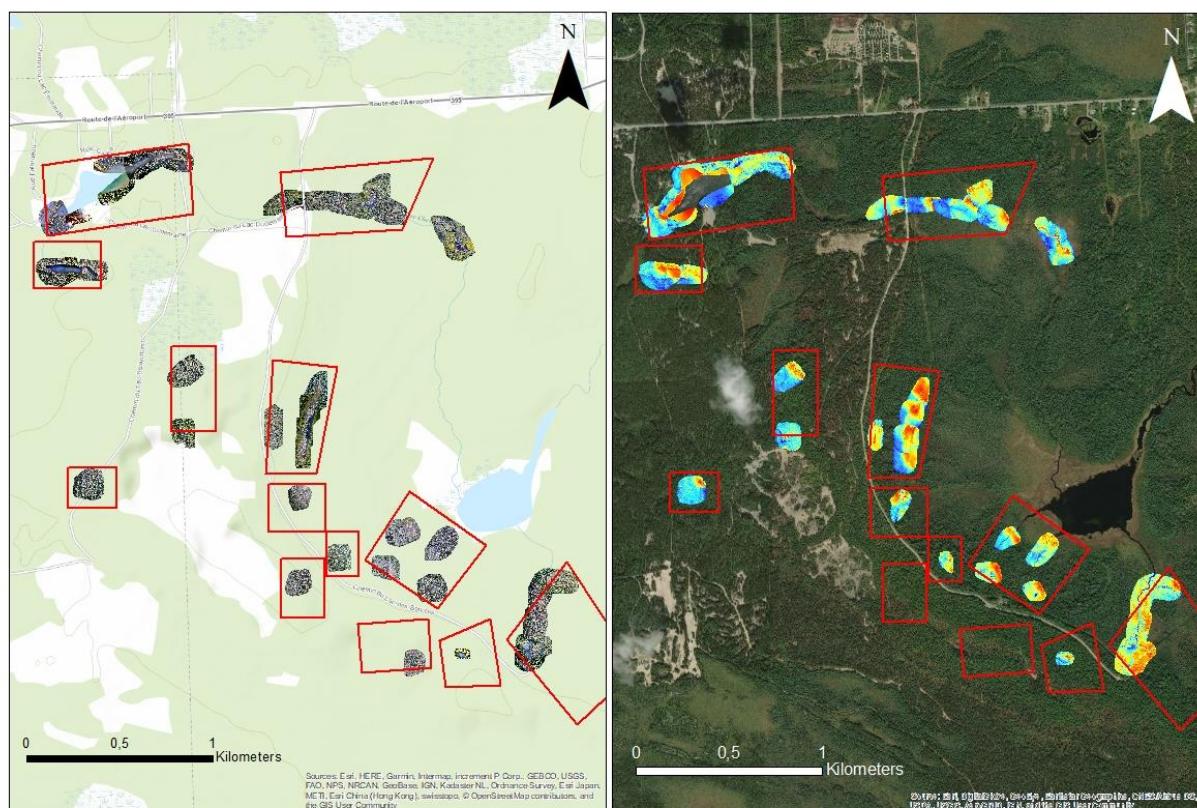


Figure 4.12: Synthèse des données thermiques haute résolution acquises au niveau de l'esker Saint-Mathieu / Berry

Les images à haute résolution révèlent que toutes les zones identifiées à partir de l'indice TVDI satellitaire sont caractérisées par des gradients thermiques significatifs. Les gradients sont pour l'ensemble visible sur les mosaïques thermiques et les résultats du *Grouping Analysis*. La forme géométrique irrégulière de quelques vols ainsi que la planéité des surfaces sont parmi les causes associées à des problèmes de mosaïquage par le logiciel de photogrammétrie *Pix4DMapper*, ce qui induit l'élimination de quelques images dans le processus de traitement et en conséquence la diminution de la surface couverte (voir tableau 3.3 et annexe E). L'analyse des rapports de traitement par *Grouping Analysis* a permis de localiser plusieurs zones potentiellement associées à

des exfiltrations d'eau souterraine. Cette thématique sera discutée plus en détail pour le site ayant fait l'objet de vols à intervalles réguliers.

La réponse thermique des objets de surface varie selon leur nature et dépend des conditions météorologiques, lesquelles varient généralement à l'échelle saisonnière et journalière ([Del Grande et al., 1993](#)). Ainsi, des séquences de vols réalisés à intervalles réguliers ont été effectuées au niveau de la résurgence située à l'extrême sud de l'esker Saint-Mathieu / Berry, en complément aux images préalablement présentées. La figure 4.13 illustre les données recueillies à intervalles de deux heures, entre 6h00 et 22h00, le 7 août 2019. Les données révèlent des variations thermiques spatiotemporelles systématiques au niveau du site survolé. En complément, afin de mieux discuter des variations spatiotemporelles des LST, des points de données ont été retenus au niveau de différents types de couverture de sol, en s'appuyant sur l'interprétation des mosaïques optiques. Ainsi, la figure 4.14 illustre les variations thermiques mesurées pour des ruisseaux situés à la limite nord-ouest et sud-ouest du lac, des branches mortes sur les berges du lac, des arbres de grande taille, la tourbe, une zone près du centre du lac, ainsi que BSV et GSV (voir exemple en annexe B). Les données révèlent que les deux ruisseaux représentent les composantes de surface les plus froides, et ce pour l'ensemble des heures de mesure. Le lac présente pour sa part des températures plus élevées que les sources. Pour toutes les composantes d'eau de surface, l'ampleur des variations thermiques journalières est de moindre envergure que pour les autres composantes de couverture du sol. Les variations temporelles des températures des composantes associées aux eaux de surface sont de surcroît déphasées par rapport à la température de l'air. Pour les ruisseaux, qui sont de faible dimension, ce tamponnage des températures résulte selon toute vraisemblance d'apports soutenus en eau souterraine.

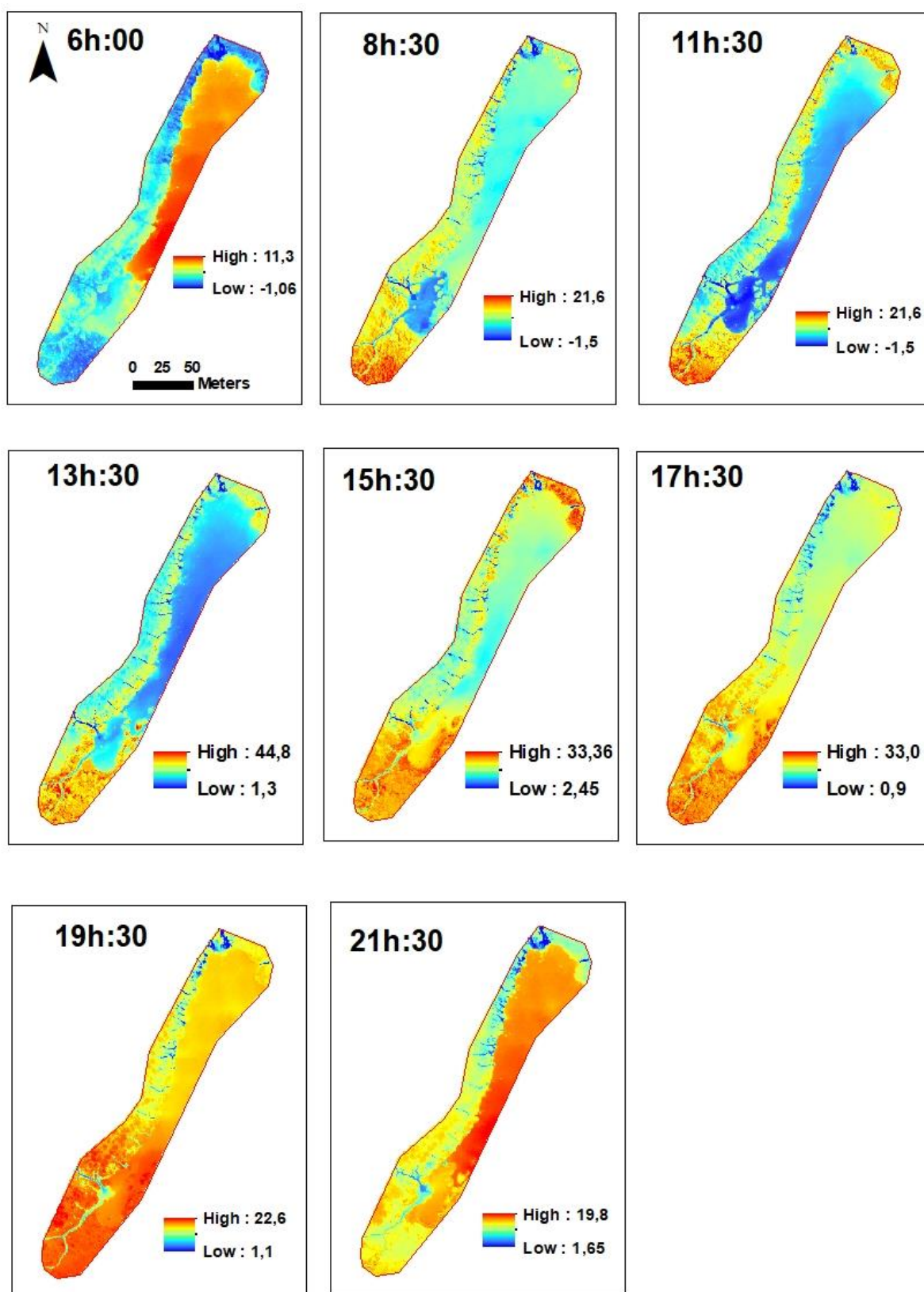


Figure 4.13: Valeurs de LST calculées pour les vols à intervalles réguliers du 7 août 2019

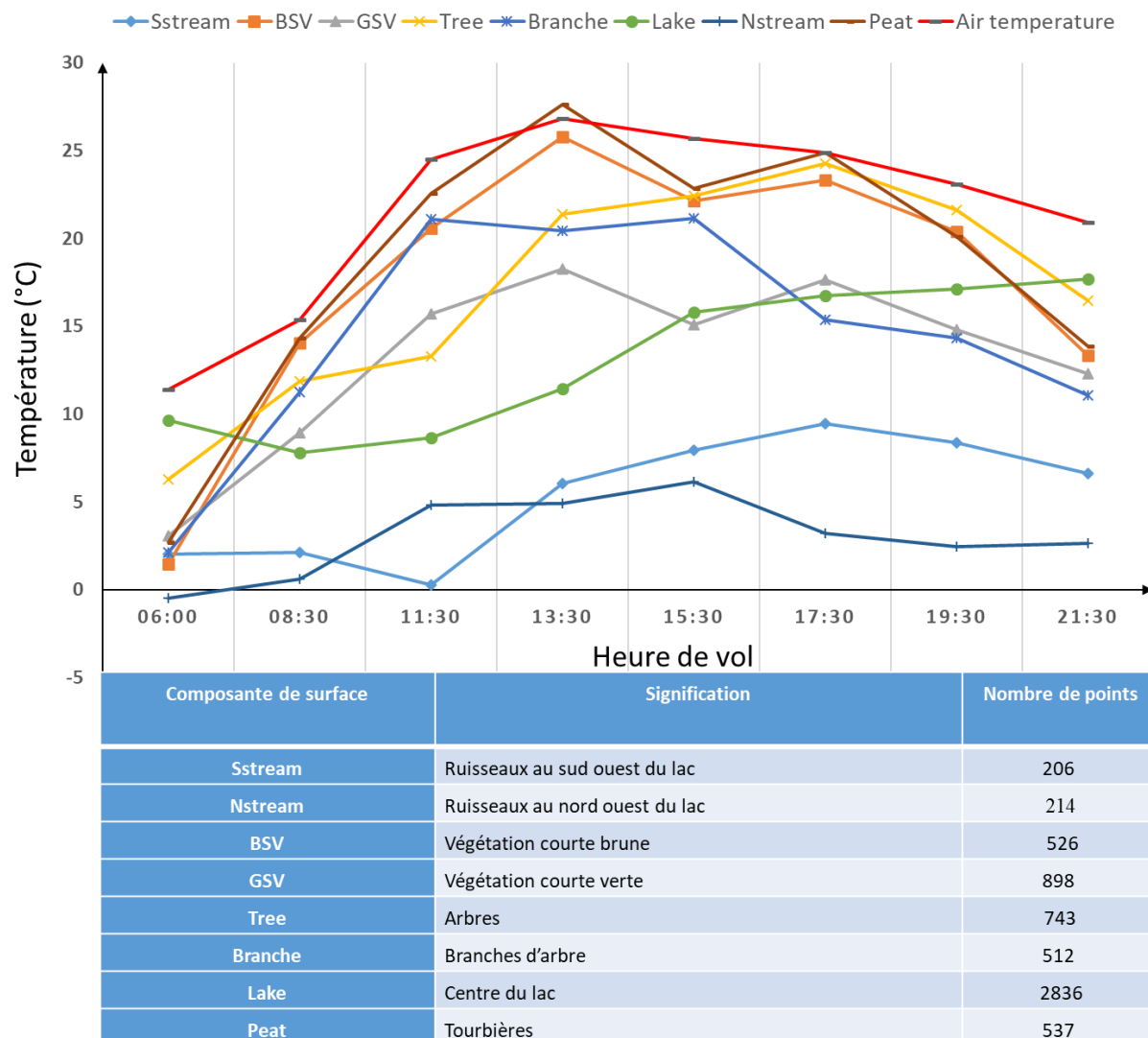


Figure 4.14: La variation journalière de température des composantes de surface

Les données illustrées à la figure 4.13 révèlent une certaine complexité, notamment en raison de la distribution spatiale des gradients thermiques. Il est notamment complexe d'identifier visuellement différentes zones présentant des variations thermiques similaires. Afin de palier à cette complexité, des analyses par GA ont été réalisées sur les résultats issus de chacune des images, les valeurs matricielles ayant préalablement converties en données ponctuelles. Les résultats des *Grouping Analysis* ainsi produits sont illustrés à la figure 4.15. Pour chacune des analyses, le groupe présentant la plage de températures la plus faible est considérée comme constituant une anomalie thermique froide. Une distinction est réalisée entre des analyses réalisées avant et après 15h30, heure à laquelle la température de l'air a atteint son maximum (voir figure 4.17). Afin de simplifier

les illustrations, la figure 4.16 présente uniquement les points de données associés aux groupes présentant les températures les plus faibles, pour chacune des images. Ces données révèlent que plusieurs cours d'eau de faible envergure situés dans la portion nord-ouest de l'image sont associées aux données les plus froides mesurées à différents moments de la journée. Pour les données acquises à 6h00 (AM), la fourchette des températures était minimale et plusieurs des composantes de surface avaient une température faible, similaire à la température des ruisseaux se trouvant dans le secteur sud-ouest de la zone étudiée. Ainsi, pour cette heure de la journée, seules les zones froides associées aux ruisseaux du secteur nord-ouest sont identifiées par le GA. Avec le lever du soleil, les radiations augmentent contribuent à l'augmentation des LST ([Cardenas et al., 2014](#)). Plusieurs des composantes de surface ont montré une augmentation de température immédiate. Néanmoins, les ruisseaux du secteur sud-ouest de la zone étudiée ont présenté une plus grande inertie. Ainsi, ces ruisseaux sont identifiés comme constituant des anomalies froides sur les images acquises entre 8h30 et 15h30. Les vols réalisés après 15h30 ont montré des anomalies froides principalement pour les petits cours d'eau situés au nord-ouest de la zone étudiée. Cela s'explique par l'écart important des moyennes de températures entre les ruisseaux du sud-ouest et ceux du nord-ouest, qui atteignait jusqu'à 7°C à 17h30. Selon toute vraisemblance, les ruisseaux du secteur nord-ouest sont situés plus près des zones d'exfiltration d'eau souterraine, ce qui explique leur température plus froide et plus stable que les autres composantes de surface. Bien que l'angle du soleil puisse influencer significativement les LST, notamment en raison de certaines zones ombragées, il est assumé ici que la distinction des cours d'eau du secteur nord-ouest et du secteur nord-est demeure cohérente. Cette interprétation s'appuie sur le fait que les ruisseaux sont tous situés sur la berge est d'un plan d'eau plus vaste, ce qui devrait limiter significativement les zones ombragées. Le calcul par GA réalisé sur les données calculées de variations de température (maximum journalier – minimum journalier) pour chacun des points de données permet aussi de cibler les ruisseaux situés dans la zone nord-ouest comme étant les composantes de surface les plus stables en termes de température. Sur la base de ce qui précède, il est proposé ici que l'analyse des LST de haute résolution par GA constitue un outil à fort potentiel pour la délimitation des zones d'exfiltration d'eau souterraine à l'échelle locale.

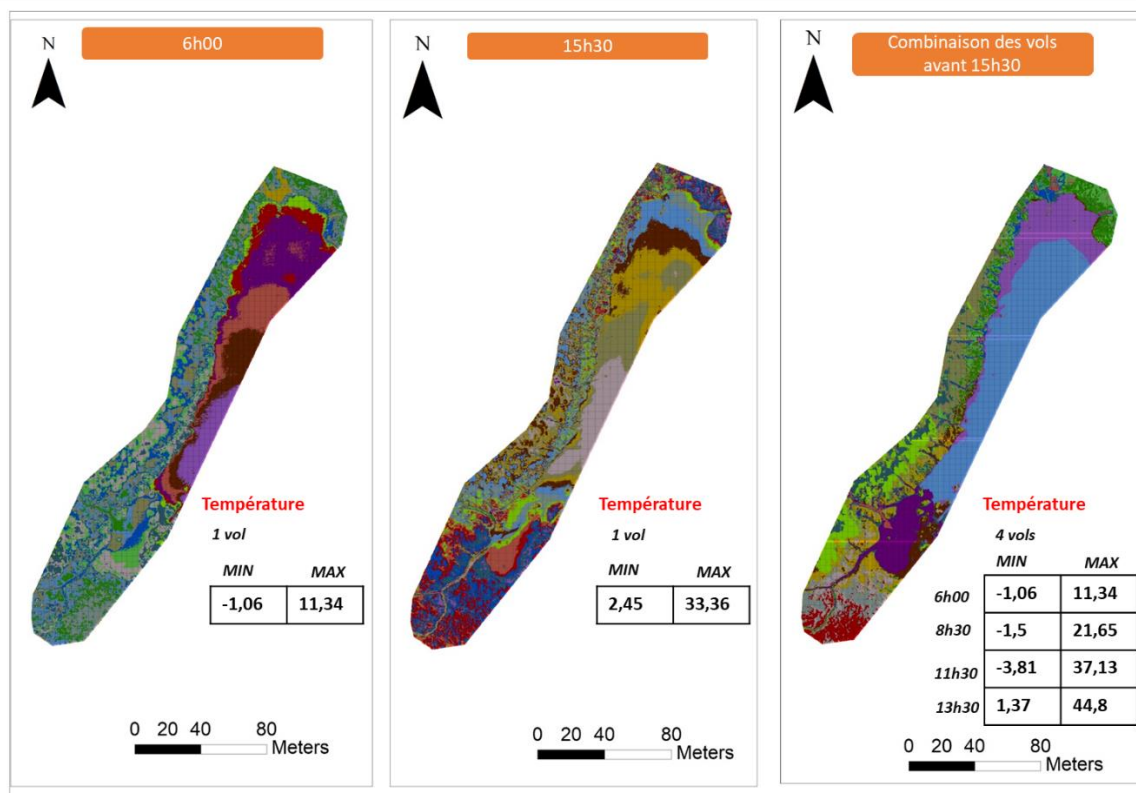


Figure 4.15: Résultats des calculs par *Grouping Analysis* sur les données du 7 août 2019

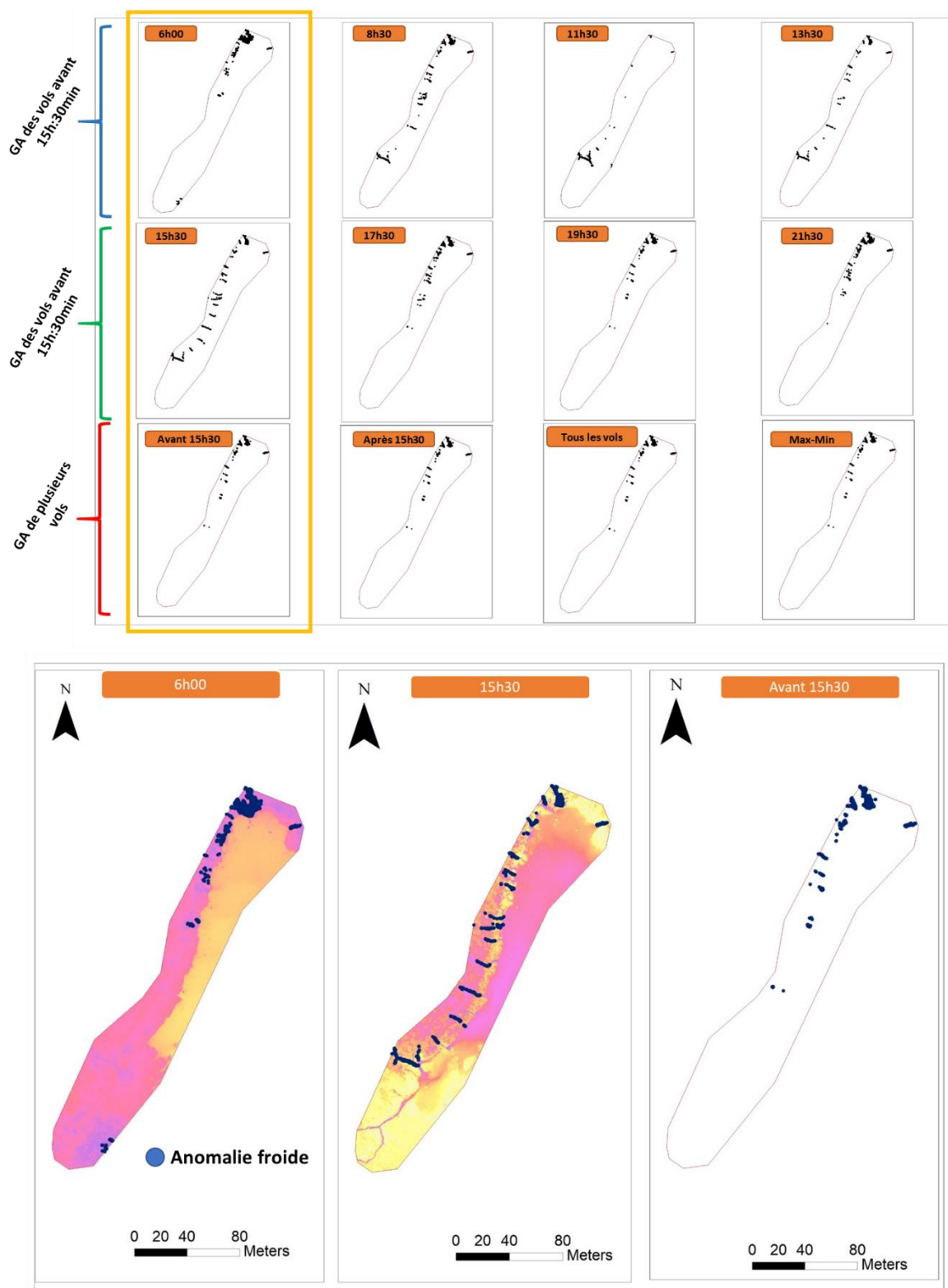


Figure 4.16: Représentation des données associées aux groupes de données les plus froides pour différentes images acquises le 7 août 2019

Afin d'en tester la reproductibilité, l'expérience des vols à intervalles réguliers réalisée le 7 août 2019 fut répétée le 17 juin 2020. Pour fins de comparaison, la figure 4.17 illustre les températures de l'air et les vitesses du vent mesurées pour les deux journées.

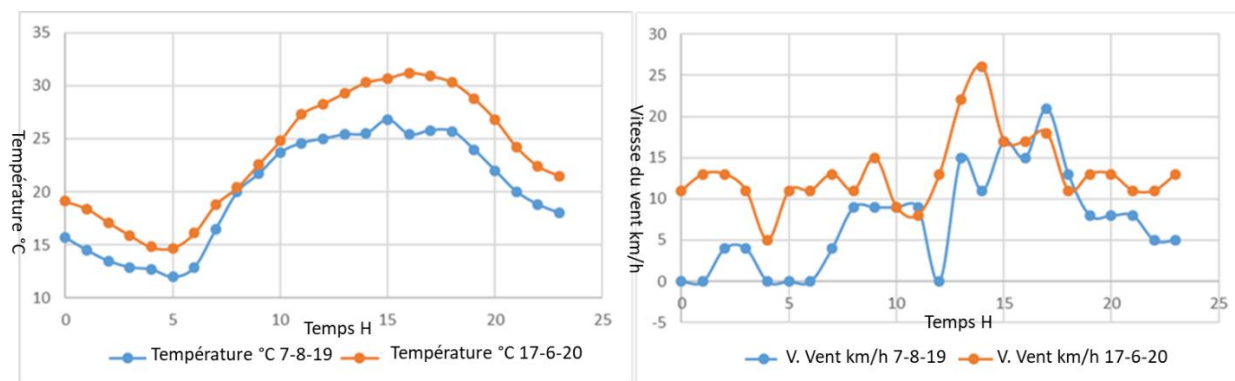


Figure 4.17: Variations de la température de l'air et la vitesse du vent durant les journées retenues pour la réalisation de vols à intervalles réguliers

Les données mesurées le 17 juin 2020 présentent des variations spatiotemporelles de LST similaires à celles obtenues le 7 août 2019 (figures 4.18 à 4.19). Néanmoins, les résultats des calculs par *GA* suggèrent que les points constituant des anomalies froides sont plus abondants et dispersés pour le 17 juin 2020 que pour le 7 août 2019. Cela est observable sur les figures 4.16 et 5.19. Différents facteurs pourraient expliquer cette différence. D'une part, les charges hydrauliques au sein de l'esker étant généralement plus élevées en juin qu'en août, il est possible que certaines zones d'exfiltration d'eau souterraine aient été actives seulement pour l'image acquise en juin. D'autre part, la vitesse du vent plus élevée le 17 juin 2020 (voir figure 4.17) pourrait avoir engendré un brassage plus marqué des eaux de surface, ce qui pourrait réduire les différences thermiques entre les différentes eaux de surface. L'effet du vent sur les eaux de surface, qui peut modifier la turbidité et la température a notamment été documenté par [Paaijmans et al. \(2008\)](#).

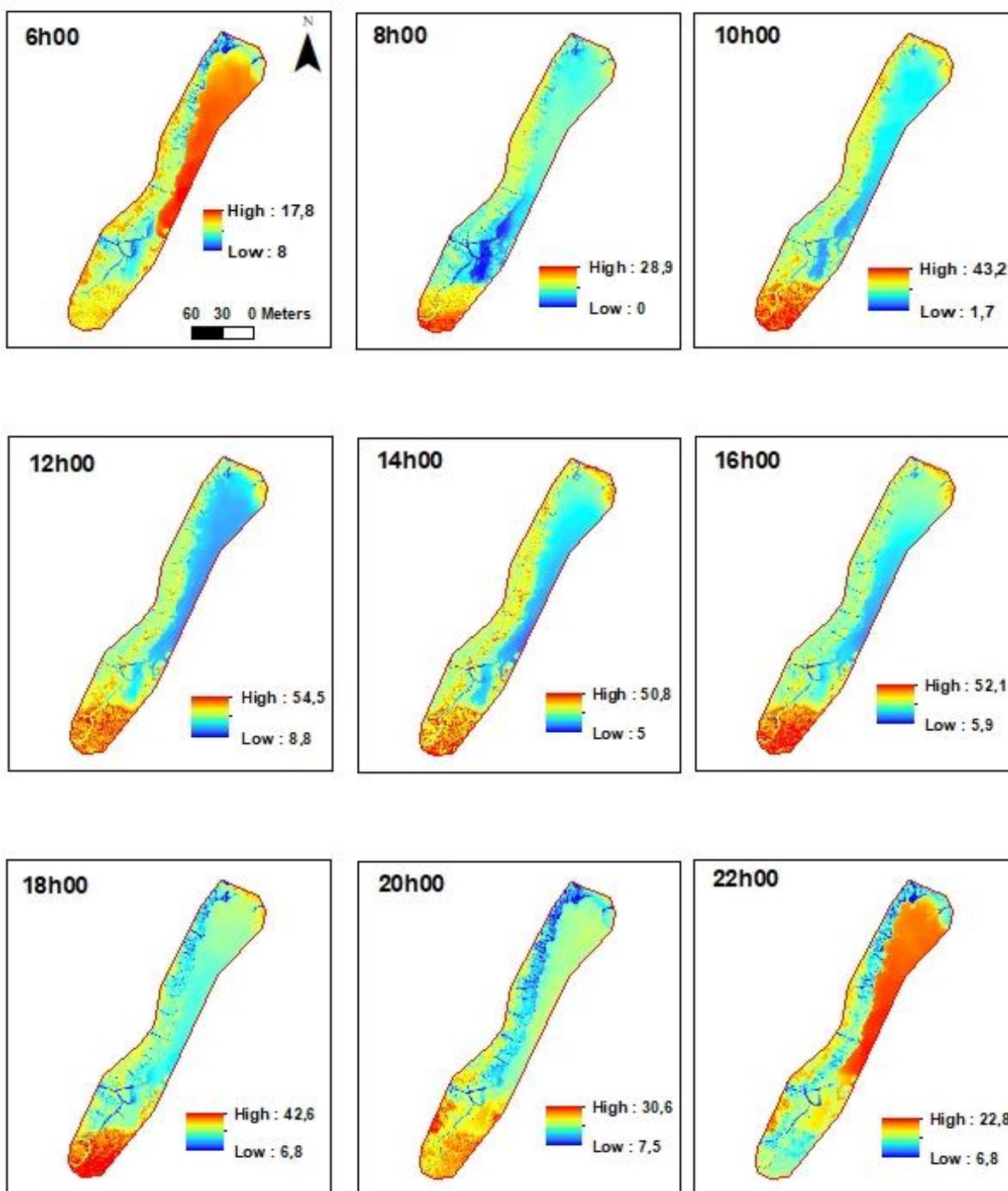


Figure 4.18: Valeurs de LST calculées pour les vols à intervalles réguliers du 17 juin 2020

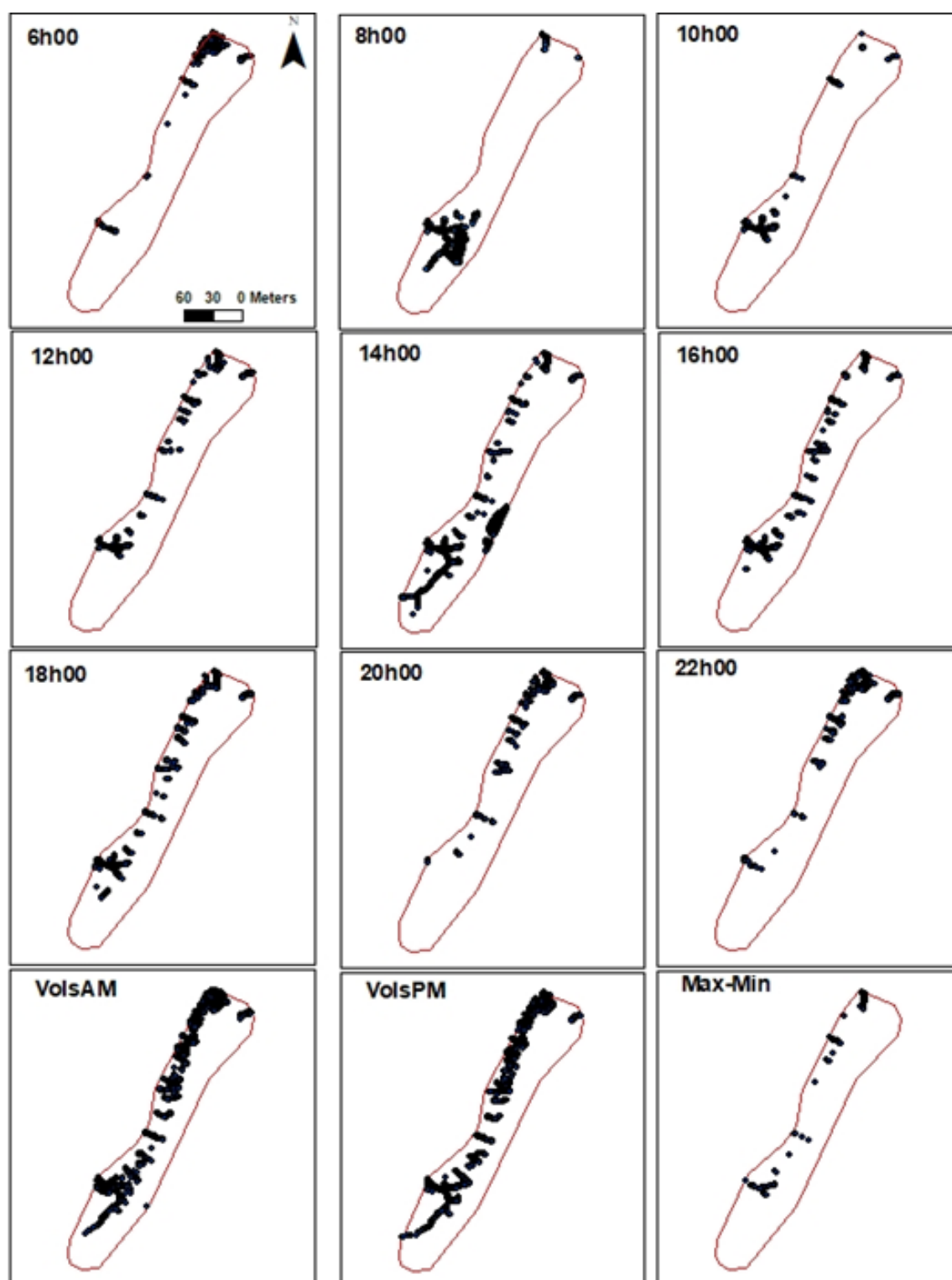


Figure 4.19: Points associés à des anomalies froides lors des calculs par *Grouping Analysis* pour les données du 17 juin 2020

4.2.2 Variations thermiques spatiotemporelles à la gravière de Malartic

Les données acquises au niveau du site d'extraction de sable et gravier de Malartic sont présentées à la figure 4.20. Ces données permettent de suivre les variations spatiotemporelles de LST au niveau d'une zone ciblée du site d'extraction, pour le 20 juin 2020. En complément, la figure 4.21A présente le modèle d'élévation construit à partir des données optiques acquises dans le cadre de la présente étude. Le modèle d'élévation précité montre des variations topographiques qui sont intéressantes à l'évaluation de l'influence de la position de la nappe sur les températures des sols inorganiques affleurants. L'image révèle une zone d'excavation plus profonde près du centre de la zone étudiée, bordée à l'est, au sud et à l'ouest par des reliefs plus élevés définissant des plateaux à différentes élévations. La zone retenue pour l'acquisition des données se trouve à proximité immédiate de puits d'observations faisant l'objet d'un suivi par le GRES-UQAT. Les données mesurées dans ces puits révèlent que la nappe d'eau souterraine est quasi affleurante dans les portions les plus profondes de l'excavation. Cette condition a été confirmée lors de l'acquisition des données terrain, notamment grâce à l'identification d'une exfiltration ponctuelle d'eau souterraine s'écoulant à la base de la zone excavée (figure 4.21B).

Les données de LST présentent une distribution spatiale qui semble cohérente avec la topographie locale, la zone plus profonde étant systématiquement caractérisée par des températures plus froides et moins variables que les sols périphériques, pour l'ensemble des données acquises à intervalles réguliers entre 6h00 et 22h00. Cette observation est selon toute vraisemblance attribuable au tamponnage thermique induit par la présence de la nappe d'eau souterraine (de température avoisinant 6°C) immédiatement sous la surface du sol dans la zone correspondant au fond de la gravière. Les données de LST montrent des variations thermiques journalières nettement plus marquées pour les zones plus élevées, de part et d'autre du centre de l'image. Les données journalières illustrent de surcroît l'effet de l'angle du soleil, les parois situées du côté ouest étant plus chaudes avant midi (en raison des rayons solaires provenant du côté est) et les parois situées du côté est étant plus chaudes après 16h00 (en raison des rayons solaires provenant du côté ouest). Les valeurs de LST rapportées sur l'image acquise à 14h00 semblent pour leurs parts plus homogènes au niveau des parois est et ouest de l'excavation, vraisemblablement en raison du rayonnement solaire provenant du zénith vers le milieu de la journée. Ces constats révèlent que le choix du moment de la journée pour l'évaluation des LST au sein des sites d'extraction de sable et de gravier s'avère critique.

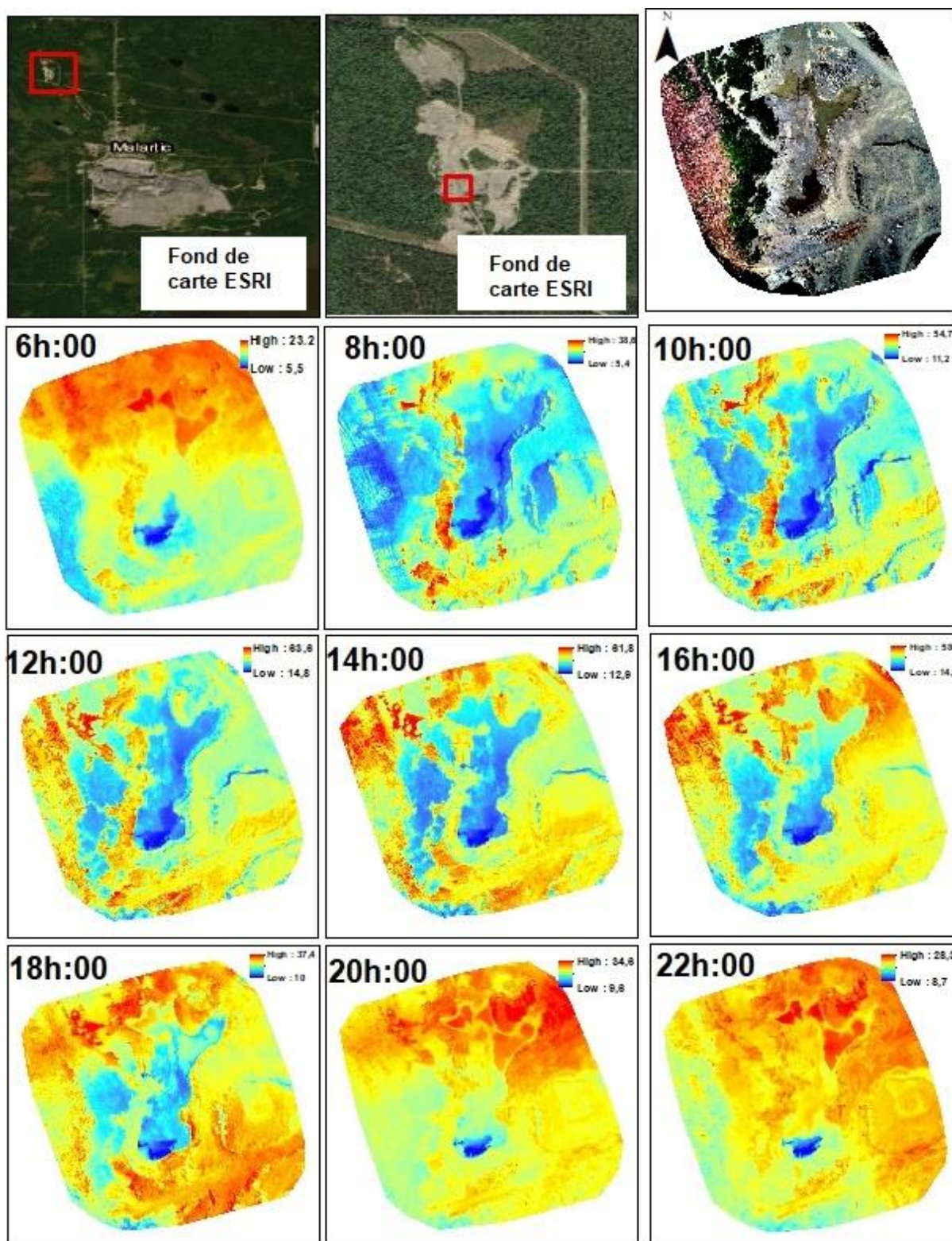


Figure 4.20: Orthomosaïques thermiques des vols réalisés sur un site de la SG Malartic pour le 20 juin 2020

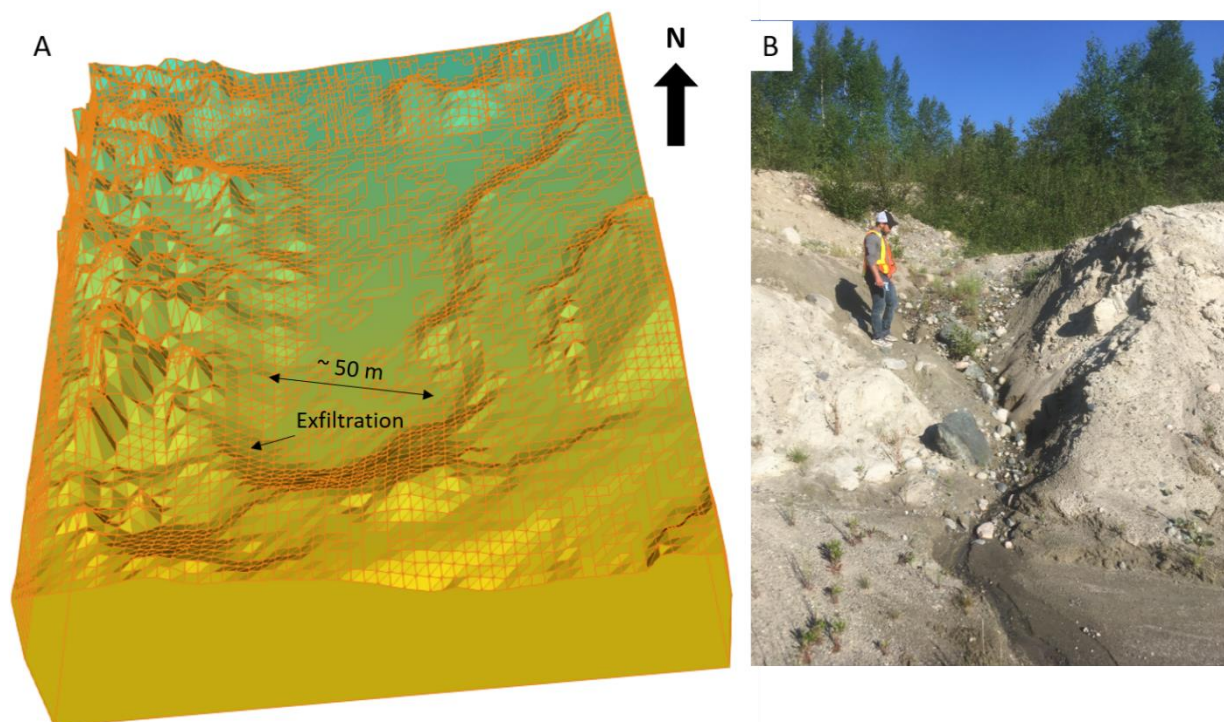


Figure 4.21: Illustration de la topographie de la zone étudiée : A) Modèle d'élévation construit à partir des données terrain, et B) Crevasse résultant de la présence d'une exfiltration d'eau souterraine près de la base de l'excavation

4.3 Modélisation numérique

4.3.1 Scénarios théoriques

La température du sol dépend de plusieurs paramètres qui interagissent pour équilibrer le bilan énergétique à la surface. Dans le cadre de ce projet, une analyse théorique a d'abord été réalisée afin de tester l'influence (1) de la profondeur de la nappe d'eau souterraine, (2) de la température de l'air, (3) la hauteur de végétation et (4) de la vitesse du vent sur le comportement thermique à la surface d'un sol similaire à celui de l'esker (tableau 4.1; figure 4.22). Pour l'ensemble des modèles, une condition limite de surface est définie par la condition « *Surface energy balance* » de *TEMP/W* et une condition limite de température (6 °C) constante est imposée et associée à la charge hydraulique totale de chaque scénario. Les scénarios testés représentent des situations hypothétiques et ciblent l'évaluation de l'influence de différents paramètres sur la simulation des

températures du sol. Les informations complémentaires relatives à la conception du modèle *SEEP/W – TEMP/W* et aux propriétés des matériaux sont rapportées à la section 4.3.

Tableau 4.1: Paramètres associés aux différents scénarios modélisés. Z nappe : profondeur de la nappe d’eau souterraine sous la surface du sol; RS : radiation solaire estimée par TEMP/W pour un point de coordonnées géographiques correspondant à la zone d’étude, à une date connue; TA : température de l’air; VV : vitesse du vent; HV : hauteur de la végétation au-dessus du sol; HR : humidité relative de l’air; EN : épaisseur de la neige au sol.

Scénarios	Z nappe (m)	Composantes du bilan énergétique de surface						
		RS	TA (°C)	VV (m/s)	HV (m)	HR (%)	Albedo	EN (m)
Influence de la profondeur de la nappe	0 à 8 m	7 août 2019	20 °C	2	0	80	0,5	0
Influence de la température de l'air	1 m	7 août 2019	-10 à 40	2	0	80	0,5	0
Influence de la vitesse du vent	1 m	7 août 2019	20 °C	0 à 6	0	80	0,5	0
Influence de la longueur de la végétation	1 m	7 août 2019	20 °C	2	0 à 1	80	0,5	0

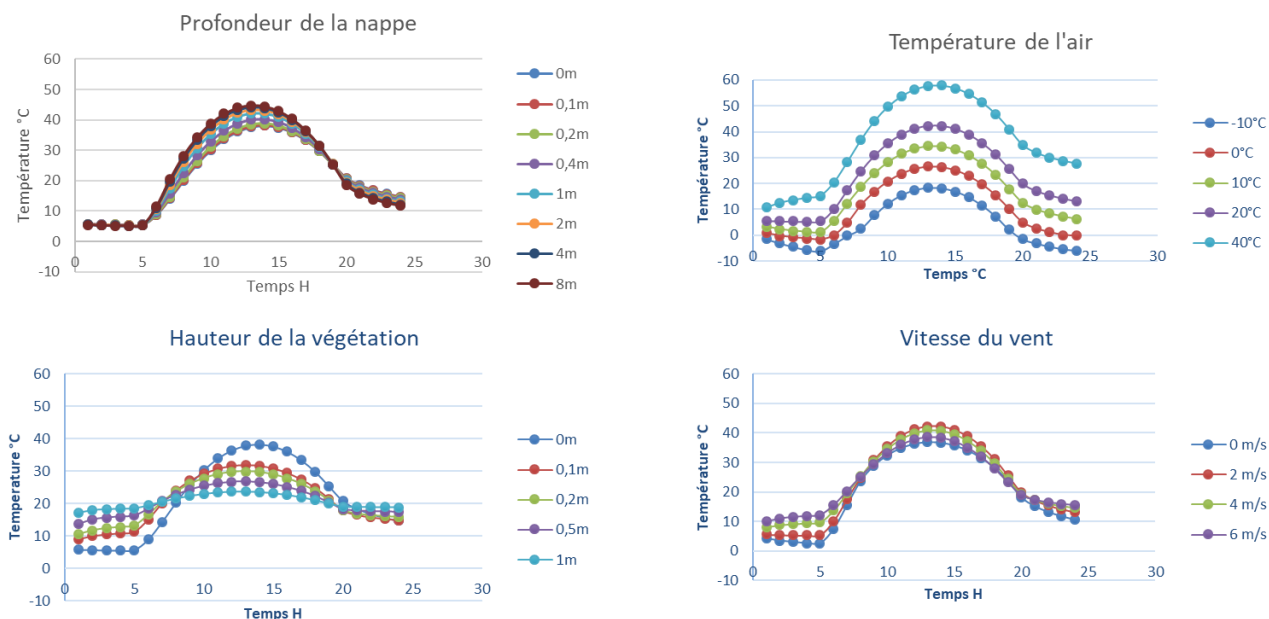


Figure 4.22: Modélisation de l'influence de différents paramètres du bilan énergétique de surface sur les températures de surface d'un sol représentatif d'un esker (Voir tableau 4.2 pour les valeurs des paramètres de SEB)

En absence de recharge et avec un transfert de chaleur par convection de l'eau, les simulations suggèrent que la profondeur de la nappe (à température constante de 6°C) induit une influence sur les températures de surface. De façon générale, une nappe d'eau souterraine moins profonde engendre des températures de surface moins élevées durant la journée et des variations journalières de température moins marquées. A partir de 1m, l'effet de la profondeur de la nappe sur la température de surface devient moins significatif et les courbes modélisées deviennent presque superposables. Pour une profondeur de la nappe de 1 m et une vitesse de vent de 2 m/s, la température de l'air engendre un effet marqué sur la variation de température de la surface. Les courbes modélisées demeurent relativement parallèles pour les différentes températures de l'air testées dans les scénarios. La longueur de la végétation affecte significativement les températures de surface modélisées. Les résultats suggèrent que plus la végétation est haute, plus les variations thermiques sont amorties. Les résultats des simulations suggèrent que le vent a pour effet de réduire les variations thermiques de la surface du sol.

4.3.2 Application de la modélisation à des sols inorganiques affleurants

Les scénarios théoriques préalablement discutés ayant révélé l'influence marquée de la végétation sur les températures du sol, il fut jugé optimal d'appliquer les simulations à des conditions de sol inorganique affleurant (sans végétation). Cette approche permet de limiter les variables d'influence dans la modélisation, et ainsi de mieux déceler l'influence de la position de la nappe d'eau souterraine sur les températures de surface des sols inorganiques. Les images thermiques à haute résolution acquises au site d'extraction de sable et gravier de Malartic ont donc été retenues pour le développement d'un modèle dans SEEP/W-TEMP/W. La figure 4.23 illustre trois points pour lesquels la profondeur de la nappe était connue (mesurée sur le terrain) et pour lesquels les variations thermiques journalières peuvent être extraites des images thermiques à haute résolution. Ainsi, trois modèles distincts ont été créés, pour une nappe à 0,05 m, 0,30 m et 5,00 m de profondeur.

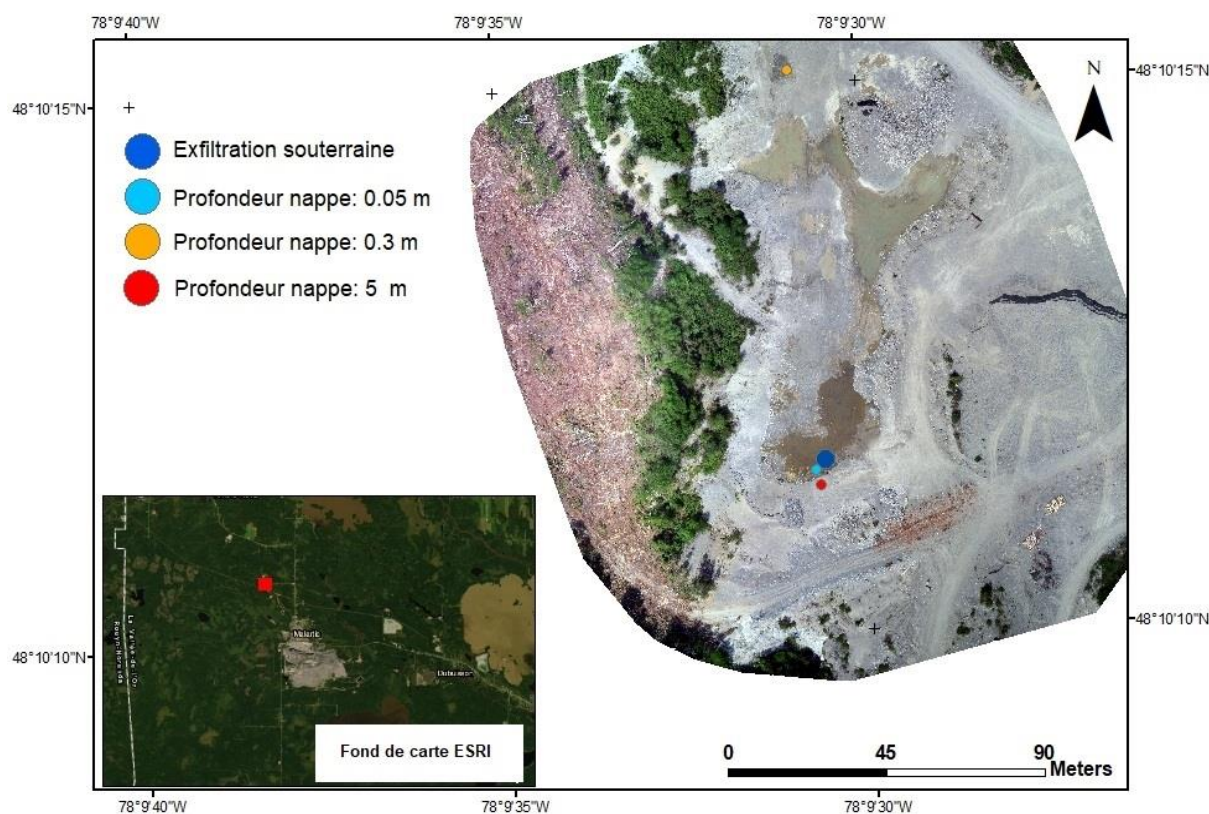


Figure 4.23: Localisation des points de mesure de température pour les différentes profondeurs de la nappe sur l'orthomosaïque du visible pour l'un des vols sur le site de Malartic

Pour chacun des modèles, les données climatologiques ont été téléchargées des archives de la station météorologique la plus proche (située à Val d'or, à une distance d'environ 40 km du site simulé). Les données météorologiques précitées sont rapportées à la figure 4.24. Pour chacun des modèles, la condition limite de surface correspondait à la *Surface energy balance* de TEMP/W. Une condition limite de charge et de température constantes étaient imposées pour la nappe d'eau souterraine.

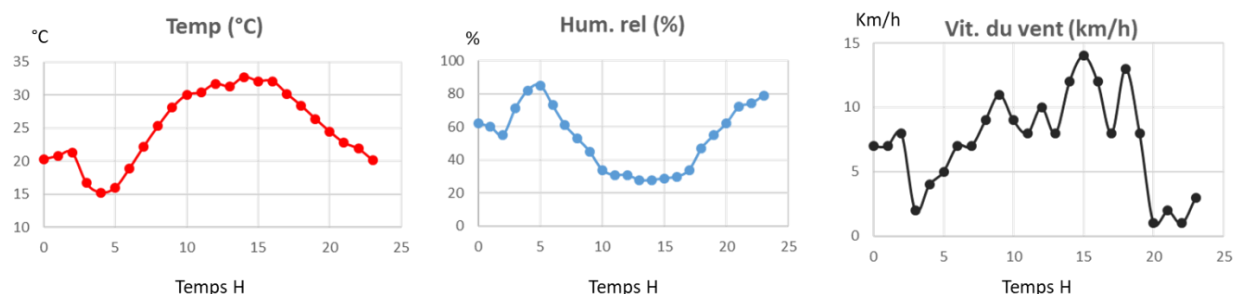


Figure 4.24: Représentations graphiques des conditions météorologiques du 20 juin 2020

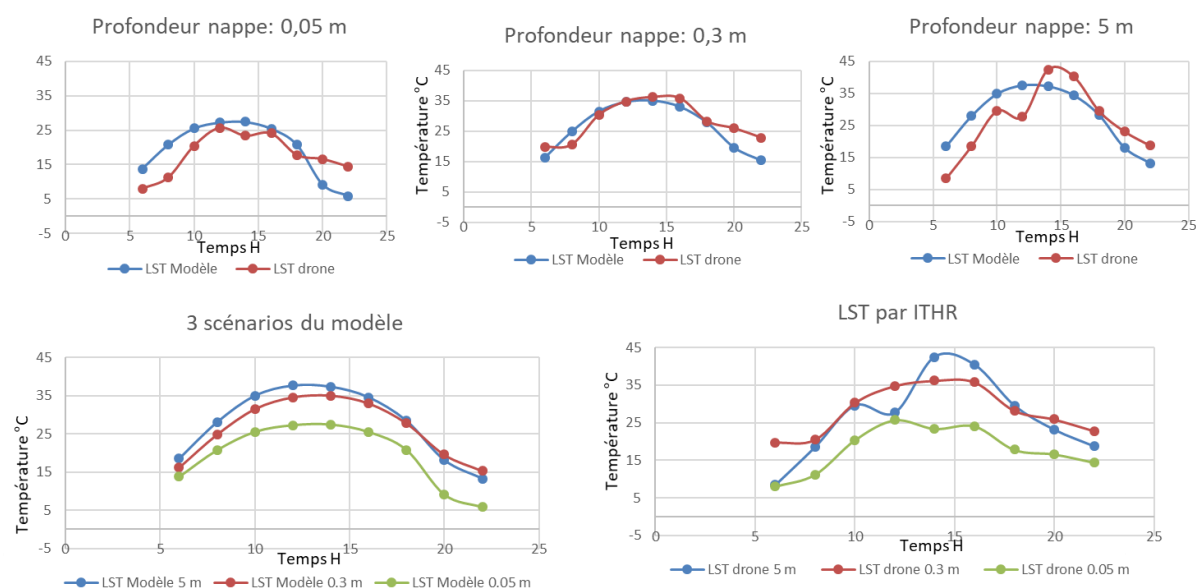


Figure 4.25: Comparaison des températures de sol mesurées et simulées pour trois scénarios (profondeur de la nappe à 0,05 m; 0,30 m et 5,00 m)

Les représentations graphiques de la variation de température selon les 3 scénarios (figure 4.25) semblent présenter des résultats cohérents, avec des températures plus froides et des variations thermiques journalières moins prononcées lorsque la nappe d'eau souterraine est moins profonde.

Les variations simulées et observées semblent être en phase, et significativement distinctes (en termes de valeurs absolues et de variations) pour les trois scénarios. En ce sens, il est jugé que la modélisation SEEP/W-TEMP/W fournit un outil mathématique permettant de lier la température de surface des sols inorganiques affleurants à la profondeur de la nappe d'eau souterraine. Ainsi, l'imagerie thermique à haute résolution pourrait représenter un outil pertinent pour l'estimation de la profondeur de la nappe d'eau souterraine au sein des sites d'extraction de sable et gravier.

La méthode pourrait aussi être utile pour d'autres sols inorganiques des formations fluvioglaciaires affleurent en surface (absence de couvert forestier et pédologique). C'est le cas notamment des zones associées aux berges de certains lacs de kettle. La cartographie thermique de telles zones pourrait contribuer à évaluer la présence de zones d'exfiltration d'eau souterraine en marge des lacs. La méthode pourrait aussi s'avérer efficace au niveau de secteurs ayant été utilisés pour la création de dépôts en tranchée (lieux d'élimination de matières résiduelles fréquemment observés sur les eskers d'Abitibi-Témiscamingue; Cloutier et al., 2016). Ces zones présentent souvent des sols inorganiques affleurants au sein de secteurs déboisés. Pour ce qui est des zones boisées des formations fluvioglaciaires, il paraît juste de proposer que des calculs de TVDI, lesquels sont fonction de la température de la canopée, s'avèrent plus propices à l'évaluation indirecte de la position de la nappe d'eau souterraine. Une comparaison des valeurs simulées par TEMP/W vs mesurées s'avère impossible pour de telles zones car le logiciel permet de simuler la température de la surface du sol, alors que les données de télédétection thermique mesurent la température de la canopée. Il serait pertinent que des études ultérieures soient réalisées afin de modéliser un tel système.

4.4 Synthèse

La figure 4.26 présente un sommaire de certaines avancées (en vert) et limites (en rouge) associées aux travaux réalisés dans le cadre de la présente étude. La télédétection thermique satellitaire a permis une investigation à l'échelle régionale de la LST et de la TVDI des formations fluvioglaciaires. Ces données, lorsque couplées à des calculs par GA, permettent de délimiter des zones susceptibles d'être spatialement associées à des exfiltrations d'eau souterraine (figure 4.26B). En ce sens, l'imagerie satellitaire présente un fort potentiel pour l'étude des zones d'exfiltration d'eau souterraine dans les secteurs difficiles d'accès, comme c'est le cas notamment dans le nord du Québec et du Canada. La cartographie des TVDI à l'échelle des formations fluvioglaciaires de vastes territoires du nord du Québec et du Canada pourrait représenter un outil pertinent à l'étude de l'hydrogéologie nordique. Néanmoins, il serait souhaitable de mieux définir le lien existant entre les valeurs de TVDI et la profondeur de la nappe d'eau souterraine. Les données de TVDI fournissent une indication relative à l'humidité du sol, laquelle influence le stress hydrique subi par la végétation ([Serge, 2015](#)). Bien que la profondeur de la nappe puisse avoir une influence significative sur ce paramètre, d'autres facteurs tels l'intensité des précipitations, la température de l'air, la granulométrie et la pente du sol peuvent aussi influencer la teneur en eau dans la zone non saturée, et donc le stress hydrique. En ce sens, malgré les résultats encourageants acquis dans le cadre de la présente étude, l'évaluation quantitative du lien entre la profondeur de la nappe et le stress hydrique de la végétation des formations fluvioglaciaires reste à établir. Les données de LST acquises par satellite n'ont pas permis d'estimer la position de la nappe d'eau souterraine sous la surface du sol au sein des sites d'extraction de sable et de gravier (figure 4.26A). Ces zones, caractérisées par l'absence de couverts forestier et pédologique, présentent pourtant un contexte qui semble optimal pour l'identification de gradients thermiques en raison du sol inorganique affleurant. Différentes sources d'erreur pourraient expliquer les limites rencontrées dans le cadre de l'étude. D'une part, les gravières présentent une topographie fortement accidentée, avec de nombreuses parois présentant diverses orientations et inclinaisons. Il est donc possible que les images de LST acquises avec un maillage de 30 m (comme ce fut le cas ici) s'avèrent trop peu précises en termes de résolution spatiale pour évaluer adéquatement la LST de ces secteurs. D'autre part, les estimations régionales de la profondeur de la nappe disponibles à ce jour ne prennent pas en compte la topographie fine des sites d'extraction de sable et de gravier. En ce sens, les données de profondeur de nappe utilisées pour établir des corrélations avec les LST mesurées par satellites

pourraient souffrir d'une trop grande imprécision pour que la comparaison ne soit possible. Dans la perspective de palier au problème, il serait souhaitable que des études ultérieures ciblent un nombre statistiquement représentatif de gravières où la profondeur de nappe est connue afin d'évaluer les LST par approche satellitaire. Dans le cadre de la présente étude, les données de LST satellitaires n'ont pas été utilisées pour une analyse détaillée des températures des eaux de surface à l'échelle régionale (figure 4.26C). Il s'agit toutefois d'une approche qui présente un fort potentiel, comme en témoignent certaines études antérieures ([Barron et Niel, 2009](#); [Wilson et Rocha, 2012](#); [McCaul *et al.*, 2016](#)).

Les données thermiques et optiques à haute résolution acquises par drone se sont avérées optimales pour la cartographie thermique des zones d'extraction de sable et de gravier (figure 4.26A). La résolution des images acquises par drone est suffisante pour caractériser la surface accidentée des gravières. Le couplage des approches de cartographie thermique avec des simulations numériques permet une explication mathématique de l'influence de la position de la nappe sur la température de surface du sol. Les données optiques de haute résolution permettent de surcroît la production de modèles d'élévation numériques précis. En ce sens, l'imagerie par drone pourrait constituer un outil pertinent pour l'évaluation et le suivi des volumes de matériel extrait au sein des sites d'extraction. Dans le cadre de la présente étude, les données ont été acquises lors d'une journée chaude du mois de juin 2020. Dans un tel contexte, l'eau souterraine engendrait des anomalies thermiques froides à la surface du sol. Lors de futures études, il serait souhaitable de refaire l'expérience lorsque la température de l'air est inférieure à la température de l'eau souterraine. Cela permettrait d'évaluer si des anomalies thermiques chaudes peuvent être engendrées par l'eau souterraine. Les images acquises par drone se sont également avérées optimales pour la délimitation de zones d'exfiltration d'eau souterraine vers les eaux de surface (figure 4.26B). Pour une telle analyse, l'approche de classification par GA s'avère utile afin de limiter la subjectivité associée à l'inspection visuelle des images. Les tests réalisés dans le cadre de la présente étude ont révélé l'utilité de réaliser des vols à différents moments de la journée. Cette approche permet d'inclure deux critères pour l'identification des zones d'exfiltration d'eau souterraine, soit les températures absolues et l'ampleur des variations thermiques journalières. Les données acquises en août 2019 et juin 2020 ont toutefois montré des différences non négligeables. Cela pourrait selon toute vraisemblance refléter des changements dans la configuration et l'intensité des écoulements au sein des zones d'exfiltration, en réponse aux variations temporelles

des charges hydrauliques dans l'esker. En ce sens, les interprétations de données de LST appuyées uniquement sur des valeurs instantanées (ponctuelles dans le temps) pourrait comporter un biais significatif. Il semble donc souhaitable, tant pour l'utilisation d'images satellitaires que pour l'utilisation d'images acquises par drone, d'inclure à la fois une analyse des variations journalières et saisonnières des LST et des conditions hydrogéologiques. Finalement, les données thermiques à haute résolution acquises au niveau de secteurs boisés ont montré que la température de la végétation varie significativement à l'échelle journalière. En ce sens, la comparaison d'images thermiques devrait systématiquement prendre en compte l'effet induit par l'heure à laquelle les images ont été acquises.

De manière générale, l'interprétation visuelle des images de LST et de TVDI peut s'avérer complexe, notamment en raison de la vaste gamme de couleurs requises pour illustrer les gradients thermiques à l'échelle régionale. En ce sens, des interprétation qualitatives des images (seulement appuyées sur des inspections visuelles) pourrait limiter significativement les possibilités d'intercomparaisons entre différentes études. Dans un tel contexte, l'approche de classification par *Grouping Analysis* constitue un outil pertinent pour permettre de réduire la subjectivité associée à l'interprétation des images. L'application des méthodes de télédétection en hydrogéologie s'avérant relativement peu explorée à ce jour, il semble intéressant de proposer que des approche statistiques de classification des données spatialisées devront être développées en vue de permettre l'établissement de protocoles standardisés pour la cartographie thermique applicable aux besoins en hydrogéologie. Dans un tel contexte, la classification par *Grouping Analysis* présente un potentiel intéressant.

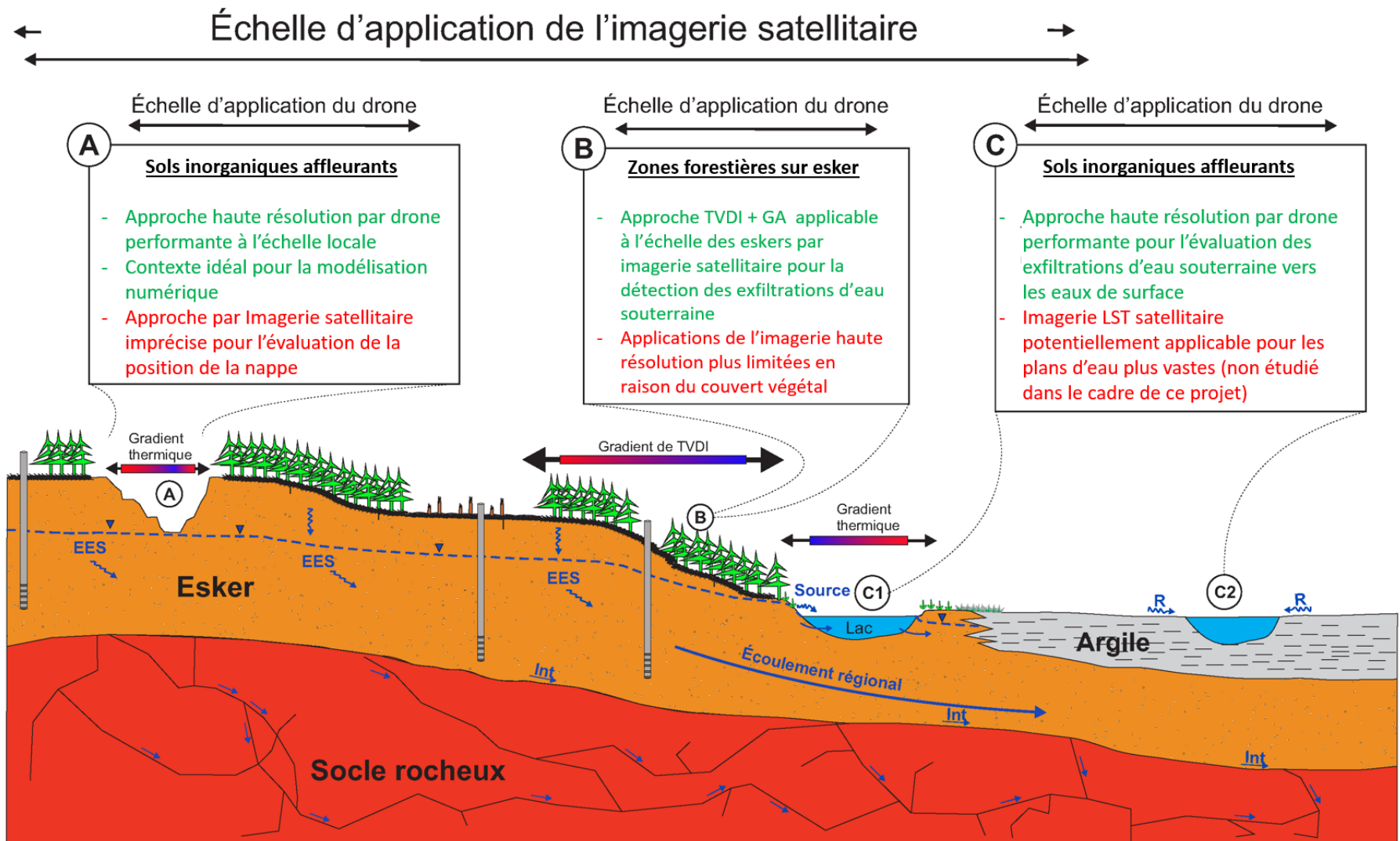


Figure 4.26: Sommaire des avancés et limites associées aux travaux réalisés

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce projet ouvre de nouvelles perspectives pour l'utilisation de la télédétection thermique multi-échelle dans le contexte de l'étude de l'hydrogéologie des eskers en région boréale. Les approches développées permettent le passage entre la télédétection thermique satellitaire, applicable à l'échelle régionale, et la télédétection thermique à haute résolution, applicable à l'échelle locale. Le calcul de LST et de TVDI issus de données satellitaires et leur traitement géostatistique par *Grouping Analysis* ont permis de mettre en lumière le potentiel de la télédétection pour la cartographie régionale des zones d'exfiltration d'eau souterraine en marge des formations fluvioglaciaires. La classification adoptée est calculée dans *ArcGIS* et s'appuie sur un algorithme *F-statistic* qui génère automatiquement des rapports permettant de définir des groupes de données partageant des similitudes thermiques et spatiales tout en réduisant la subjectivité associée à l'inspection visuelle des images. Ici, le groupe de données présentant des valeurs de TVDI comprises entre 0,23 et 0,315 s'avérerait spatialement corrélées avec des zones d'exfiltration d'eau souterraines identifiées lors d'études antérieures. Le territoire couvert par ce groupe de données représente une surface de 220 km², soit 12% de la surface couverte par les eskers et moraines (incluant une zone tampon de 500 m pour couvrir les marges). En ce sens, la télédétection fournit un outil permettant d'identifier des secteurs prioritaires pour la recherche de zones d'exfiltration d'eau souterraine par inspections de terrain (*in situ*).

Les démarches effectuées dans le cadre de l'étude ont révélé que la réalisation des missions de terrain ciblant l'acquisition d'images thermiques à haute résolution demande plus de ressources et du temps. Néanmoins, les mesures de terrain offrent plus de flexibilité concernant l'horaire d'acquisition des données. L'approche de terrain par drone a notamment permis le suivi des variations journalières de LST au niveau d'une zone d'exfiltration d'eau souterraine et d'un site d'extraction de sable et gravier. Les mesures réalisées à intervalles réguliers de 2h00 entre 6h00 AM et 22h00 ont montré que la télédétection permet d'identifier des zones où les températures de surface sont plus froides et plus stables. Selon le contexte, ces zones correspondent à des exfiltrations d'eau souterraine ou à des endroits où la nappe d'eau souterraine est très proche de la surface.

La modélisation combinée hydrogéologique/thermique 1D réalisée dans *TEMP/W* et *SEEP/W* constitue un outil permettant de mieux comprendre le comportement thermique des sols des eskers et moraines. Les caractéristiques hydrogéologiques et thermiques du modèle ont été choisies pour représenter la réalité d'un sol meuble similaire à celui de l'esker, au niveau d'une zone d'extraction de sable et de gravier. Les résultats des simulations se sont avérés cohérents avec les données de LST mesurées par drone et ont révélé que la profondeur de la nappe phréatique peut affecter significativement la température de surface des sols de l'esker. En période estivale, la température du sol diminue avec la diminution de la profondeur de la nappe phréatique. Les simulations ont aussi révélé (1) que la température de l'air affecte significativement la LST, (2) que la hauteur de végétation diminue la température de surface pendant le jour et (3) que le vent a pour effet de diminuer la température de surface lorsqu'il souffle à forte vitesse pendant le jour.

Dans le cadre d'études ultérieures, afin d'optimiser l'acquisition d'images par drone et de faciliter la comparaison entre les études, il sera essentiel de quantifier précisément l'effet des conditions météorologiques sur les données de LST mesurées. L'utilisation d'une station météorologique mobile collectant des données locales lors des vols serait pertinente. Les travaux réalisés ici permettent de conclure que l'acquisition d'images par drone présente un fort potentiel pour la réalisation d'études hydrogéologiques en raison (1) de la simplicité de leur utilisation, (2) de la personnalisation possible dans la programmation des missions, (3) de la haute résolution spatiale et (4) de la portabilité du matériel. Les logiciels SIG adoptent de plus en plus d'algorithmes d'apprentissage automatique (*Machine Learning*) qui devraient permettre des avancées marquées dans le traitement des images dans un avenir proche. De tels algorithmes devraient offrir une panoplie d'outils pour une meilleure exploitation des données thermiques et des phénomènes étudiés. La modélisation 1D adoptée dans le cadre de ce projet devra ultimement être utilisée pour le développement de modèles 2D ou 3D pour visualiser le comportement thermique et hydrogéologique selon des géométries plus représentatives des conditions terrain.

RÉFÉRENCES

- Abrams. M., Tsu. H., Hulley. G., Iwao. K., Pieri. D., Cudahy. T. et Kargel. J. (2015). The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) after fifteen years: Review of global products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 38 (2015) 292–301, P(292-301).
- Ala-aho P., Rossi P.M., Isokangas E, et Kløve B. (2015). Fully integrated surface–subsurface flow modelling of groundwater–lake interaction in an esker aquifer: Model verification with stable isotopes and airborne thermal imaging. *Journal of Hydrology* 522 (2015) 391–406.
- Alexander. B., Lawrence. S.B. et David. C.R. (1989). MODTRAN a moderate resolution model for LOWTRAN 7 GL-TR-89-C122 AD-A214 337. Rapport final préparé pour Geophysics laboratory/OPE, USA.
- Alipour. T., Sarajian. M.R. et Esmaeily. A. (2003). Land surface temperature estimation from thermal band of Landsat sensor, case study: ALASHTAR city. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Vol. XXXVIII-4/C7.
- Aller .L, Bennett .T, Lehr .J, Petty .R et Hackett .G. (1987). DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. environmental protection agency report 600/2-87/035, p 622.
- Arango. R.B., Campos. A.M., Combarro. E.F., Canas. E.R. et Díaz. I. (2017). Identification of Agricultural Management Zones Through Clustering Algorithms with Thermal and Multispectral Satellite Imagery. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems* Vol. 25, Suppl. 1 (December 2017) 121–140.
- Aubry-Wake. C., Baraer. M., McKenzie. J.M., Mark. B.G., Wigmore. O., Hellström. R., Lautz. L. et Somers. L. (2015). Measuring glacier surface temperatures with ground-based thermal infrared imaging. *Geophysical Research Letters* 42, 8489–8497.

- Azpurua. M. et Dos Ramos K. (2010). A comparaison of spatial interpolation methods for estimation of average electromagnetic field magnitude. Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 14, 135 -145.
- Baillanrgeon. S. (2005). Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de donnees de précipitations. Mémoire de maitrise FES/ Université Laval.
- Barron. O. et Niel T.G.V. (2009). Application of thermal remote sensing to delineate groundwater discharge zones. International Journal of Water Vol. 5, No. 2, 2009.
- Becker. F. (2007). The impact of spectral emissivity on the measurement of land surface temperature from a satellite. International Journal of Remote Sensing 8:10, 1509-1522.
- Bertrand G., Goldscheider, N., Gobat, J.-M. et Hunkeler, D. (2011). Review: From multi-scale conceptualization to a classification system for inland groundwater-dependent ecosystems. Hydrogeology Journal, 20(1), 5-25. doi: 10.1007/s10040-011-0791-5.
- Bezdek. J.C. (1981). Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. Livre publié à Utah State University Logan, Utah.
- Bezdek. J.C., Ehrlich R. et Full. W. (1984). FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm. Computers & Geosciences Vol. 10, No. 2-3, pp. 191-203, 1984.
- Blackett. M. (2014). Early Analysis of Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Imagery of Volcanic Activity. Remote Sensing, 6(3), 2282-2295. doi: 10.3390/rs6032282.
- Bojana. I., Yong-Gu. H. et Ohseok. K. (2017). Calculating coniferous tree coverage using unmanned aerial vehicle photogrammetry. Journal of Ecology and Environment, 41(1). doi: 10.1186/s41610-017-0029-0.
- Calinski. T. et Harabasz. J. (1974). A dendrite method for cluster analysis. Communications in Statistics - Theory and Methods, 3(1), 1-27. doi: 10.1080/03610927408827101.

- Cardenas. M.B., Doering. M., Rivas. D.S., Galdeano.C., Neilson. B.T. et Robinson. C.T. (2014). Analysis of the temperature dynamics of a proglacial river using time-lapse thermal imaging and energy balance modeling. *Journal of Hydrology* 519 (2014) 1963–1973.
- Cardenas. M.B., Harvey. J.W., Packman. A.I. et Scott. D.T. (2008). Ground-based thermography of fluvial systems at low and high discharge reveals potential complex thermal heterogeneity driven by flow variation and bioroughness. *Hydrological Processes* 22, 980–986 (2008).
- Champagne. R. (1988). Evaluation du potentiel aquicole de la région de l'Abitibi à partir des sources d'eau gravitaire emergeant des eskers. Rapport pour le ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec.
- Chan. H.P. et Chang. C.P. (2018). Exploring and monitoring geothermal and volcanic activity using Satellite Thermal Infrared data in TVG, Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* Vol. 29, No. 4, 387-404, August 2018.
- Chen. S., Zuomin. W., Hong. J., Qingjian. Z., Xiuying. Z. et Yan. C. (2015). Temperature Vegetation Dryness Index Estimation of Soil Moisture under Different Tree Species. *Sustainability*, 7(9), 11401-11417. doi: 10.3390/su70911401.
- Childs, C. (2004). ESRI Education Service: Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. *ArcUser* July–September 2004.
- Christie. K.S., Gilbert. S.L., Brown. C.L., Hatfield. M. et Hanson. L. (2016). Unmanned aircraft systems in wildlife research: current and future applications of a transformative technology. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2016; 14(5): 241–251.
- Cloutier V., Blanchette D., Dallaire P.-L., Nadeau S., Rosa E. et Roy M. (2013). Projet d'acquisition de connaissances sur leseaux souterraines de l'Abitibi-Témiscamingue (partie 1). Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs.
- Cloutier. V. , Rosa. E. , Roy. M. , Nadeau. S., Blanchette. D. , Dallaire. P. , Derrien. G. et Veillette. J. (2016). Atlas hydrogéologique de l'Abitibi-Témiscamingue.

- COMSOL. (2018). HeatTransferModule: User's Guide. Version: COMSOL 5.4. Récupéré de <https://www.comsol.com/>
- Cramer. M., Stallmann. D. et Haala. N. (2001). Direct Georeferencing Using GPS/Inertial Exterior Orientations for Photogrammetric Applications. IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam, 2000.
- Daponte. P., De Vito. L., Lamonaca. F., Picariello. F., Rapuano. S. et Riccio. M. (2017). Measurement Science and Education in the Drone Time. 978-1-5090-3596-0/17/\$31.00 ©2017 IEEE.
- Davis. G. (2011). History NOAA Satellites. NOAA Satellite and Information Service. 1335 East-West Highway, Silver Spring, Maryland, 20910, USA.
- Deitchman R.S. et Loheide S. P. (2009). Ground-based thermal imaging of groundwater flow processes at the seepage face. Geophysical Research Letters VOL. 36, L14401.
- Del Grande. N. K., Durbin. P. F., Gorvad. M. R., Perkins. D. E., Clark G. A., Hernandez. J. E. et Sherwood. R. J. (1993). Dual-band infrared capabilities for imaging buried-object sites. Underground and Obscured Object Imaging and Detection, Proc. SPIE 1942.
- Dunham. J., Chandler. G., Rieman. B. et Don. M. (2005). Measuring Stream Temperature with Digital Data Loggers: A User's Guide. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-150WWW. 2005.
- Esaias. W. E., Abbott. M.R., Barton. L., Brown. O.B., Campbell. J.W., Carder. K.L., Clark. D.K., Evans. R.H., Hoge. F.E., Gordon. H.R., Balch. W.M., Letelier. R. et Minnett. P.J. (1998). An Overview of MODIS Capabilities for Ocean Science Observations. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing VOL. 36, NO. 4, JULY 1998.
- ESRI. (2020). Vue d'ensemble du géoréférencement. Récupéré de <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/help/data/imagery/overview-of-georeferencing.htm#:~:text=Georeferencing%20raster%20data%20allows%20it,with%20your%20other%20geographic%20data.&text=Use%20the%20Georeference%20tab%20to,control%20points%20and%20the%20errors>

- Estoque. R.C., Murayama. Y. et Akiyam C.M. (2015). Pixel-based and object-based classifications using high- and medium-spatial-resolution imageries in the urban and suburban landscapes. *Geocarto International* VOL 30 NO 10 1113-1129.
- Eugenio. F. et Marques. F. (2003). Automatic satellite image georeferencing using a contour-matching approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* VOL. 41, NO. 12, 2869-2880.
- Failleau. G., Beaumont. O., Delepine-Lesoille. S., Plumeri. S., Razouk. R., Beck. Y. L., Hénault. J.M., Bertrand. J. et Hay. B. (2017). Development of facilities and methods for the metrological characterization of distributed temperature sensing systems based on optical fibres. *Measurement Science and Technology* 28 (2017) 015009 (12pp).
- Farnsworth. R.K., Barrett. J.E et Dhanju. F.M. (1984). Application of remote sensing to hydrology including ground water. *International Hydrological Programme United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization Unesco Paris, 1984.*
- Ferrara. C., Lega. M., Fusco. G., Bishop. P. et Endreny. T. (2017). Characterization of Terrestrial Discharges into Coastal Waters with Thermal Imagery from a Hierarchical Monitoring Program. *Water* 2017, 9, 500.
- Feyisa G.L., Meilby, H., Fensholt, R. et Proud, S.R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23-35. doi: 10.1016/j.rse.2013.08.029
- FLIR. (2011). Uncooled detectors for thermal imaging cameras. Technical note.
- GRES-UQAT et SESAT. (2013). Recherche sur les impacts de l'exploitation des ressources naturelles et des dépôts en tranchée sur l'eau souterraine des eskers et moraines de l'Abitibi-Témiscamingue. . Rapport de recherche P004.R2 présenté à la Conférence régionale des élus de l'AT, 109 pages + annexes numériques.
- Gupta. S.G., Ghonge. M.M. et Jawandhiya. P.M. (2013). Review of Unmanned Aircraft System (UAS). *International Journal of Advanced Research in*

Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume 2, Issue 4, April 2013.

- Handcock. R.N., Gillespie. A.R., Cherkauer. K.A., Kay. J.E., Burges. S.J. et Kampf. S.K. (2006). Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales. *Remote Sensing of Environment* 100 (2006) 427 – 440.
- Har. D.K., Briggs. M.A., Rosenberry. D.O., Boutt. D.F. et Lane. J.W. (2015). A comparison of thermal infrared to fiber-optic distributed temperature sensing for evaluation of groundwater discharge to surface water. *Journal of Hydrology* 530 (2015) 153–166.
- Harrison. G.J. (2013). Unmanned Aircraft Systems (UAS): Manufacturing Trends. Congressional Research Service 7-5700 www.crs.gov R42938.
- Harvey. M.C. et Luketina. K. (2014). Thermal infrared cameras and drones: A match made in heaven for cost effective geothermal exploration, monitoring and development. *Proceedings 37th New Zealand Geothermal Workshop* 18 – 20 November 2015.
- Harvey. M.C., Rowland. J.V. et Luketina K.M. (2016). Drone with thermal infrared camera provides high resolution georeferenced imagery of the Waikite geothermal area, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* Vol 325 No 61-69.
- Hoffhine Wilsona. E. et Saderb. S.A. (2002). Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment* 385–396.
- Jennifer. E.K., Stephanie. K.K., Rebecca. N.H., Keith. A.C., Alan. R.G. et Stephen. J.B. (2005). Accuracy of lake and stream temperatures estimated from thermal infrared images.
- Jian-jun. B, Yuan. Y et Liping. D. (2017). Comparison between TVDI and CWSI for drought monitoring in the Guanzhong Plain, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(2), 389-397. doi: 10.1016/s2095-3119(15)61302-8.

- Jiménez-Muñoz. J.C. et Sobrino. J.A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* VOL. 108, NO. D22, 4688.
- Jiménez. C., Prigent. C., Catherinot. J., Rossow. W., Liang. P. et Moncet. J-L. (2012). A comparison of ISCCP land surface temperature with other satellite and in situ observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* VOL. 117, D08111.
- Johnson. A.G., Glenn. C.R., Burnett. W.C., Peterson; R.N. et Lucey P. G. (2008). Aerial infrared imaging reveals large nutrient-rich groundwater inputs to the ocean. *Geophysical Research Letters* VOL. 35, L15606.
- Julien. Y., Sobrino. J.A., Mattar. C., Ruescas. A.B., Jiménez-Muñoz. J.C., Sòria. G., Hidalgo. V., Atitar. M., Franch. B. et Cuenca. J. (2011). Temporal analysis of normalized difference vegetation index (NDVI) and land surface temperature (LST) parameters to detect changes in the Iberian land cover between 1981 and 2001. *International Journal of Remote Sensing* Vol. 32, No. 7, 10 April 2011, 2057–2068.
- Jury. W. A. et Horton. R. (2004). *Soil physics*. Hoboken, NJ : Wiley, 2004.
- Kaplan. H. (2007). *Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment*, Third Edition Tutorial Texts in Optical Engineering, Spie Press Bellingham, Washington USA, Volume TT75.
- Kraus. K. (2007). *Photogrammetry : geometry from images and laser scans*.
- Larocque M., Cloutier V., Levison J. et Rosa E. (2018). Results from the Quebec Groundwater Knowledge Acquisition Program. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 43(2), 69-74. doi: 10.1080/07011784.2018.1472040.
- Lautz. L.K., Kranes N.T. et Siegel D.I. (2010). Heat tracing of heterogeneous hyporheic exchange adjacent to in-stream geomorphic features. *Hydrological Processes* 24, 3074–3086 (2010).
- Lee. E., Yoon. H., Hyun. S.P., Burnett. W.C., Koh. D-C., Ha. K., Kim. D-J., Kim. Y. et Kang. K-M. (2016). Unmanned aerial vehicles (UAVs)-based thermal infrared (TIR) mapping, a novel approach to assess groundwater discharge

into the coastal zone. *Limnology and Oceanography: Methods* 14, 2016, 725–735.

- Lelong. C.C., Burger. P., Jubelin. G., Roux. B., Labbe. S. et Baret. F. (2008). Assessment of Unmanned Aerial Vehicles Imagery for Quantitative Monitoring of Wheat Crop in Small Plots. *Sensors* 2008, 8, 3557-3585.
- Lewandowski. J., Meinikmann. K., Ruhtz. T., Pöschke. F. et Kirillin. G. (2013). Localization of lacustrine groundwater discharge (LGD) by airborne measurement of thermal infrared radiation. *Remote Sensing of Environment*, 138, 119-125. doi: 10.1016/j.rse.2013.07.005.
- Li. B., Wang. W., Bai. L., Chen. N. et Wang. W. (2019). Estimation of aboveground vegetation biomass based on Landsat-8 OLI satellite images in the Guanzhong Basin, China. *International Journal of Remote Sensing* 40:10, 3927-3947.
- Lisein. J., Bonnet. S., Lejeune. P. et Pierrot-Deseilligny. M. (2014). Modélisation de la canopée forestière par photogrammétrie depuis des images acquises par drone. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*. 45-54.
- Lowry. C.S., Walker. J.F., Hunt. R.J. et Anderson. M.P. (2007). Identifying spatial variability of groundwater discharge in a wetland stream using a distributed temperature sensor. *Water Resources Research* VOL. 43, W10408.
- Ma. R. et Zheng. C. (2010). Effects of density and viscosity in modeling heat as a groundwater tracer. *Ground Water*, 48(3), 380-389. doi: 10.1111/j.1745-6584.2009.00660.x Récupéré de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20546316>
- Macfarlane. P.A., Förster. A., Merriam. D.F., Schrötter. J. et Healey. J.M. (2002). Monitoring artificially stimulated fluid movement in the Cretaceous Dakota aquifer, western Kansas. *Hydrogeology Journal* (2002) 10:662–673.
- Mansfield. J.R., Sowa. M.G., Majzels. C., Cloutis. E. et Mantsch. H.H. (1998). Near infrared spectroscopic reflectance imaging: supervised vs. unsupervised analysis using an art conservation application. *Vibrational Spectroscopy* 19 (1999) . 33–45.

- Marçal. A.R.S., Borges; J.S., Gomes. J.A. et Pinto. D-C. J. F. (2007). Land cover update by supervised classification of segmented ASTER images. *International Journal of Remote Sensing* 26:7, 1347-1362.
- Massasati. A. S. (2002). Georeferencing Aerial Photography: Beginners Approach. *Journal of surveying engineering* / NOVEMBER 2002 / 159.
- McCaul. M., Barland. J., Cleary. J., Cahalane. C., McCarthy. T. et Diamond. D. (2016). Combining Remote Temperature Sensing with in-Situ Sensing to Track Marine/Freshwater Mixing Dynamics. *Sensors* 2016, 16, 1402.
- McFeeters S.K. (2007). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. doi: 10.1080/01431169608948714.
- Menzel. P.W. et James. F.W P. (1994). Introducing GOES-I: The First of a New Generation of Geostationary Operational Environmental Satellites. *Bulletin of the American Meteorological Society* Vol. 75, No. 5, May 1994.
- Mia. M.B., Fujimitsu. Y. et Nishijima. J. (2018). Monitoring thermal activity of the beppu geothermal area in Japan using multisource satellite thermal infrared data. *Geosciences (Switzerland)* Vol.8 No.8 Aug 17 2018. Scopus.
- Milton. I.N. et Ugur. A. (2016). Application of Open Source Coding Technologies in the Production of Land Surface Temperature (LST) Maps from Landsat: A PyQGIS Plugin. *Remote Sensing*, 8(5). doi: 10.3390/rs8050413.
- Mitas. L. et Mitsova. H. (2005). Spatial interpolation 481-492.
- Molson. J. et Frind. E.O. (2020). Density-dependant flow and advective-dispersive transport of thermal energy, mass or residence time in three-dimensional porous or fractured porous media.
- Mundy. E., Gleeson. T., Roberts. M., Baraer. M. et McKenzie. J. M. (2017). Thermal Imagery of Groundwater Seeps: Possibilities and Limitations. *Ground Water*, 55(2), 160-170. doi: 10.1111/gwat.12451 Récupéré de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27576019>.
- Nadeau. S., Rosa. E. et Cloutier. V. (2018). Stratigraphic sequence map for groundwater assessment and protection of unconsolidated aquifers: A case

example in the Abitibi-Témiscamingue region, Québec, Canada. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 43(2), 113-135. doi: 10.1080/07011784.2017.1354722.

Nadeau. S., Rosa. E., Cloutier. V., Daigneault. R.A. et Veillette. J. (2015). A GIS-based approach for supporting groundwater protection in eskers: Application to sand and gravel extraction activities in Abitibi-Témiscamingue, Quebec, Canada. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 535-549. doi: 10.1016/j.ejrh.2015.05.015.

Paaajmans. K.P., Takken. W., Githeko. A.K. et Jacobs. A.F. (2008). The effect of water turbidity on the near-surface water temperature of larval habitats of the malaria mosquito *Anopheles gambiae*. *Int J Biometeorol*, 52(8), 747-753. doi: 10.1007/s00484-008-0167-2
Récupéré de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18633650>.

Persson. T., Stavset. O., Ramstad. R.K., Justo Alonso. M. et Lorenz. K. (2016). Software for modelling and simulation of ground source heating and cooling systems. SINTEF Energy Research.

Pfeifer M., Boyle, M.J.W., Dunning, S. et Olivier, P.I. (2019). Forest floor temperature and greenness link significantly to canopy attributes in South Africa's fragmented coastal forests. *PeerJ*, 7, e6190. doi: 10.7717/peerj.6190
Récupéré de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30648017>.

Qin. Z., Karnieli. A. et Berliner. P. (2010). A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing* 22(18), 3719-3746. doi: 10.1080/0143116001000697.

Rai. M., Maity. T. et Yadav. R.K. (2017). Thermal imaging system and its real time applications: a survey. Volume 6, Issue 2, July, 2017, PP.290-303.

Rey. N., Rosa. E., Cloutier. V. et Lefebvre. R. (2018). Using water stable isotopes for tracing surface and groundwater flow systems in the Barlow-Ojibway Clay Belt, Quebec, Canada. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 43(2), 173-194. doi: 10.1080/07011784.2017.1403960.

- Rokni. K., Ahmad. A., Selamat. A. et Hazini. S. (2014). Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery. *Remote Sensing*, 6(5), 4173-4189. doi: 10.3390/rs6054173.
- Rosa E., Dallaire P.-L., Nadeau S., Cloutier V., Veillette, J., van Bellen, S. et Larocque, M. (2018). A graphical approach for documenting peatland hydrodiversity and orienting land management strategies. *Hydrological Processes*, 32(7), 873-890. doi: 10.1002/hyp.11457.
- Rossi. P.M, Ala-aho. P., Doherty. J. et Kløve. B. (2014). Impact of peatland drainage and restoration on esker groundwater resources: modeling future scenarios for management. *Hydrogeology Journal*, 22(5), 1131-1145. doi: 10.1007/s10040-014-1127-z.
- Rouse. J.W., Haas. R.H., Schell. J.A. et Deering. D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite- 1 Symposium*, 301–317.
- Salisbury J.W. et D'Aria D. M. (1992). Emissivity of terrestrial materials in the 8-14 μm atmospheric window. *Remote Sensing of Environment* Volume 42, Issue 2, Pages 83-106.
- Sandholt. I., Rasmussen. K. et Anderson. J. (2001). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 79.
- Serge. O. K. (2015). Estimation et évaluation d'incertitude d'indicateurs agrométéorologiques par télédétection en vue de supporter la lutte phytosanitaire. Université Laval.
- Shen. L. et Li. C. (2010). Water Body Extraction from Landsat ETM+ Imagery Using Adaboost Algorithm. *International Conference on Geoinformatics*.
- Siu-Ngan Lam. N. (2013). Spatial Interpolation Methods: A Review. *The American Cartographer* Vol. 10, No.2, 1983,p p. 129-149.
- Snyder. W.C., Wan. Z., Zhang. Y. et Feng. Y-Z. (1998). Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space, *International Journal of Remote Sensing*. *International Journal of Remote Sensing*, 19:14.

- Sosnowski. T., Bieszczad. G. et Madura. H. (2018). Image Processing in Thermal Cameras. Dans Military University of Technology, I. o. O., Warsaw, Poland (dir.), Advanced Technologies in Practical Applications for National Security.
- Sousa. D. et Small. C. (2019). Mapping and monitoring rice agriculture with multisensor Temporal Mixture Models. Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, NY 10964, USA. Remote Sensing 2019,11,181.
- Tarussov. A., Dubois. J.M.M. et Wenzl. M. (2007). Les systèmes légers de télédétection aéroportée pour les sciences de la Terre. International Journal of Remote Sensing 17:14, 2699-2718.
- Tavares. M., Cunha. A., Motta-Marques. D., Ruhoff. A., Cavalcanti. J., Fragoso. C., Martín. B.J., Munar. A., Fan. F. et Rodrigues. L. (2019). Comparison of Methods to Estimate Lake-Surface-Water Temperature Using Landsat 7 ETM+ and MODIS Imagery: Case Study of a Large Shallow Subtropical Lake in Southern Brazil. Water 2019, 11, 168.
- Thibaudeau. P. et Veillette. J.J. (2005). Géologie des formations en surface et histoire glaciaire, Lac Chicobi, Québec. Carte 1996A.
- Torgersena. C.E., Faux. R.N., McIntosh. B.A., Poageb. N.J. et Norton. D.J. (2000). Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. Remote Sensing of Environment 76 (2001) 386-398.
- Varma. S., Turner. J. et Unterschultz. J. (2010). Estimation of submarine groundwater discharge into Geographe Bay, Bunbury, Western Australia. Journal of Geochemical Exploration, 106(1-3), 197-210. doi: 10.1016/j.gexplo.2010.02.003.
- Veljanovski. T., Kanjir. U. et Oštir. K. (2011). Object-based image analysis of remote sensing data. Geodetski vestnik 55/4 (2011).
- Venkatramanan. S., Chung. S.Y., Rajesh; R., Lee. S.Y., Ramkumar; T. et Prasanna. M.V. (2015). Comprehensive studies of hydrogeochemical processes and quality status of groundwater with tools of cluster, grouping analysis, and fuzzy set method using GIS platform: a case study of Dalcheon in Ulsan City,

Korea. Environ Sci Pollut Res Int, 22(15), 11209-11223. doi: 10.1007/s11356-015-4290-4 Récupéré de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25779109>

- Vollmer M. et Möllmann K-P. (2018). Infrared Thermal Imaging: The Fundamentals of Thermal Imaging Systems, second edition. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Wawrzyniak. V. (2012). Etude multi-échelle de la température de surface des cours d'eau par imagerie infrarouge thermique : exemples dans le bassin du Rhône. Thèse de doctorat de Géographie et d'Aménagement, Université JEAN MOULIN, LYON 3.
- Wawrzyniak. V., Piégaya. H., Allemand. P., Vaudora. L. et Grandjean. P. (2013). Prediction of water temperature heterogeneity of braided rivers using very high resolution thermal infrared (TIR) images. *International Journal of Remote Sensing* Vol. 34, No. 13, 4812–4831.
- Webb. B.W., Hannah. D.M., Moore. R.D., Brown. L.E. et Nobilis. F. (2008). Recent advances in stream and river temperature research. *Hydrological processes*, 22, 902–918.
- Williams. D.L., Goward. S. et Arvidson. T. (2006). Landsat Yesterday, Today, and Tomorrow. *Potogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 72, No. 10, October 2006, pp. 1171–1178.
- Wilson. J. et Rocha. C. (2012). Regional scale assessment of Submarine Groundwater Discharge in Ireland combining medium resolution satellite imagery and geochemical tracing techniques. *Remote Sensing of Environment* 119 (2012) 21–34.
- Xiong. X.J., Sun. J., Esposito. J., Guenther. B. et Barnes. W. (2005). MODIS Reflective Solar Bands Calibration Algorithm and On-orbit Performance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 57, no. 9, pp. 6355-6371.
- Xu. H. (2007). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. doi: 10.1080/01431160600589179.

- Yu. X., Guo. X. et Wu. Z. (2014). Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 TIRS—Comparison between Radiative Transfer Equation-Based Method, Split Window Algorithm and Single Channel Method. *Remote Sensing*, 6(10), 9829-9852. doi: 10.3390/rs6109829.
- Yuhua. X., Jianliang. J., Hu. H., Xiaohu. Z. et Jon. M. (2016). Mosaicking of Unmanned Aerial Vehicle Imagery in the Absence of Camera Poses. *Remote Sensing*, 8(3). doi: 10.3390/rs8030204.

ANNEXES

Annexe A: Caractéristiques des satellites ayant des bandes thermiques

Annexe A.1 : Caractéristiques des bandes NOAA/AVHRR3 Lien NOAA

Caractéristiques des bandes AVHRR/3			
Numéro de la bande	Résolution au Nadir	Longueur d'onde (µm)	Utilisations typiques
1	1.09 km	0.58 - 0.68	Suivi des nuages et la cartographie de surface
2	1.09 km	0.725 - 1.00	Délimitation des eaux de surface
3A	1.09 km	1.58 - 1.64	Détection de la neige et de la glace
3B	1.09 km	3.55 - 3.93	Cartographie des nuages pendant la nuit et mesure de la température surfacique des mers
4	1.09 km	10.30 - 11.30	La cartographie des nuages pendant la nuit et la température surfacique des mers
5	1.09 km	11.50 - 12.50	Mesure de la température surfacique des mers

Annexe A.2: Les bandes du satellite goes-17 Lien GOES

Numéro de la bande	Longueur d'onde	Type de bande
1	0.47	"Blue" Band
2	0.64	"Red" Band
3	0.86	"Veggie" Band
4	1.37	"Cirrus" Band
5	1.6	"Snow/Ice" Band
6	2.2	"Cloud Particle Size" Band

7	3.9	"Shortwave Window" Band
8	6.2	"Upper-Level Tropospheric Water Vapor" Band
9	6.9	"Mid-Level Tropospheric Water Vapor" Band
10	7.3	"Lower-level Water Vapor" Band
11	8.4	"Cloud-Top Phase" Band
12	9.6	"Ozone Band"
13	10.3	"Clean" IR Longwave Window Band
14	11.2	IR Longwave Window Band
15	12.3	"Dirty" Longwave Window Band
16	13.3	"CO ₂ " longwave infrared

Annexe A.3: Caractéristiques techniques de l'imageur aster Lien ASTER

Résolution	VNIR 15 m
	SWIR 30 m
	TIR 90 m
Fauché	60 km
Bandes	VNIR Band 1 (Green): 520-600 nm
	VNIR Band 2 (Red): 630-690 nm
	VNIR Band 3 (NIR): 780-860 nm
	SWIR Band 4: 1.6-1.7 µm
	SWIR Band 5: 2.145-2.185 µm
	SWIR Band 6: 2.185-2.225 µm
	SWIR Band 7: 2.235-2.285 µm
	SWIR Band 8: 2.295-2.365 µm
	SWIR Band 9: 2.36-2.43 µm
	TIR Band 10: 8.125-8.475 µm
	TIR Band 11: 8.475-8.825 µm
	TIR Band 12: 8.925-9.275 µm
	TIR Band 13: 10.25-10.95 µm
	TIR Band 14: 10.95-11.65 µm

Archive	Possible depuis 1999
Stockage	8 bits VNIR & SWIR
	12 bits TIR

Annexe A.4: Caractéristiques techniques des bandes de l'imageur MODIS

Utilisation	Bande	Longueur des bandes	Radiance spectrale	SNR
Land/Cloud/Aerosols Boundaries	1	620 - 670	21.8	21.8
	2	841 - 876	24.7	24.7
Land/Cloud/Aerosols Properties	3	459 - 479	35.3	35.3
	4	545 - 565	29.0	29.0
	5	1230 - 1250	5.4	5.4
	6	1628 - 1652	7.3	7.3
	7	2105 - 2155	1.0	1.0
Ocean Color/PhytoPlanckton/Biogeochemistry	8	405 - 420	44.9	44.9
	9	438 - 448	41.9	41.9
	10	483 - 493	32.1	32.1
	11	526 - 536	27.9	27.9
	12	546 - 556	21.0	21.0
	13	662 - 672	9.5	9.5
	14	673 - 683	8.7	8.7
	15	743 - 753	10.2	10.2
Atmospheric Water Vapor	16	862 - 877	6.2	6.2
	17	890 - 920	10.0	10.0
	18	931 - 941	3.6	3.6
	19	915 - 965	15.0	15.0
				NE(Δ)T
Surface/Cloud Temperature	20	3.660 - 3.840	0.45(300K)	0.45(300K)
	21	3.929 - 3.989	2.38(335K)	2.38(335K)
	22	3.929 - 3.989	0.67(300K)	0.67(300K)
	23	4.020 - 4.080	0.79(300K)	0.79(300K)
Atmospheric Temperature	24	4.433 - 4.498	0.17(250K)	0.17(250K)
	25	4.482 - 4.549	0.59(275K)	0.59(275K)
Cirrus Clouds Water Vapor	26	1.360 - 1.390	6.00	6.00
	27	6.535 - 6.895	1.16(240K)	1.16(240K)
	28	7.175 - 7.475	2.18(250K)	2.18(250K)
Cloud Properties	29	8.400 - 8.700	9.58(300K)	9.58(300K)
Ozone	30	9.580 - 9.880	3.69(250K)	3.69(250K)
Surface/Cloud Temperature	31	10.780 - 11.280	9.55(300K)	9.55(300K)

	32	11.770 - 12.270	8.94(300K)	8.94(300K)
Cloud Top Altitude	33	13.185 - 13.485	4.52(260K)	4.52(260K)
	34	13.485 - 13.785	3.76(250K)	3.76(250K)
	35	13.785 - 14.085	3.11(240K)	3.11(240K)
	36	14.085 - 14.385	2.08(220K)	2.08(220K)

Notes:

Les bandes de 1 à 19 sont en nm; Les bandes 20 à 36 sont en μm

La radiance spectrale est en ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr}$)

SNR = Signal-to-noise ratio

$\text{NE}(\Delta)\text{T}$ = *Noise-equivalent temperature difference* est la quantité de température nécessaire pour compenser le bruit interne du capteur.

Annexe A.5: Les améliorations des capteurs du Landsat modifié (Williams et al., 2006)

Capteurs	Amélioration par rapport au capteur antécédent
Multispectral scanner MSS	4 bandes spectrales (Rouge, Vert, Bleu et Proche IR). Résolution spatiale de 80 m Scanner multi-spectrale au lieu d'une caméra
Thematic Mapper TM	Amélioration de la résolution à 30 m Ajout de 2 bandes proche IR Ajout d'une bande IRT de 120 m de résolution
Enhanced Thematic Mapper ETM	Ce capteur n'a jamais été mis en orbite
Enhanced Thematic Mapper Plus ETM+	Résolution IRT de 60 m Bande panchromatique de 15 m de résolution
OLI & TIRS	2 autres bandes IRT (100 m) au lieu d'une seule. Ajout d'une bande Cirrus pour la qualité des eaux et la détection des nuages.

Annexe B: Comparaison technique et économique du satellite NOAA avec des UAS ainsi que les caractéristiques des capteurs thermiques in situ et les données à archiver lors de l'utilisation des sondes thermiques.

Annexe B.1: Comparaison technique et économique entre NOAA et UAS pour le suivi des lions de mer de Steller en Alaska (Christie et al., 2016)

	<i>Manned aerial surveys</i>	<i>UAS surveys</i>
Purpose of surveys	Estimate the abundance of Steller sea lions in the inner Aleutians	Estimate the abundance of Steller sea lions in the outer Aleutians
Cost per day	\$4700 per day including fuel and pilot, or \$400 per site	\$3000 per day based on the cost of vessel support, or \$1700 per site
Type of aircraft	NOAA Twin Otter	APH-22 hexacopter
Distance/area surveyed	2500 km of coastline, including the Gulf of Alaska and part of Aleutians; 210 sites surveyed	400 km of coastline along the western Aleutian chain, 30 sites surveyed; maximum distance from the vessel was 634 m, longest flight was 16 minutes
% animals detected	100% of hauled-out animals	100% of hauled-out animals
Data collected	Quantitative imagery, animal counts	Quantitative imagery, animal counts, individual identification
Number of personnel	6	2
Observed effect on animal	Slight and variable, 5% of adults moved toward water	Very low to none, 0.3% of adults moved toward water
Advantages	(1) surveyed up to 50 sites per day (2) high-quality images (3) cost per site low	(1) surveyed remote sites with no airfields (2) extremely low disturbance (3) very high-quality images (flew at altitude of 45 m) (4) less subject to flight restrictions due to weather (5) biologists can double as pilots
Disadvantages	(1) requires good weather at primary and alternate airfields (minimum of 750-ft ceilings) (2) relatively noisy (3) may only fly on half (or less) of days available (4) requires a runway for takeoff/landing (5) imagery has lower resolution (flight altitude: 150–305 m) (6) requires flight crew of 3 plus 3 observers	(1) can survey only a few (1–3) sites per day (2) requires costly vessel for use as transport (3) cannot fly in high winds (wind speed must be less than 25 knots on the ground) (4) must stay within line-of-sight and 0.8 km of observer
Notes: Surveys were conducted by the National Oceanic and Atmospheric Administration.		

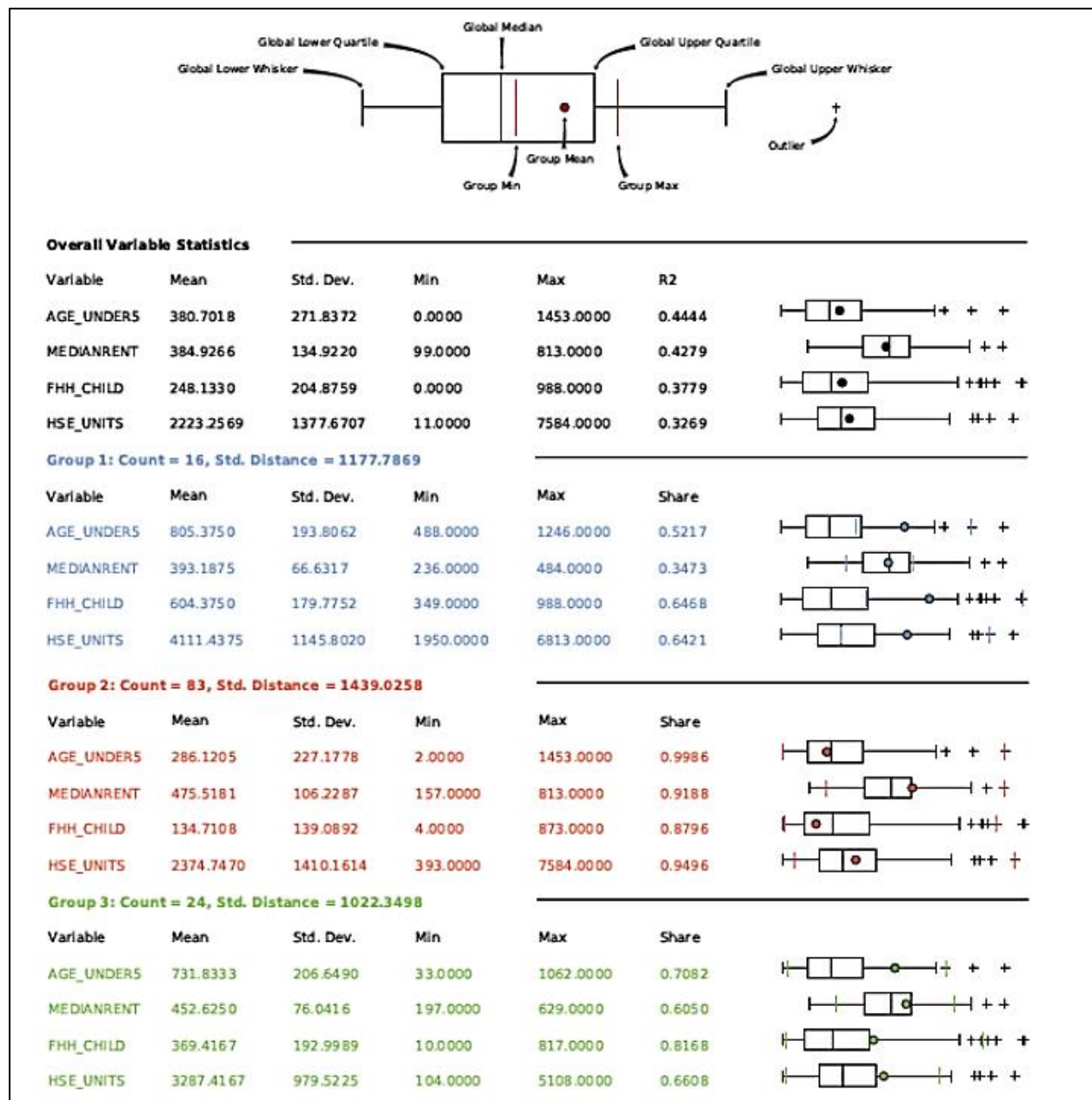
Annexe B.2: Constructeurs et caractéristiques des sondes thermiques (Dunham et al., 2005)

Manufacturer	Logger type	Submersible	Memory capacity	Temperature range	Accuracy	Resolution	Battery type
Onset	HOBO H8	No	7943	−20—70	0.7	0.4	1 year replaceable
HOBO	Pro Temp	No	65291	−30—50	0.2	0.02	3 year replaceable
	StowAway Tidbit	Yes	32520	−4—37	0.2	0.16	5 year non-replaceable
	OpticStow Away	Yes	32520	−4—37	0.2	0.16	10 year replaceable
Veriteq	Spectrum 1000	Yes	32520	−40—85	0.15	0.05	10 year non-replaceable
Gemini	Tinytag Ultra	No	7943	−40—85	0.2	0.4	2 year replaceable
	TinyTag Plus	No	10836	−40—85	0.2	0.4	2 year replaceable
Vemco	Minilog	Yes	10836	−5—40	0.1	0.015	Replaceable

Annexe B.3: Exemple d'information à archiver (Dunham et al., 2005)

Table name	Field name	Description
Site	Site ID	Auto number assigning consecutive numbers to sites
	Stream name	Name of stream sampled
	Site	Number of descriptor of site within stream
	Basin	River basin
	Quad	24K Quad name
	UTM X	UTM easting coordinate
	UTM Y	UTM northing coordinate
	UTM zone	UTM zone number
Logger	Elevation	Elevation in meters of site
	Logger ID	Unique ID or serial number of logger
	Type	Manufacturer and/or model of logger
	Year	Year of sample
	Pre calib	Pre calibration factor
Deployed	Post calib	Post calibration factor
	Site ID	Site ID of stream and site (relates back to Site table)
	Logger ID	Unique ID of logger deployed in the stream (relates back to Logger table)
	Date	Date logger placed in water
	Time	Time logger placed in water
	Interval	Time interval of samples
	Width	Wetted width of site at deployment
	Depth	Depth of logger
Removal	Hab type	Habitat type where logger was placed
	Site ID	Site ID of stream and site (relates back to Site table)
	Date	Date logger removed from water
	Time	Time logger removed from water
	Width	Wetted width at time of removal
Temperature	Comments	Any site differences from time of deployment to time of removal
	Site ID	Site ID of stream and site (relates back to Site table)
	Date	Date of sample
	Time	Time of sample
	Temperature	Temperature (in °C or °F) of sample

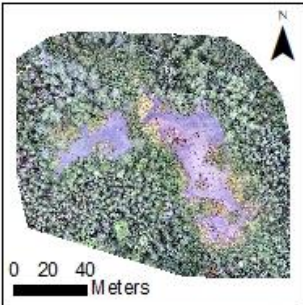
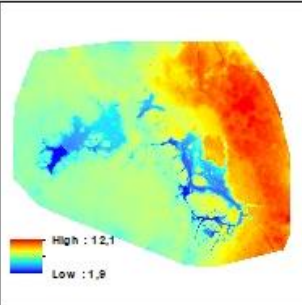
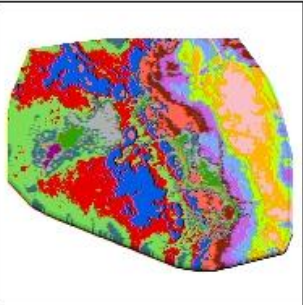
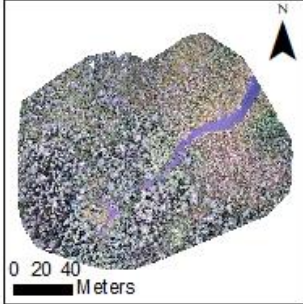
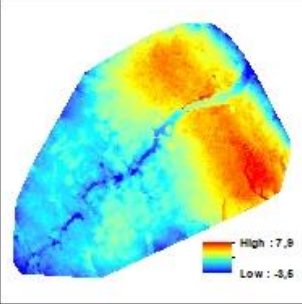
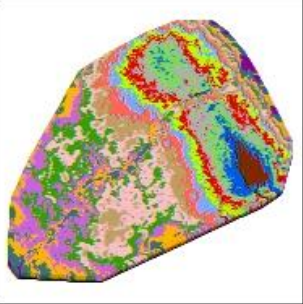
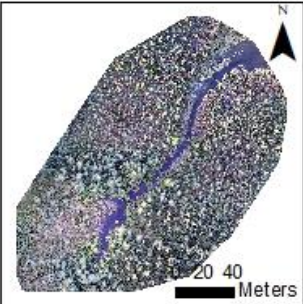
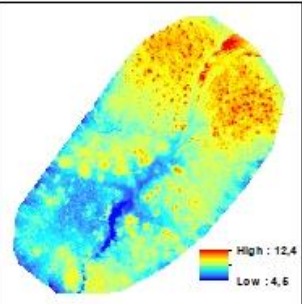
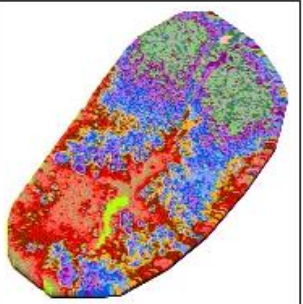
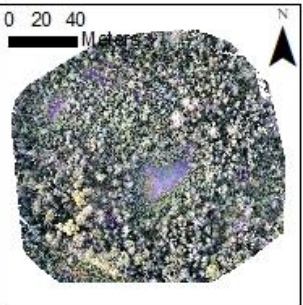
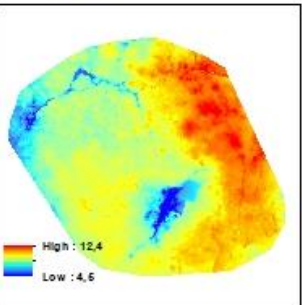
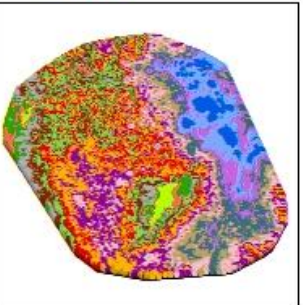
Annexe C: Exemple de rapport automatique généré par la méthode de classification *Grouping Analysis*



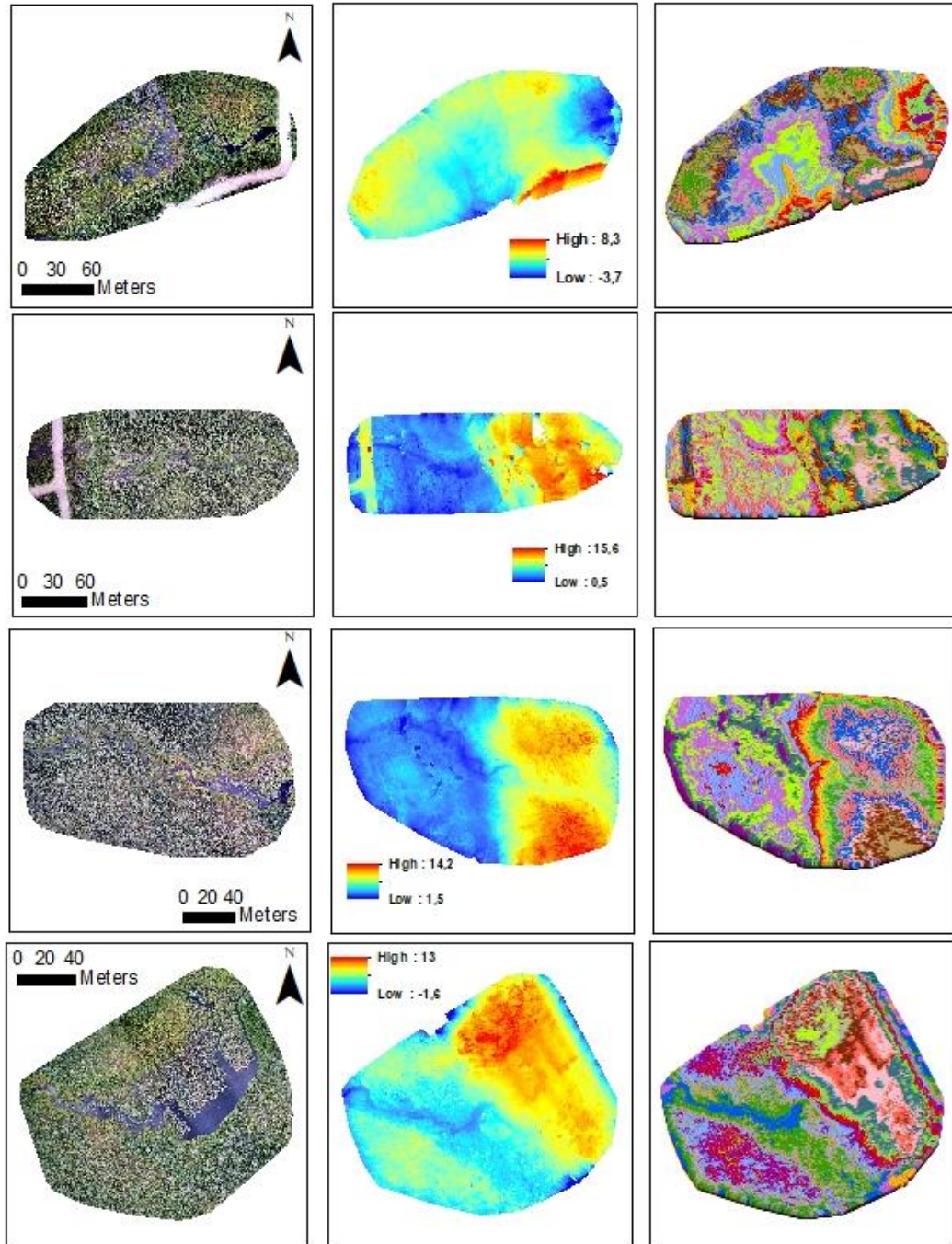
Annexe D: Formations et permis requis pour l'opération du drone au Canada

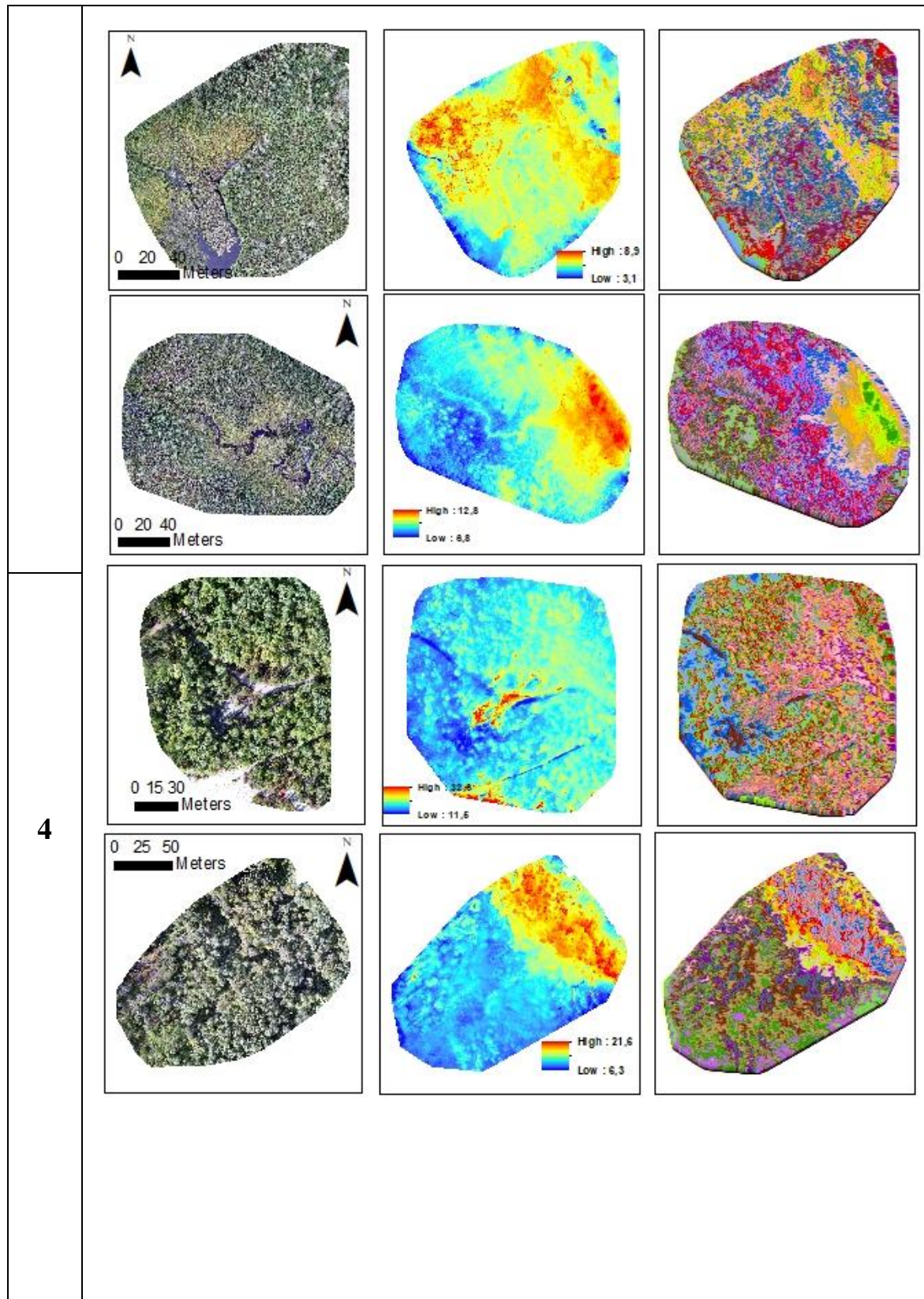
Au Canada, l'emploi de drone est régi par Transport Canada. Les exigences et règles que ce dernier exige sont contenues sous le *Règlement de l'aviation canadien (DORS/96-433) – Partie IX Systèmes d'aéronefs télépilotés*. Une réforme majeure, effective depuis le 1^{er} juin 2019, a considérablement modifié ce Règlement. Dorénavant, il est essentiel que les pilotes d'engin excédant 250 g obtiennent une licence de pilote délivrée par Transport Canada. Celle-ci permet à l'agence gouvernementale de s'assurer que les règles, les exigences juridiques, les connaissances de base quant aux opérations et les notions météorologiques de base soient maîtrisées par le détenteur de permis. Transport Canada impose que les demandeurs du permis de pilotage soient résidents canadiens. Ainsi, les pilotes non résidents doivent effectuer une demande auprès de Transport Canada pour obtenir un *Certificat d'opérations aériennes spécialisées (COAS)* pour l'utilisation d'un système de véhicule aérien non habité (UAV) dans l'espace aérien canadien. L'obtention de ce dernier est assujettie à l'examen approfondi par un agent de Transport Canada des conditions dans lesquelles le drone sera utilisé (p. ex. : qualifications spécifiques du demandeur, qualifications de l'observateur, spécifications de l'appareil, contrat d'assurance, examen spécifique des lieux survolés, analyse des risques des lieux survolés, procédure d'opération, procédure d'urgence et plan d'urgence). Des qualifications spécifiques pour le pilotage de drone ont été acquises lors de l'année 2018. Un certificat de formation professionnelle de pilotage de drone, volets pratique et théorique, a été délivré par l'entreprise *Koptr* de Beloeil. Cette formation, d'une durée d'une semaine, permet d'acquérir les notions de base nécessaires afin d'obtenir la licence de pilote ou de compléter adéquatement la demande de COAS. La formation offre un sommaire des aspects météorologiques, physiques, réglementaires et techniques et des normes de sécurité régissant le pilotage d'un appareil. Le volet pratique permet l'initiation au pilotage de drone par la pratique sur plusieurs appareils, dont celui de l'UQAT, l'apprentissage des différents types de vol (automatique et manuel) et les techniques de rapatriement en cas de problèmes techniques. Il est nécessaire de réussir des examens théoriques et pratiques pour obtenir le certificat de la formation. L'examen menant à l'obtention du *Certificat de compétence en radio – Aéronautique*, émis par *Innovation, Sciences et Développement économique Canada*, a été également réussi. Ce dernier a permis d'assurer la communication radio lors des vols, notamment avec les installations de l'aéroport d'Amos.

Annexe E: Mosaïquages du visible, thermique et calcul de GA pour les sites survolés sur l’esker Saint-Mathieu / Berry

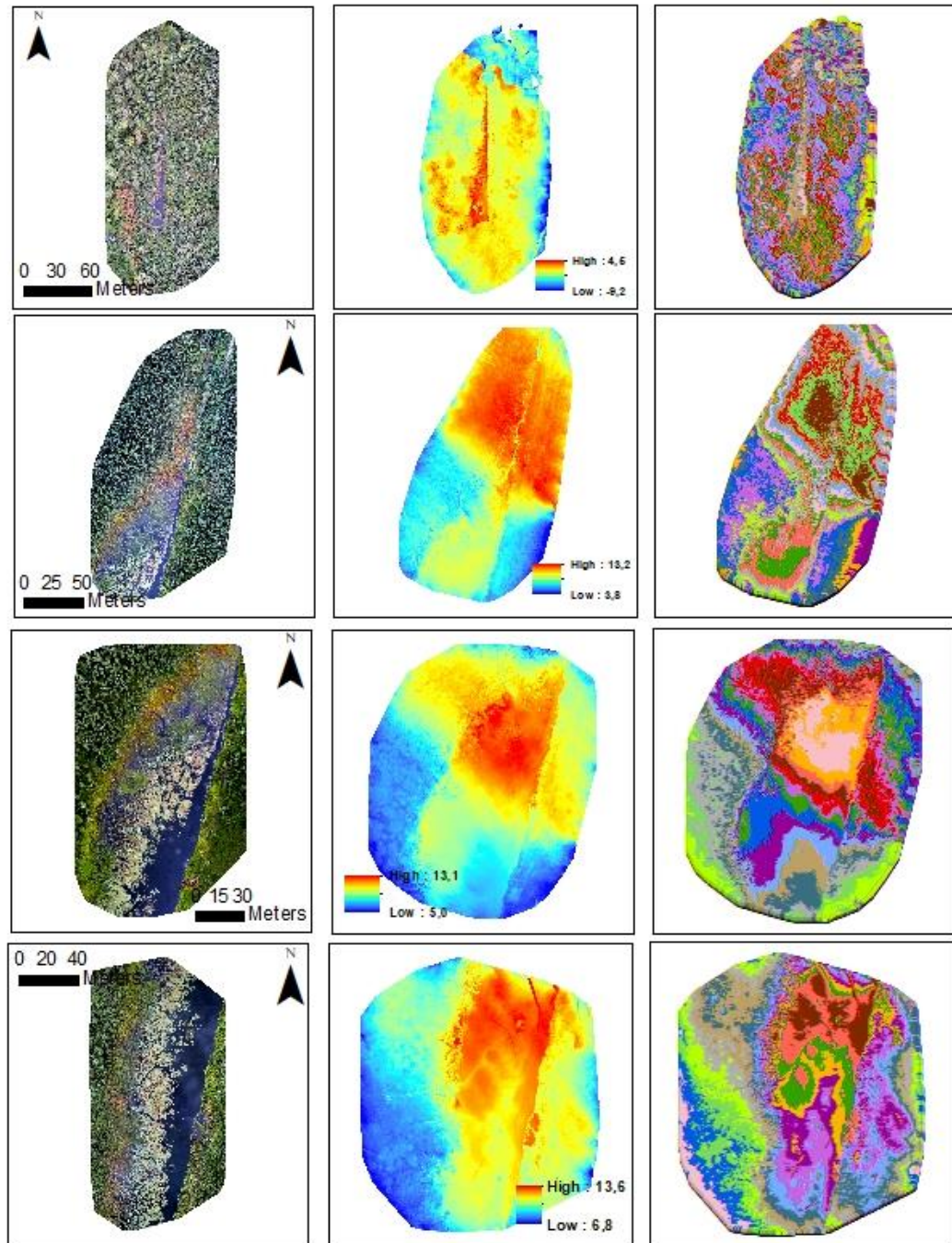
Site	RGB	Thermique	Grouping Analysis
9			
			
			
			

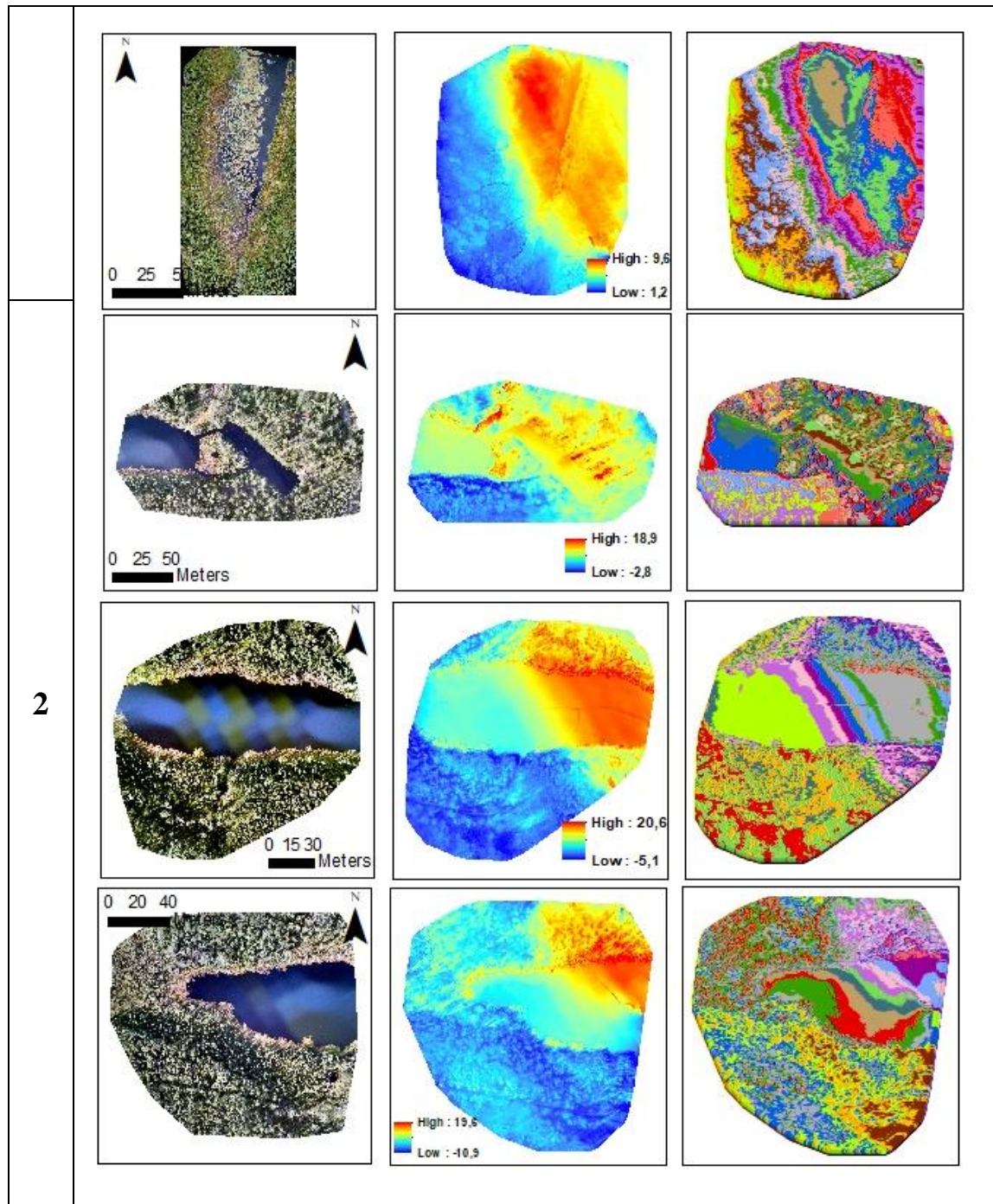
3

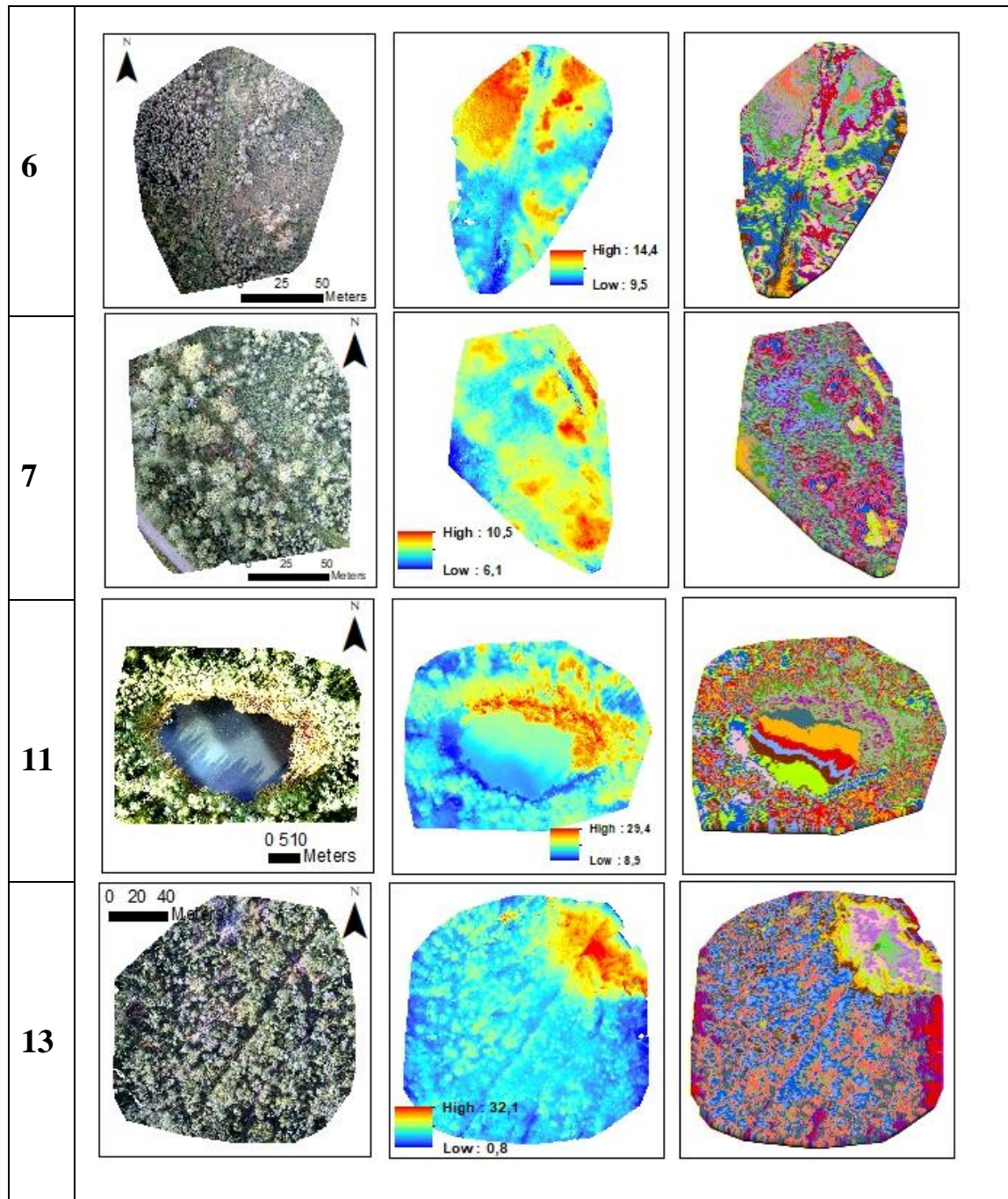




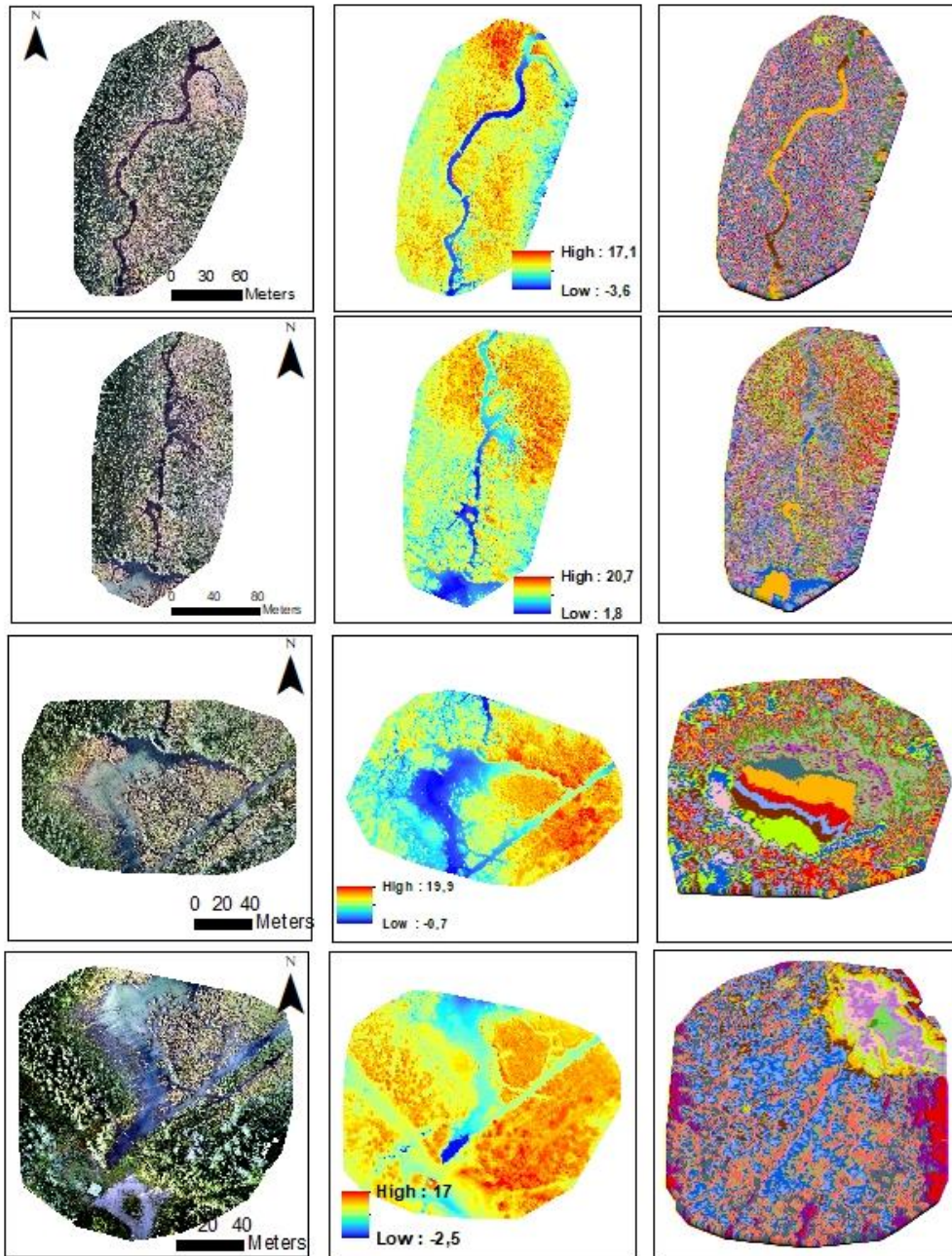
5

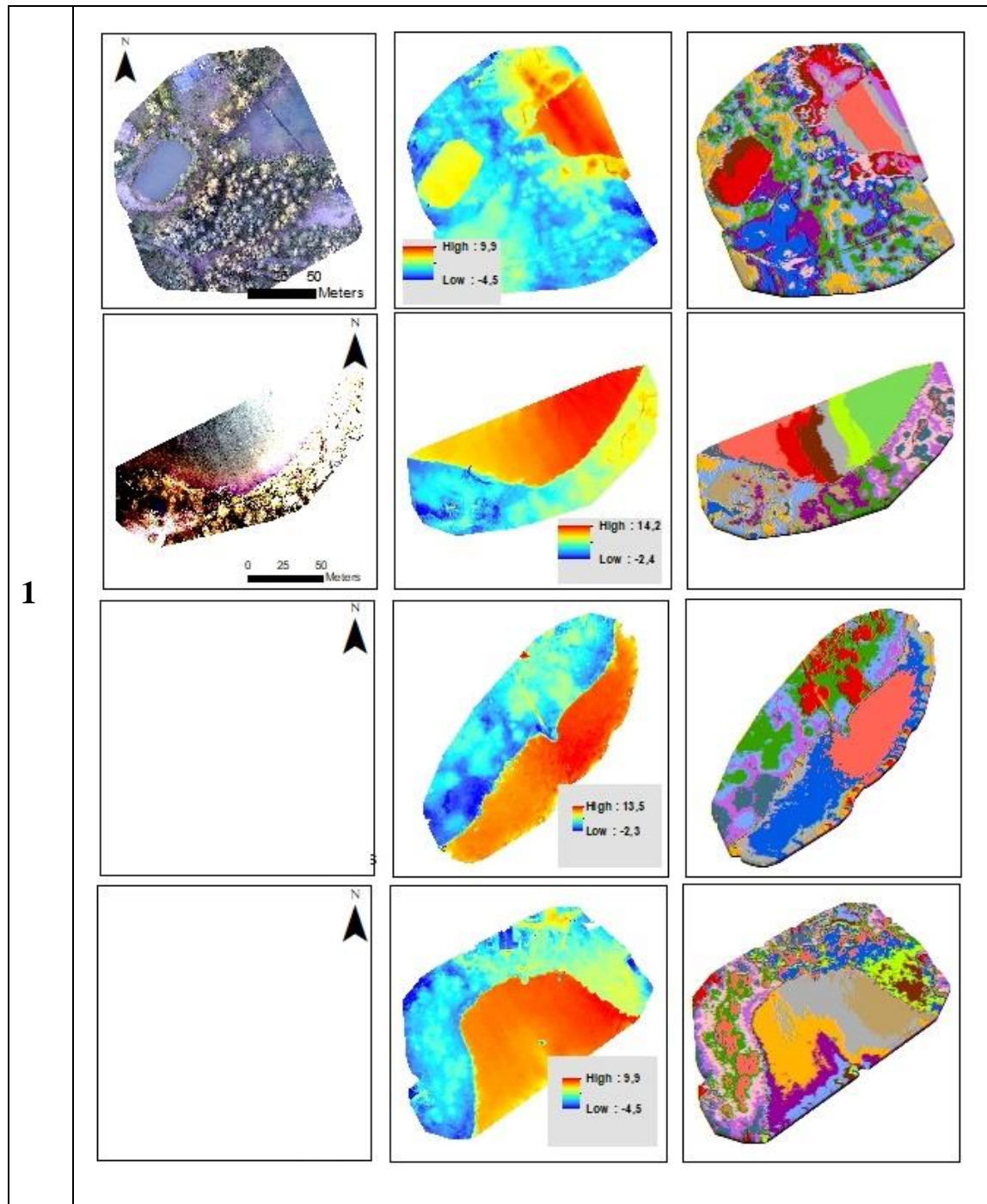


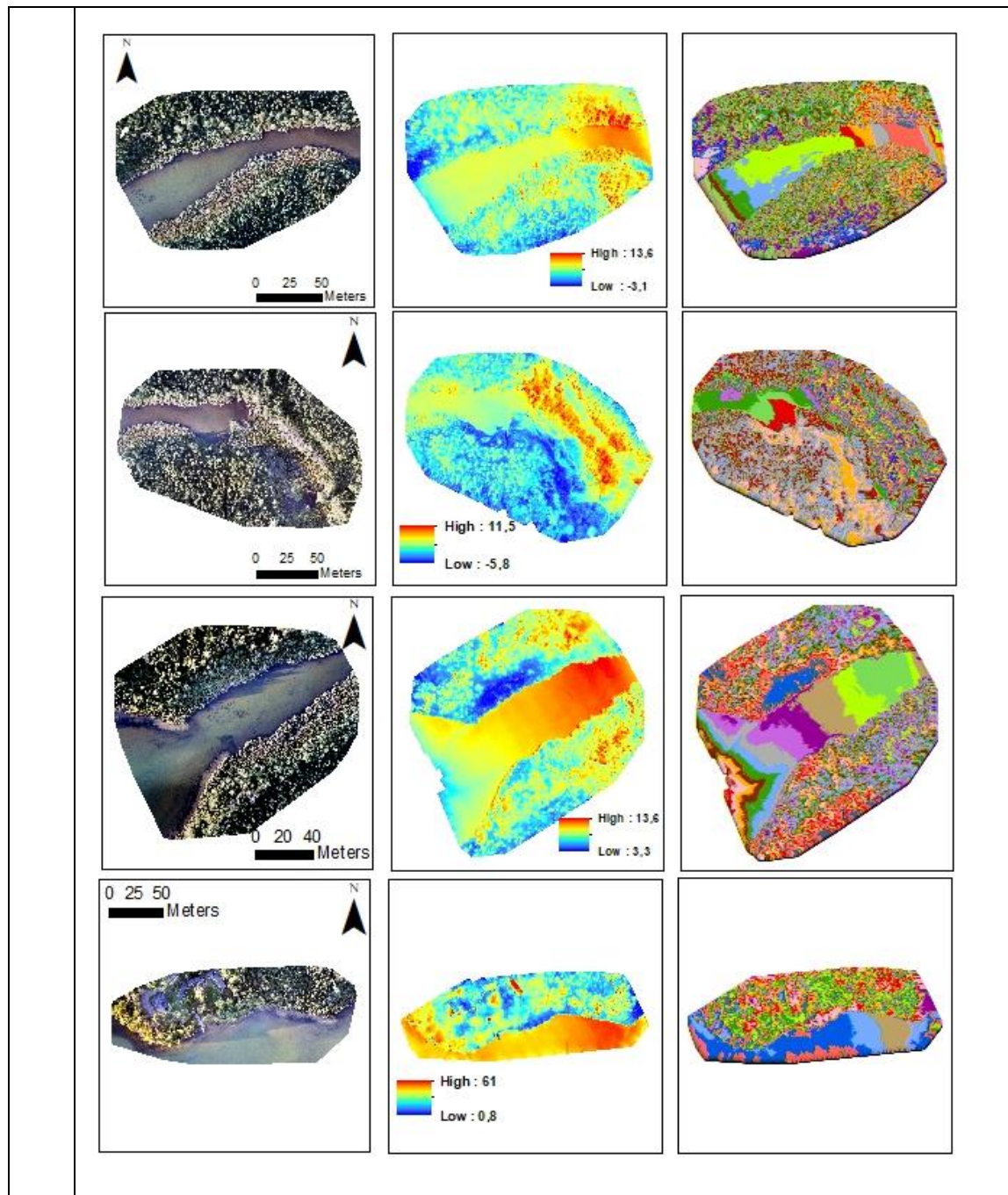




12







Annexe F: Exemple des échantillons sur une image acquise par drone, pour lesquels la moyenne de température journalière est calculée

