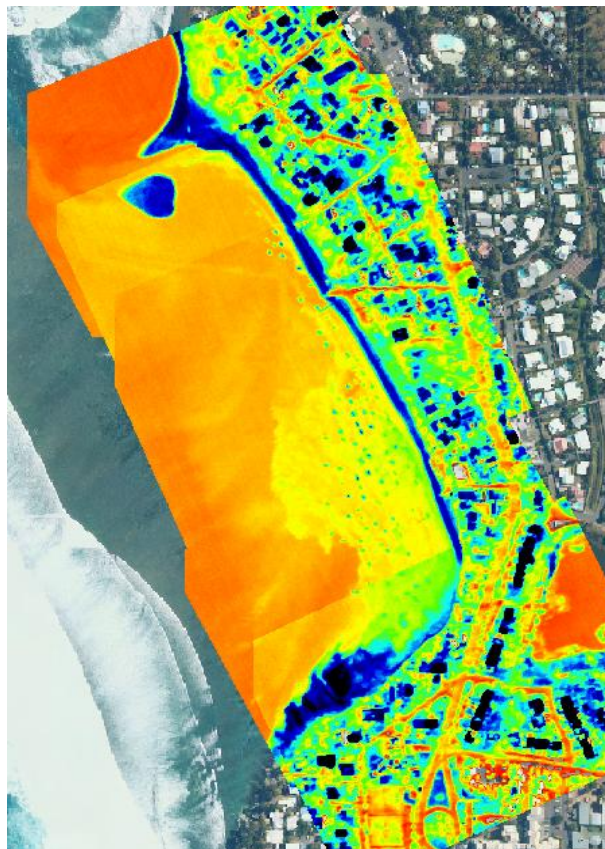




EUTROLAG

Cartographie des résurgences d'eau douce par imagerie thermique aérienne

Rapport de fin de projet



**E. Augereau, C. Delacourt, P. Allemand, P. Grandjean,
J. Turquet, H. Cambert, J. Ammann, T. Stieglitz**

Mai 2013

Sommaire

I – Introduction.....	3
II – Acquisition.....	4
a) Capteurs.....	5
i) Les capteurs de positionnement.....	5
ii) Les capteurs imageurs.....	6
b) Plate forme.....	6
c) Déroulement des acquisitions.....	8
d) Mesures in situ.....	10
III - Géométrie.....	11
a) Origine des distorsions.....	11
b) Corrections géométriques.....	12
c) Exemple de l'étang salé.....	14
IV - Radiométrie.....	16
a) Résolution radiométrique.....	16
b) Mesures thermiques en domaine marin.....	17
i) absorption atmosphérique.....	17
ii) précision instrumentale.....	18
c) Mesure in situ.....	19
i) Mesures de surface.....	19
ii) Mesures en un point fixe.....	20
iii) Mesures dans la colonne d'eau.....	21
d) Validation des images thermiques.....	23
i) correction des données aériennes.....	23
ii) Comparaison multitemporelle.....	26
iii) Influence de la bathymétrie.....	27
V - Résultats.....	28
a) Acquisition Optique.....	28
b) Thermique.....	33
VI - Conclusion.....	38

I – Introduction

L'hydrogéologie de La Réunion se caractérise par une grande complexité des modèles d'écoulement des eaux souterraines avec des flux préférentiels d'écoulements dans des zones à forte porosité (Join *et al.*, 1997). Les recharges par les pluies surviennent principalement durant la saison tropicale humide de Décembre à Avril. Une partie de ces rejets d'eaux souterraines se produisent dans les lagons récifaux sur le côté Ouest de l'île. Ces résurgences sont difficiles à détecter et à cartographier. En effet si différentes techniques *in situ* permettent de détecter la présence de ces résurgences (anomalie de salinité, de température ou de signature géochimiques et radiochimiques (Stieglitz, 2005 ; Stieglitz *et al.*, 2008 ; Stieglitz *et al.*, 2010) elles ne permettent que difficilement de réaliser une cartographie précise des zones de résurgence.

Cependant dans le cas où l'eau souterraine a une température différente de celle des eaux côtières, ces techniques peuvent être complétées par des mesures de télédétection de la température de surface. Cette technique a d'ailleurs été utilisée avec succès par exemple pour localiser et décrire les flux des eaux souterraines de la côte sur les îles volcaniques d'Hawaii (Johnson *et al.*, 2008). C'est cette technique que nous avons appliquée dans le cadre de cette étude (Delacourt *et al.*, 2009a et b ; Gaudin *et al.*, 2009 ; Lejot *et al.*, 2007).

Les capteurs nécessaires à la réalisation de ce projet sont disponibles à l'IUEM (Institut Universitaire Européen de la Mer) : Caméra Infra Rouge Thermique, GPS différentiel et capteurs d'attitude intégrés.

Les lagons récifaux de La Réunion sont généralement peu profonds (moins de 2m de profondeur), et l'eau y a un temps de résidence de l'ordre de 12 heures (Cuet, com. pers.). Ils sont discontinus, et couvrent une superficie totale d'environ 12 km² le long de 50 km de littoral. En raison de l'étendue des zones à couvrir, les techniques conventionnelles de mesures *in situ* ne peuvent donc fournir une cartographie exhaustive.

Dans le cadre de cette étude nous avons relises une cartographie exhaustive des lagons en combinant techniques *in situ*, (de salinité et de température) et cartographie aérienne infrarouge à partir d'un hélicoptère.

II – Acquisition

Afin d’optimiser les chances de réussite de l’acquisition thermique, une étape préliminaire d’optimisation, ainsi que 2 acquisitions thermiques et in situ partielles ont été réalisées en mai 2010 et novembre 2011.

Le choix des dates d’acquisition des données d’imagerie thermique est un paramètre fondamental.

Il faut en effet sélectionner la période qui correspond à un compromis entre maximum de débits des résurgences et de maximisation des gradients thermiques entre eau douce et eau salée. En effet, la variabilité temporelle importante attendue des débits des résurgences sous marines limite fortement les périodes propices à l’acquisition. Les nappes se chargeant pendant la saison des pluies entre décembre et avril, nous avons choisi le mois d’avril pour effectuer les mesures, période pendant laquelle les débits des résurgences sont maximums et les gradients thermiques sont suffisamment élevés.

Nous avons décidé de réaliser de mesures physico-chimiques *in situ* simultanément avec l’acquisition aérienne. Ces mesures sont en effet fondamentales pour éliminer les artefacts potentiels sur les images et valider les gradients thermiques observés par télédétection.

Afin d’assurer la réussite de cette étude, une première mission préliminaire a été réalisée. Les images de la température des lagons ont été obtenues par une caméra Infrarouge (dans le domaine thermique) montée sur un hélicoptère. Cette étude, réalisée en Mai 2010 par l’équipe proposante, a démontré que la méthode est appropriée pour détecter et cartographier les masses d’eau de températures variables dans les lagons de la Réunion (Figure 1, rapport «contrat de sous-traitance mission d’expertise »).

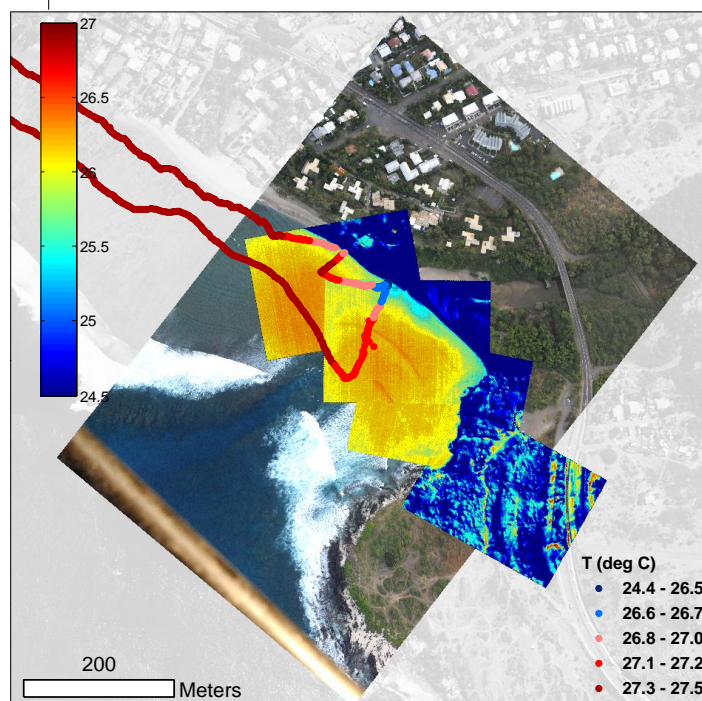


Figure 1: Cartographie aérienne thermique de la zone de la ravine des 3 bassins, couplée à des mesures *in situ* (IUEM Mai 2010). Les variations de température sont associées aux flux d’eaux souterraines froides arrivant dans le lagon depuis les alluvions aquifères d’une ravine (rapport «contrat de sous-traitance mission d’expertise »).

a) Capteurs

Deux types de capteurs doivent être mis en œuvre simultanément:

- Les capteurs de positionnement
- Les capteurs imageurs

i) Les capteurs de positionnement

L'acquisition de données à partir d'une plate-forme en mouvement nécessite de connaître la position et l'inclinaison de la plate-forme à chaque instant. C'est le rôle du GPS et de la centrale attitude qui sont installés à bord de l'hélicoptère. A chaque prise de vue optique et thermique, les capteurs de positionnement associent une position GPS ainsi que 3 angles décrivant l'inclinaison de la plate-forme. Un système de datalogger (dispositif électronique d'enregistrement), développé à l'IUEM, permet de synchroniser l'ensemble de ces mesures et de les enregistrer dans une mémoire interne (Figure 2).

Le GPS est un Magellan DG14, permettant une acquisition en RTK (Real Time Kinematic). Le RTK est une technique de navigation satellite qui augmente la précision de positionnement. Pour une plate-forme en mouvement, nous atteignons une précision de l'ordre du mètre.

La centrale attitude embarquée mesure les données d'inclinaison avec une fréquence de 500Hz et une précision de 1°.

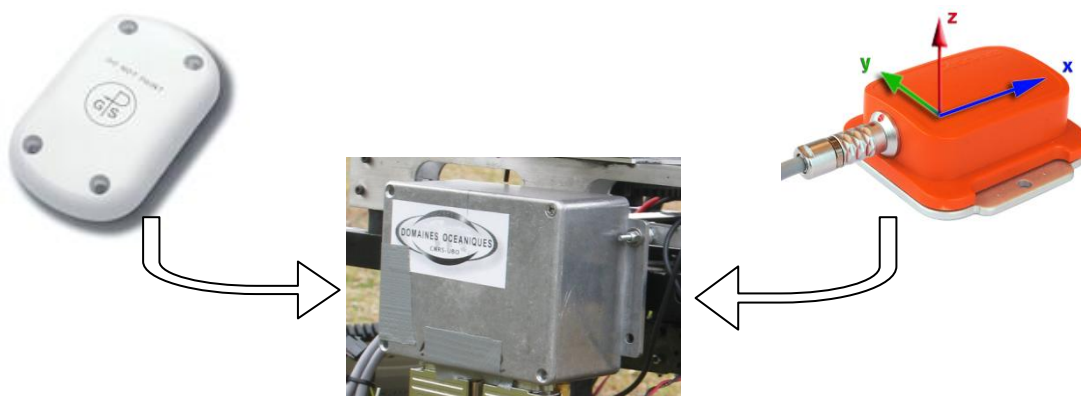


Figure 2 : *Système d'acquisition de position et d'inclinaison. Antenne GPS miniature (gauche), inclinomètre (droite), et datalogger (centre) qui permet d'enregistrer les informations venant des différents capteurs.*

ii) Les capteurs imageurs

Un appareil optique et un appareil thermique ont été utilisés pour acquérir des images des lagons étudiés (Figure 3).

Le capteur optique est un appareil photo réflex Nikon D700 de résolution 4260x2830 pixels. Le capteur thermique infratec variocam a une résolution de 1280x960 pixels.



Figure 3 : a) Capteur optique nikon D700 b) capteur thermique infratec Variocam

b) Plate forme

L'équipe ayant déjà réalisé des acquisitions aériennes en métropole avec un hélicoptère de modèle Robinson R22, nous avons donc choisi d'utiliser le même modèle d'hélicoptère pour les acquisitions liées au projet Eutrolag. Le R22 est particulièrement adapté aux vols à faible altitude, de part sa petite taille et sa maniabilité (Figure 4).



Figure 4 : hélicoptère Robinson R22 équipé du système de fixation des différents instruments de mesures

Le système de fixation permet de positionner les différents instruments de mesure en position centrale arrière, sur le châssis de l'hélicoptère. La fixation est équipée d'accroches pour les instruments de mesure, d'un point d'encrage sur le châssis associé à une barre de renfort à l'avant pour sécuriser l'accroche, et d'un cache de protection qui limite les projections. Un système d'absorbeur de vibrations a également été mis en place pour réduire au maximum les vibrations liées au moteur de l'hélicoptère et ainsi acquérir des images nettes. Le câble de transfert de données permet de contrôler l'acquisition en temps réel, à partir de la cabine de pilotage.

Avant chaque mission, un plan de vol prévisionnel est mis en place pour aider le pilote à suivre la trajectoire. Ainsi, un retour GPS temps réel indique au pilote sa position précise et son écart par rapport au plan de vol prévisionnel. Les conditions atmosphériques influent sur la précision du vol et ne permettent pas de suivre de manière précise le plan de vol prévisionnel (figure 5).

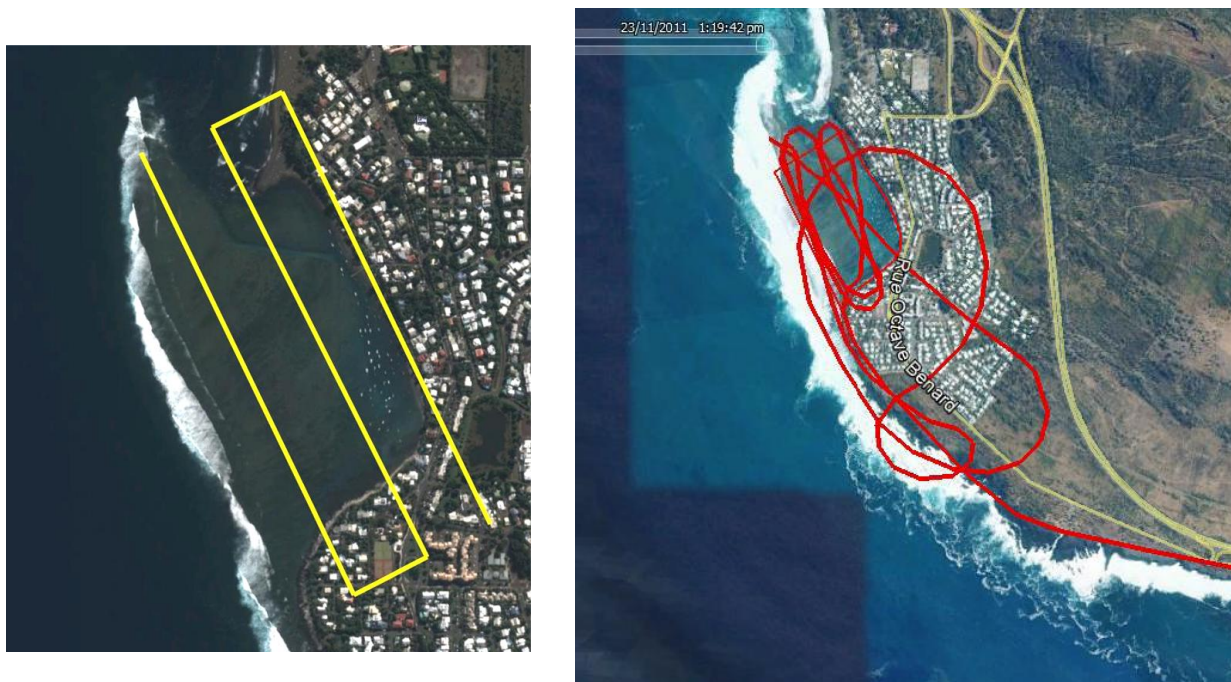


Figure 5 : plan de vol prévisionnel (gauche) et trajectoire effective (droite) lors de l'acquisition à l'étang salé le 06/04/2012

L'altitude d'acquisition peut aussi varier de quelques dizaines mètres (environ 40 m) pour un vol donné (figure 6), à cause des paramètres atmosphériques. Ces écarts, qui peuvent engendrer des erreurs de mesure, seront corrigés lors du traitement des données.

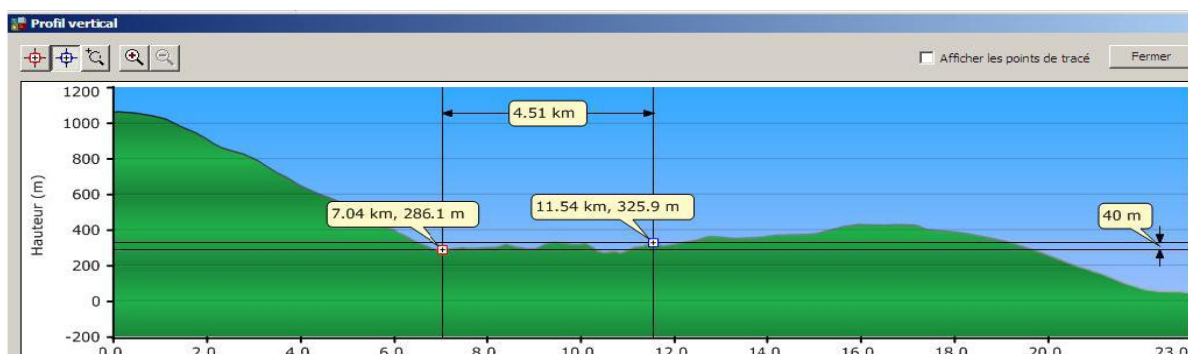


Figure 6 : altitude de vol pour l'acquisition de l'étang Salé.

c) Déroulement des acquisitions

Les 4 principaux lagons de l'île : lagon de St leu, de la Saline, de St Pierre et l'Etang Salé, ont été cartographiés. (Figure 7).

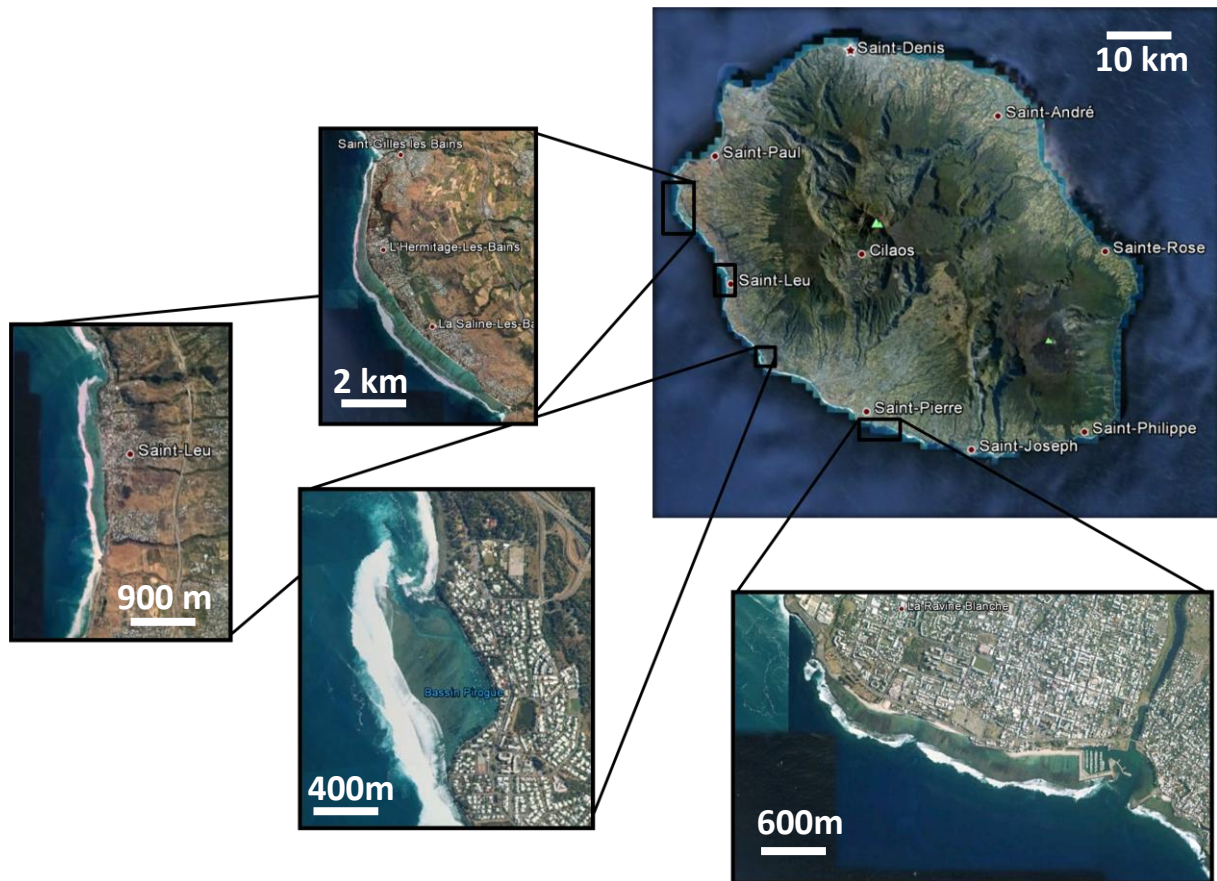


Figure 7 : position des sites d'acquisitions

La première mission préliminaire de mai 2010 a montré que la méthode d'imagerie thermique aéroportée était appropriée dans le cadre du projet Eutrolag. En novembre 2011, nous avons mis en place une seconde mission du même type, dans le but d'optimiser le protocole d'acquisition. La définition de paramètres comme l'altitude, la vitesse ou l'heure de vol ont été précisés afin d'être opérationnel lors de la mission principale d'avril 2012.

Il a été décidé de privilégier les acquisitions à une altitude de vol de 700m, qui est un bon compromis entre la résolution et la fauchées des images (cf point 3c). La vitesse de vol est aussi un point primordial pour l'acquisition.

En effet, l'hélicoptère doit maintenir une vitesse de vol assez faible pour avoir un bon recouvrement entre les clichés. Les acquisitions ont été réalisées à une vitesse de 50 km/h, qui est la vitesse seuil permettant de garder une stabilité suffisante lors des acquisitions.

Lors des trois jours d'acquisition principales, les 6 (Etang salé, Saint Pierre), 7 et 8 avril 2012 (Saline, Saint Leu), les mesures aériennes étaient programmées le matin au levé du jour, afin d'optimiser le gradient thermique (entre eau issue des résurgences et mer) et de minimiser les effets du réchauffement solaire (cf point 4-c-ii). Ainsi, l'hélicoptère décollait entre 7h10 et 7h20, pour effectuer des vols durant 10 à 20 mn en fonction de la superficie des sites à couvrir.

1100 clichés thermiques dont 600 exploitables, et environ 1200 clichés optiques, dont 680 exploitables (tableau 1) ont ainsi été réalisés pour un volume de données brutes de 8 Go.

Les mesures in situ, se déroulaient entre 6h45 et 7h45 pour être synchronisées avec les mesures aériennes.

	Description	Sites	Date / heure	Altitude de vol	Nombre de clichés
Acquisition préliminaire 1	Acquisition de test pour valider l'utilisation de l'imagerie thermique pour le projet Eutrolag	La Saline	19/05/107h00	300 m 800 m	50
Acquisition préliminaire 2	Acquisition d'optimisation du protocole de mesure	Etang Salé	22/11/11 6h00 23/11/11 16h00	1000 m 300 m	310
		Saint Pierre	22/11/11 6h00 23/11/11 16h00	1000 m 300 m	500
Acquisition principale	Acquisition des données définitives	Etang Salé	06/04/12 7h00	700 m	260
		Saint Pierre	06/04/12 7h00	700 m	150
		Saint Leu	07/04/12 7h00 08/04/12 7h00	700 m	400
		La Saline	07/04/12 7h00 08/04/12 7h00	700 m	470

Tableau 1 : récapitulatif des acquisitions

d) Mesures in situ

Les paramètres atmosphériques, de vol et instrumentaux perturbent la qualité des mesures thermiques en introduisant des biais (cf point 4-b).

Les mesures in situ permettent de corriger une partie de ces perturbations et calibrer les mesures thermiques.

Ces mesures de calibration sont effectuées avec des sondes thermosalinomètre (figure 8) dans la couche superficielle de l'eau, à environ 5-10 cm sous la surface. Trois types de mesures ont été réalisés pour chaque site d'acquisition :

- une mesure fixe servant à déterminer l'évolution de la température en un point donné durant la durée de l'acquisition
- une mesure manuelle sur une bande proche de la plage, plus particulièrement au niveau des anomalies thermiques majeures.
- une mesure en kayak, qui a permis de couvrir une zone plus grande, avec une sonde programmable effectuant 30 mesures par minute.



Figure 8 : Exemple de sonde thermosalinomètre utilisées pour les mesures in situ – YSI et Diver

Un positionnement par GPS, en parallèle des acquisitions permettent de positionner les mesures in situ.

III - Géométrie

Cette partie consacrée à la géométrie des images acquises détaille les techniques de traitement qui permettent de reconstruire l’empreinte des images au sol grâce aux différents instruments de positionnement embarqués, afin d’obtenir une mosaïque d’images géoréférencées, c'est-à-dire recalée dans un repère cartographique.

a) Origine des distorsions

Les images étant prises depuis un vecteur en mouvement, la zone imagée au sol ne correspond pas à la verticale de la plateforme, ce qui génère des distorsions (figure 9).

A titre d’exemple, une inclinaison de 10 ° en tangage ou roulis entraîne un décalage de 180 m de l’image au sol, pour une image (résolution de 4200x2800) acquise à 1000 m d’altitude.

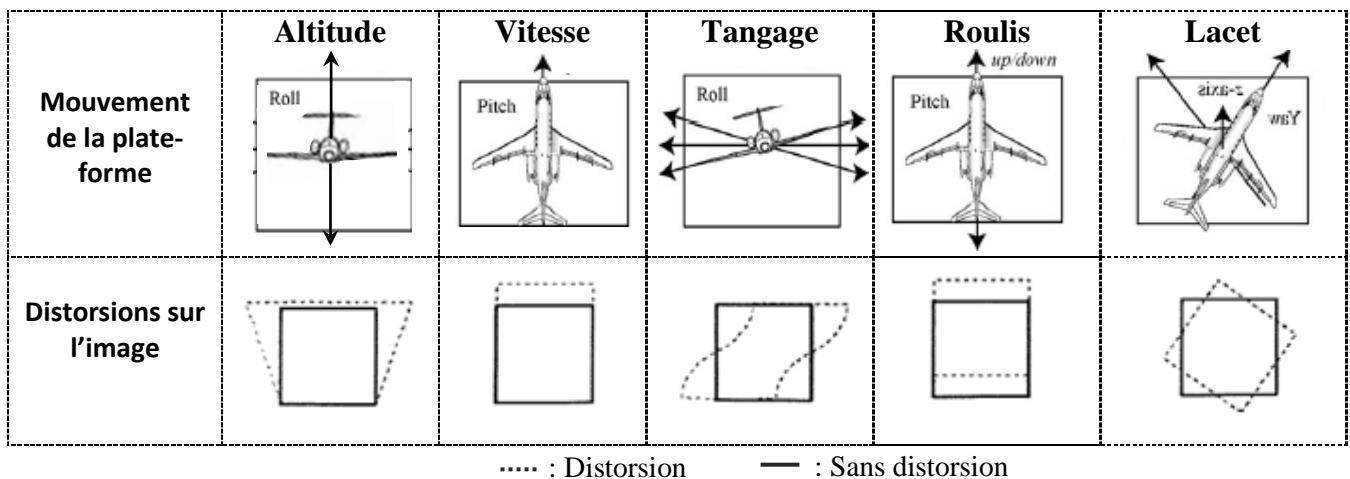


Figure 9 : *distorsion des images en fonction des paramètres de vol.*

Afin d’obtenir des images exploitables (intégrable dans un SIG) il est nécessaire de corriger ces distorsions.

La figure 9 présente les différentes distorsions d’images dues aux mouvements de la plateforme d’acquisition. Les temps d’obturation des deux capteurs étant très rapides, les distorsions dues à la vitesse sont inexistantes. Les autres effets géométriques dus aux mouvements de la plateforme seront corrigés grâce aux paramètres de positionnement de l’hélicoptère. Ainsi, à chaque image correspond une position GPS et une position angulaire (figure 10).

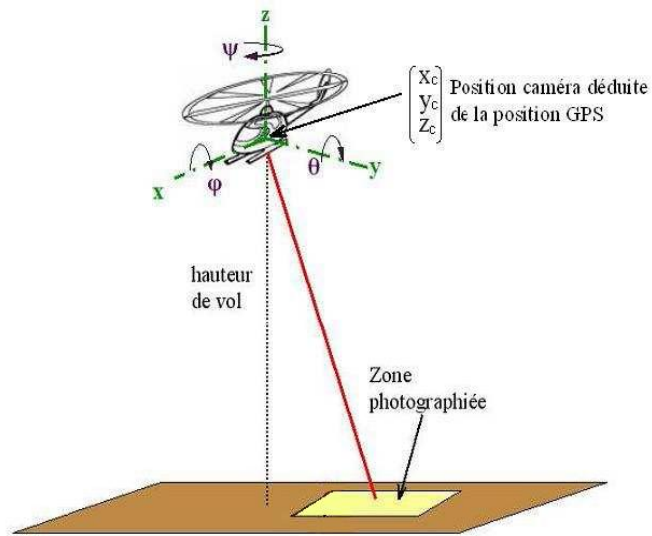


Figure 10 : paramètres de positionnement de l'hélicoptère.

Le GPS différentiel mesurant la position de chaque cliché a une précision en dynamique d'environ 1 mètre. Cette précision correspond à la marge d'erreur acceptable pour le recalage des images. La centrale attitude donne l'inclinaison de la plate forme avec une précision de 1°.

b) Corrections géométriques

Les paramètres d'acquisitions sont ensuite intégrés dans les équations de la photogrammétrie afin de repositionner les images au sol. C'est l'étape de géoréférencement.

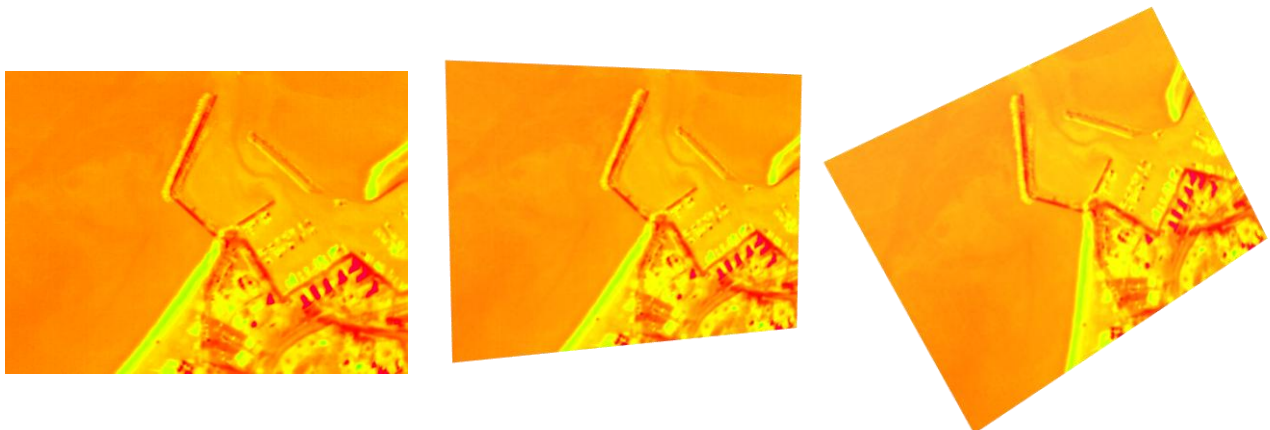


Figure 11 : Etape de géoréférencement d'une image aérienne thermique. Image brut (gauche), image corrigée du tangage roulis (centre), image corrigée du tangage, du roulis et du cap (droite).

Cette opération permet de projeter les clichés bruts dans un repère cartographique (figure 11). Nous avons automatisé ce traitement, afin géoréférencer rapidement des séries d'images.

Néanmoins, les imprécisions des capteurs peuvent, en théorie, entraîner une erreur de positionnement de l'ordre de la dizaine de mètres. Nous avons donc mis en œuvre un affinage du géoréférencement grâce à des programmes de corrélation d'images, qui permettent de recaler les images les unes par rapport aux autres, quand celles-ci présentent un recouvrement assez important de minimum 50%. Nous obtenons donc une précision relative de 5m entre deux images ayant un recouvrement (figure 12).

La dernière étape d'optimisation consiste à effectuer un recalage manuel des mosaïques complètes, avec des points repérables à la fois sur des ortho images IGN et sur nos mosaïques.

Les mosaïques ont donc finalement une imprécision absolue maximale de 10m par rapport aux clichés IGN (figure 12).

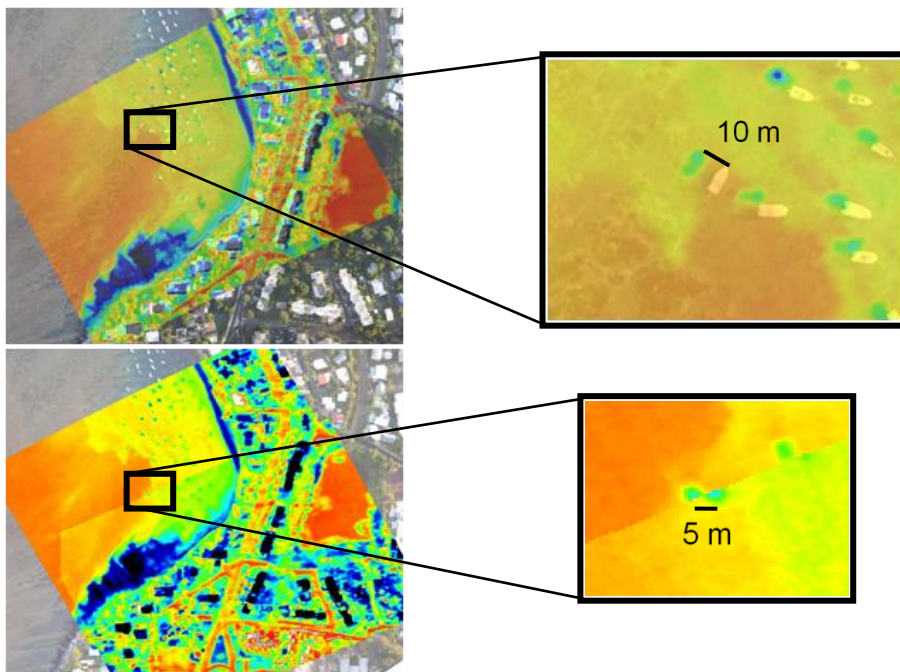


Figure 12 : exemple de précisions de géoréférencement. Précision absolue de 10m (en haut) entre l'image thermique et une ortho image IGN. Précision relative de 5m(en bas) entre deux images thermiques ayant un recouvrement.

Des mosaïques géoréférencées des 4 zones d'études ont été composées avec les images thermiques et optiques acquises lors de la campagne de mesure.

c) Exemple de l'étang salé.

Nous avons choisi le lagon de l'Etang salé comme site pilote pour développer et optimiser notre méthodologie d'acquisition et de traitement. En effet, de part sa taille restreinte (environ 0.2 km²), et notre connaissance des positions des résurgences, le lagon de l'Etang salé était le plus adapté aux tests de mise en œuvre pour ce projet.

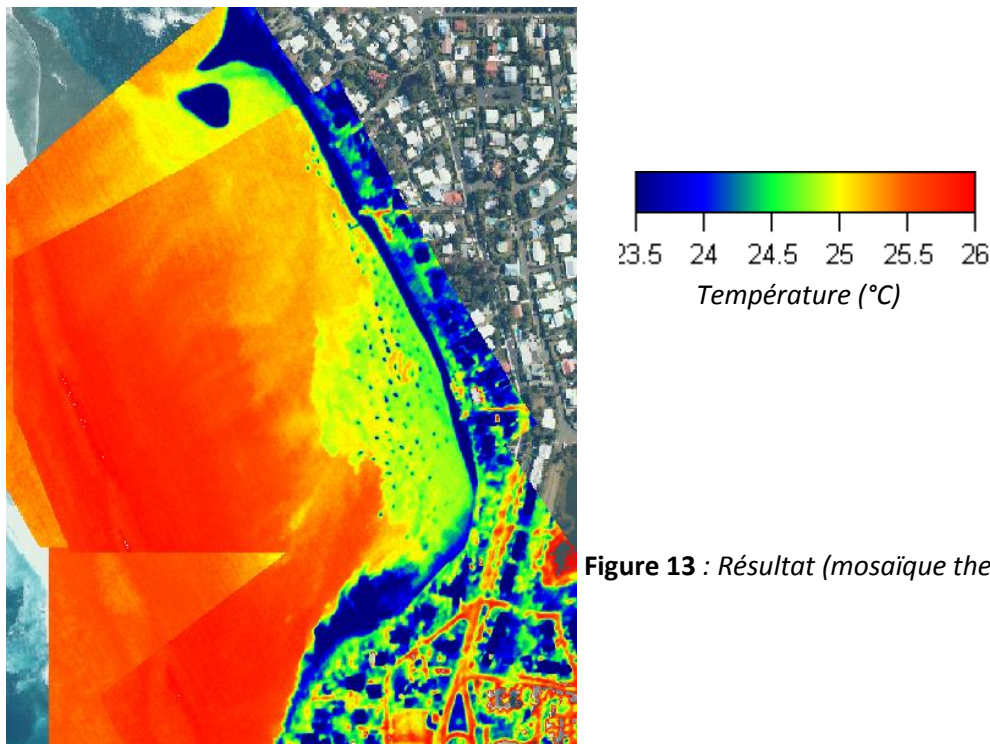
La hauteur d'acquisition a été un paramètre primordial à optimiser avant d'effectuer les acquisitions à plus grande échelle. En effet, la hauteur de vol influe directement sur la résolution de la mesure et sur la fauchée des images aériennes (tableau 2).

Nous avons donc testé 3 hauteurs d'acquisition pour évaluer la précision des résultats obtenus.

	Hauteur de vol (m)	Résolution (m)	Fauchée (m)
Optique	300	0.07	300 x 200
	700	0.17	700 x 500
	1000	0.25	1000 x 700
Thermique	300	0.25	160 x 120
	700	0.58	370 x 280
	1000	0.8	530 x 400

Tableau 2 : Tableau des résolutions et des fauchées des clichés optiques et thermiques, en fonction des altitudes de vol.

Avec une fauchée importante (530*400 m pour chaque image thermique et 1000*700 m pour l'optique) le vol à 1000 m d'altitude offre une large couverture. Néanmoins, la résolution thermique de 80 cm ne permet pas d'imager avec précision les anomalies de températures (Figure 13).



Au contraire, le vol à 300m nous donne une très grande résolution qui permet de bien détailler la position des résurgences. Mais la très faible fauchée ne permet pas d'avoir du recouvrement entre les différentes images produisant un géoréférencement moins précis. De plus, le site d'acquisition n'est pas entièrement couvert (figure 14).

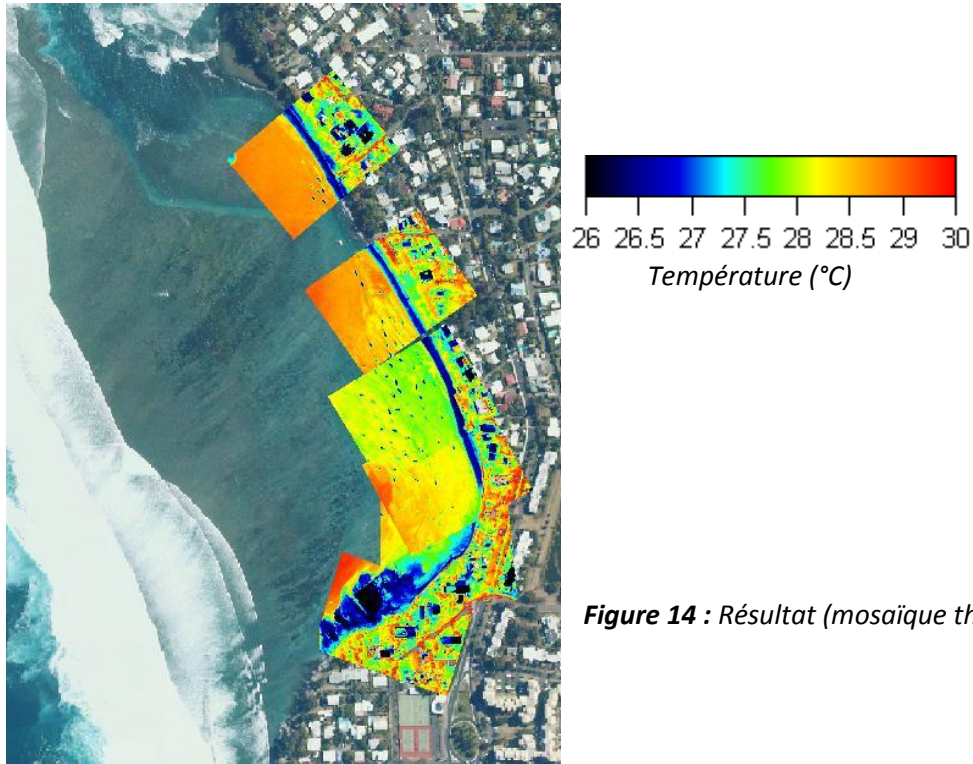


Figure 14 : Résultat (mosaïque thermique) à 300m.

Les acquisitions réalisées à 700 m présentent le meilleur compromis entre la taille de la fauchée et la résolution au sol. A cette altitude, les anomalies thermiques restent détaillées avec précision, et les images gardent un recouvrement important, ce qui permet un géoréférencement et un mosaïquage plus précis (figure 15).

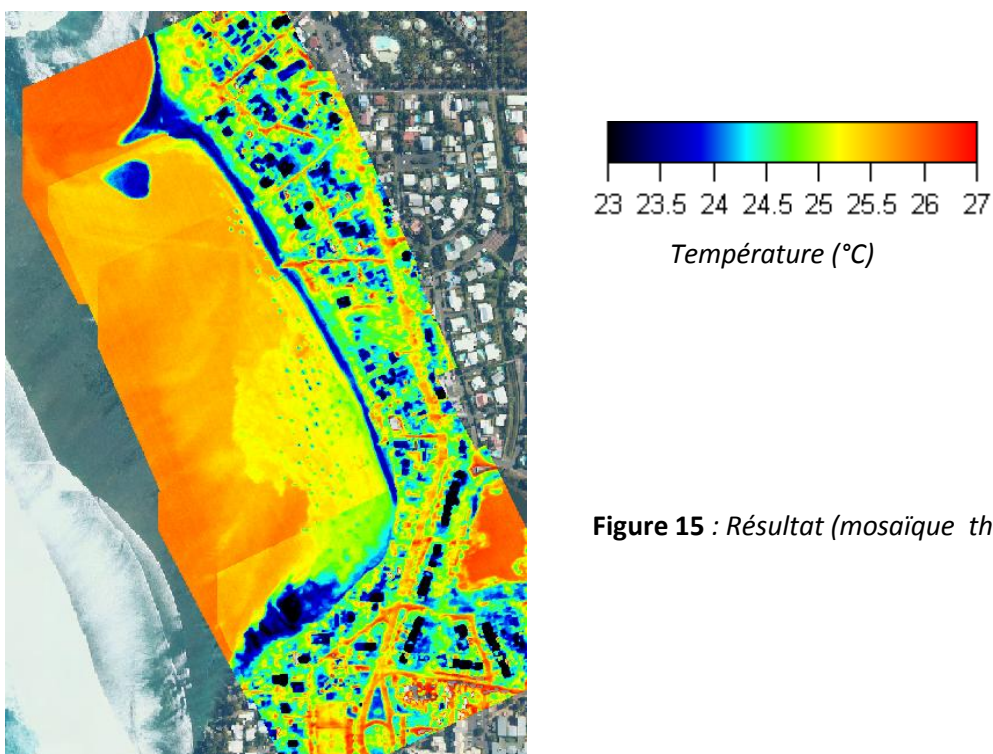


Figure 15 : Résultat (mosaïque thermique) à 700m.

IV - Radiométrie

a) Résolution radiométrique

Tout corps émet un rayonnement électromagnétique dont les propriétés dépendent de sa température. L'acquisition par caméra thermique permet de mesurer ce rayonnement et de le convertir en température. En détectant le rayonnement émis, il est donc possible d'identifier et de cartographier de petites variations de température à la surface de la mer.

Il existe plusieurs technologies de conversion entre rayonnement et température. Dans notre cas, la mesure est effectuée grâce à une caméra thermique équipée de micro bolomètres servants de détecteurs. La valeur de ces minuscules résistances dont le nombre est égal au nombre de pixels de l'image, varie en fonction de la température. Cette variation est convertie en signal électrique, qui permet de recomposer l'image numérique.

Les caméras thermiques produisent donc une image des différences de températures. Il est ensuite possible de calculer des valeurs de température absolues à partir de courbes de calibration de la caméra. Néanmoins, la valeur obtenue ne tient pas compte des paramètres extérieurs. Il est donc nécessaire de calibrer la caméra pour obtenir des températures absolues précises.

A chaque pixel de l'image correspond une valeur numérique. L'ensemble des valeurs est contenu dans un tableau à deux dimensions constituant l'image. La valeur stockée pour chaque pixel est codée sur un certain nombre de bits déterminant sa couleur ou son intensité, on l'appelle profondeur de couleur.

En général cette information est étalée sur une palette allant de 0 à 255 pour les images codées sur 8 bits. En d'autre terme, chaque case du tableau à deux dimensions représentant l'image va contenir un nombre indiquant l'indice de la couleur à utiliser (0 pour le noir, 255 pour le blanc) (figure 16).

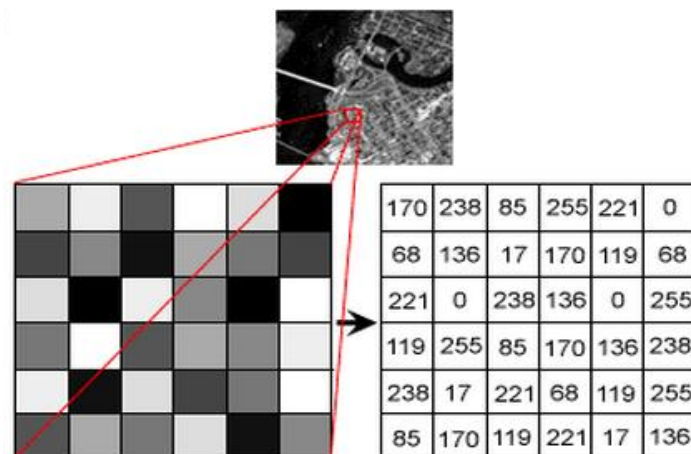


Figure 16 : Codage d'une image en 8 bit, en nuance de gris

Les objets réels sont ainsi représentés par ces distributions de tons de gris ou de couleur, qui grâce à la capacité interprétative de notre cerveau, nous permet de les associer aux images mentales que nous possédons. Cette notion est importante puisque notre vue ne permet pas d'identifier l'infrarouge thermique dans la nature, ce qui nous oblige à utiliser des fausses couleurs.

b) Mesures thermiques en domaine marin

Les mesures thermiques sont influencées par différents facteurs naturels, physiques, ou instrumentaux. Nous détaillerons dans ce point les deux paramètres principaux qui peuvent entraîner une erreur, à savoir l'absorption atmosphérique, et la dérive instrumentale du capteur.

i) absorption atmosphérique

Sur les images de la mission de novembre 2011, nous avons observé des différences de températures mesurées en fonction de l'altitude de vol. Deux profils de température ont été extraits des images thermiques acquises à 300m et à 1000m. C'est au niveau d'une forte anomalie thermique sur le site de l'Etang salé que ces résultats sont les plus significatifs

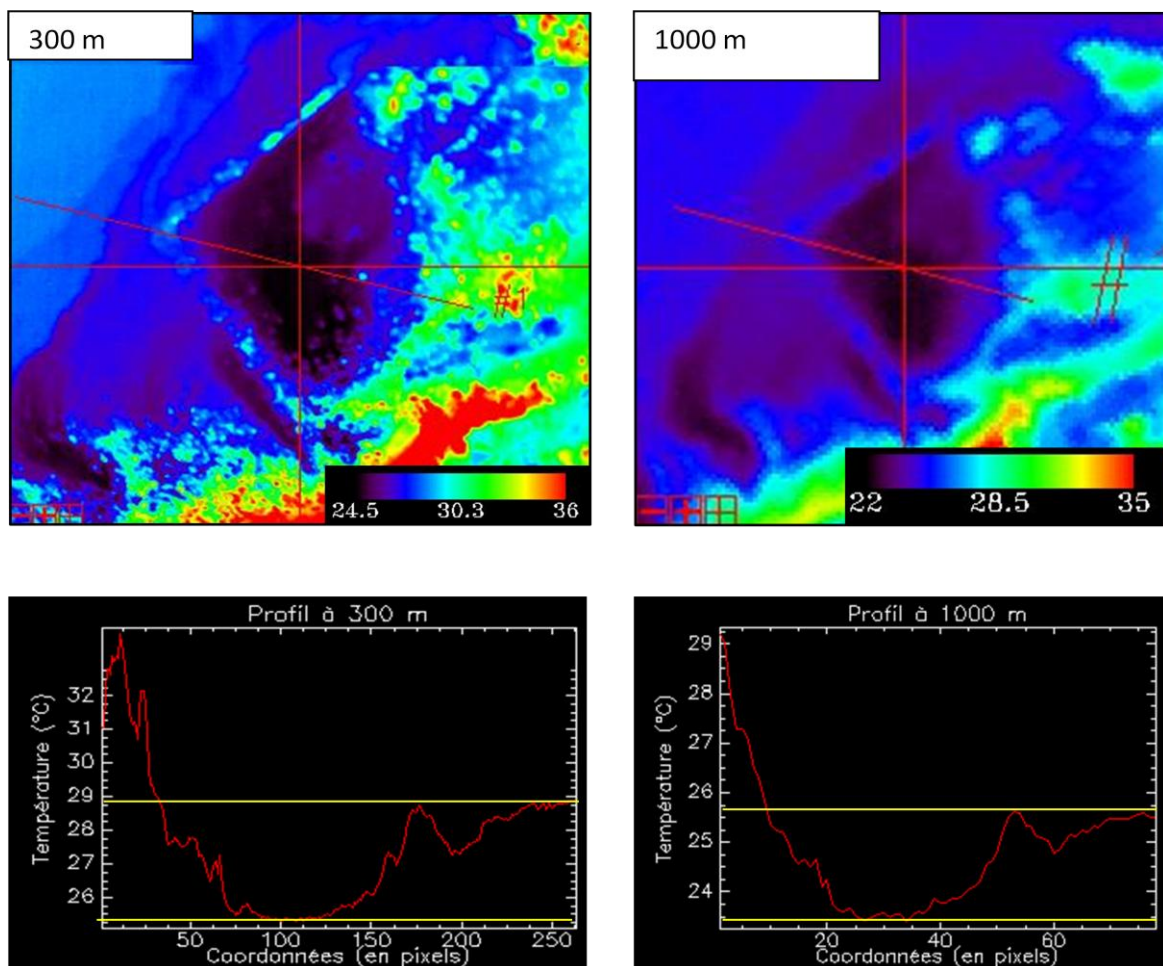


Figure 17 : mise en évidence de l'absorption atmosphérique. On observe environ 3 degrés de différence entre une acquisition à 1000m et une à 300m.

Ces deux profils montrent la même forme globale du signal. Les variations haute fréquence du profil à 300m (Figure 17b) sont dues à la meilleure résolution au sol pour un vol à basse altitude (tableau 1).

Par contre, nous pouvons observer une différence d'environ trois degrés sur l'ensemble du profil (figure 17). Ce décalage constant correspond à un phénomène d'absorption atmosphérique. La couche d'atmosphère présente entre le capteur et la surface du lagon absorbe une partie du rayonnement thermique émis par le lagon. L'épaisseur de la zone absorbante varie en fonction de l'altitude de la plate-forme

Cette couche est plus grande pour l'acquisition à 1000m. Le rayonnement du lagon est donc absorbé de manière plus importante, ce qui entraîne une diminution de la température mesurée.

ii) précision instrumentale

Les caractéristiques fournies par le constructeur de la caméra thermique infratech indiquent une précision relative de +/- 0.1°C. Nous avons pu vérifier cette précision en analysant deux images thermiques successives présentant un fort recouvrement (figure 18). Les images ont été acquises à 3 secondes d'intervalle.

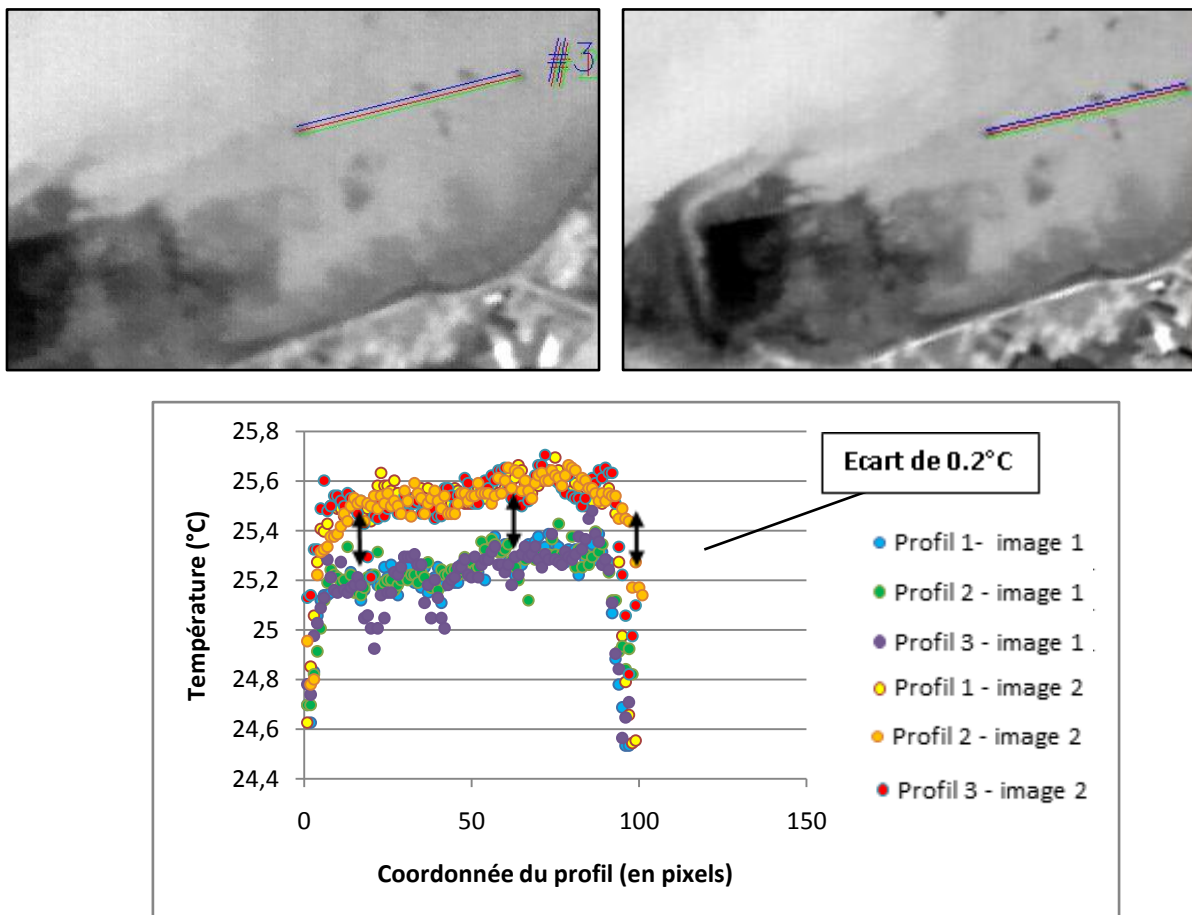


Figure 18 : mise en évidence de la précision instrumentale. Profils tracés à la même position, sur deux images successives

Un écart de 0.2°C entre les profils extraits à la même position géographique sur les deux images est visible. Cet écart, du à la sensibilité de la caméra, peut être également influencée par les mouvements de l'hélicoptère, qui ne permettent pas aux micro bolomètres de revenir à leur équilibre.

Ces différentes imprécisions, montrent la nécessité de calibrer les mesures aériennes avec des données in situ acquises simultanément, avec des capteurs mesurant des températures absolues.

c) Mesure in situ

L'acquisition de données in situ s'est faite en deux temps. Lors de la mission une acquisition simultanée avec la mesure aérienne, pour déterminer les températures de surfaces et l'évolution de la température en un point donné a été réalisée. Nous avons ensuite effectué, quelques mois plus tard une acquisition visant à déterminer l'évolution de la température dans toute la colonne d'eau, sur une journée complète.

i) Mesures de surface

Les mesures de surface, réalisées simultanément avec les acquisitions des images ont été effectuées sur une plage de temps d'environ 1 heure. Deux sondes de thermosalinomètre ont été mises en œuvre pour chaque site d'étude. Un opérateur à pied effectuait des mesures ponctuelles, dans une frange proche de la plage, en se focalisant plus particulièrement sur les anomalies thermiques (figure 19). L'autre opérateur effectuait les acquisitions à l'aide d'une sonde programmée pour effectuer une mesure toute les deux secondes. Et ceci en parcourant l'intégralité de la surface du lagon en kayak.

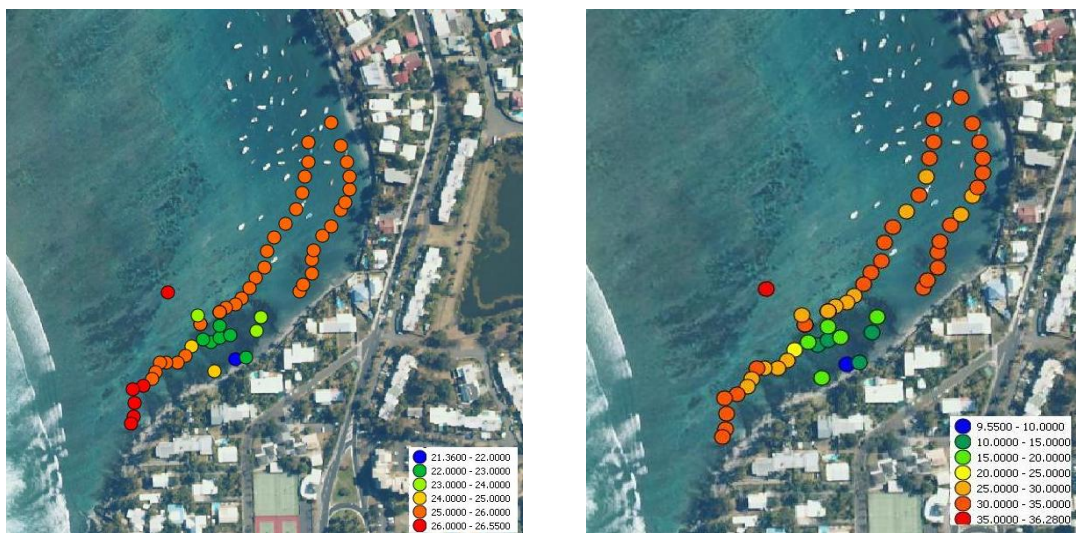


Figure 19 : Exemple de mesures effectuées dans le lagon de l'Etang salé par l'opérateur qui se déplaçait à pied. Température à gauche, conductivité à droite.

On détecte bien une forte anomalie de température et de salinité au sud du lagon, sans toutefois connaître sa position en détail.

On peut également noter la bonne corrélation entre la température et la salinité. Les cartes d'anomalies thermiques correspondent donc bien au positionnement des résurgences d'eau douce (figure 20).

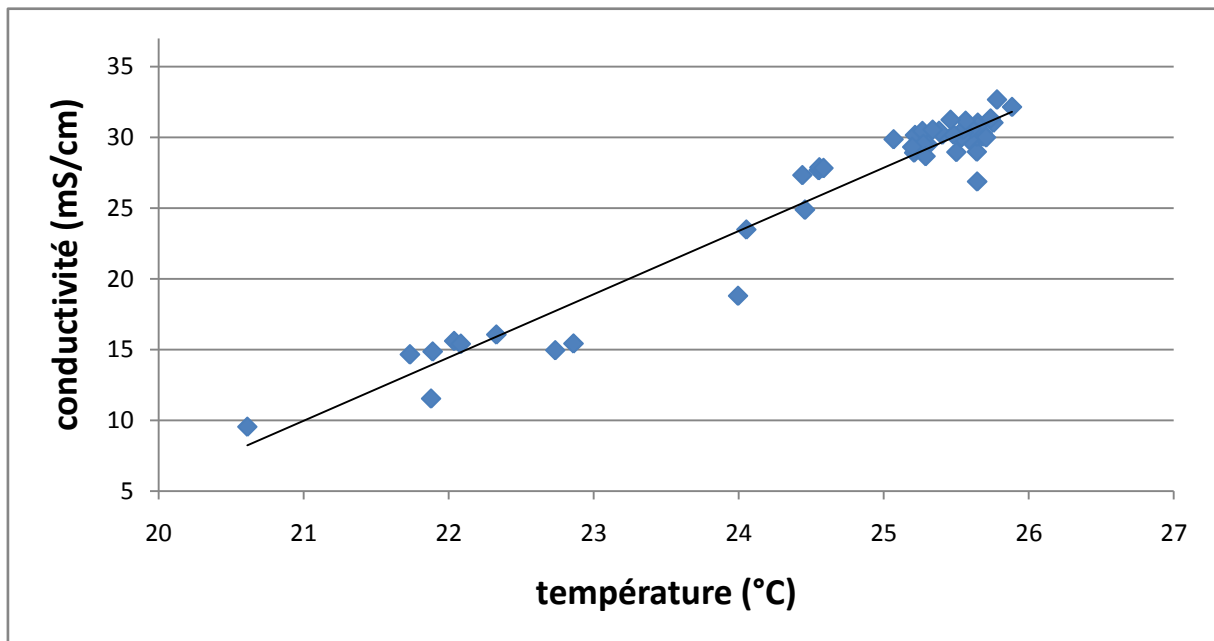


Figure 20 : Courbe de corrélation entre la température et la salinité pour les mesures faites par l'opérateur à pied.

ii) Mesures en un point fixe

Les mesures in situ ont été effectuées sur une durée d'environ 1h15. Nous avons donc mesuré en un point l'évolution temporelle de la température de surface afin de corriger par la suite les acquisitions in situ (figure 21).

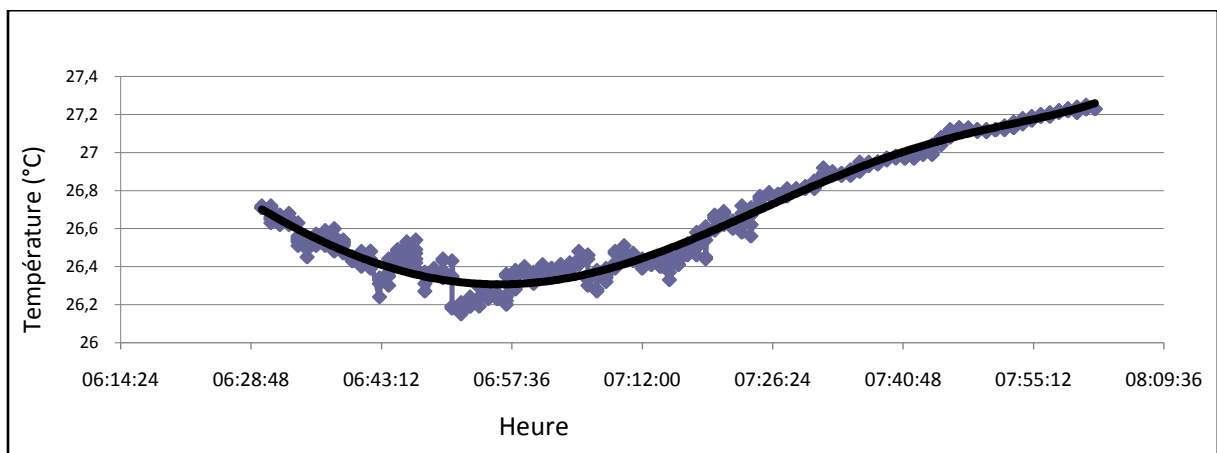


Figure 21 : évolution de la température en un point fixe, durant l'acquisition des données in situ.

Nous pouvons donc observer un réchauffement solaire dès qu'il rayonne directement sur la surface de l'eau, vers 6h55. On observe une augmentation progressive de la température d'un degré jusqu'à la fin de l'acquisition vers 8h.

Ces données nous ont permis de corriger les mesures de surface en fonction de leur heure d'acquisition et ainsi s'affranchir des effets du réchauffement solaire. L'acquisition aérienne ayant eu lieu à 7h15 sur ce site, nous avons appliqué un offset de température aux mesures de surface afin de revenir à la température de référence qui a été mesurée au moment de l'acquisition aérienne.

iii) Mesures dans la colonne d'eau

Les mesures sur site, utiles à la correction des données aériennes, sont effectuées à une profondeur d'environ 10cm sous la surface de l'eau. Cette profondeur peut varier de quelques cm en fonction du positionnement de la sonde par l'opérateur, ou en fonction de la vitesse du kayak.

Afin d'évaluer l'impact de la variabilité de la température dans la colonne d'eau, nous avons effectué une manipulation en avril dernier pour déterminer le gradient de température dans la colonne d'eau, et son évolution au cours d'une journée.

Nous avons mesuré le gradient de température naturel (avant réchauffement solaire) sur 11 points de mesure ayant une profondeur et une position homogène par rapport aux différentes passes du lagon (figure 22).



Figure 22 : Position des 11 points de mesure où ont été déterminés des gradients de température naturels, avant réchauffement solaire. Le point 6 correspond à la position de la mesure d'évolution de la température pendant une journée.

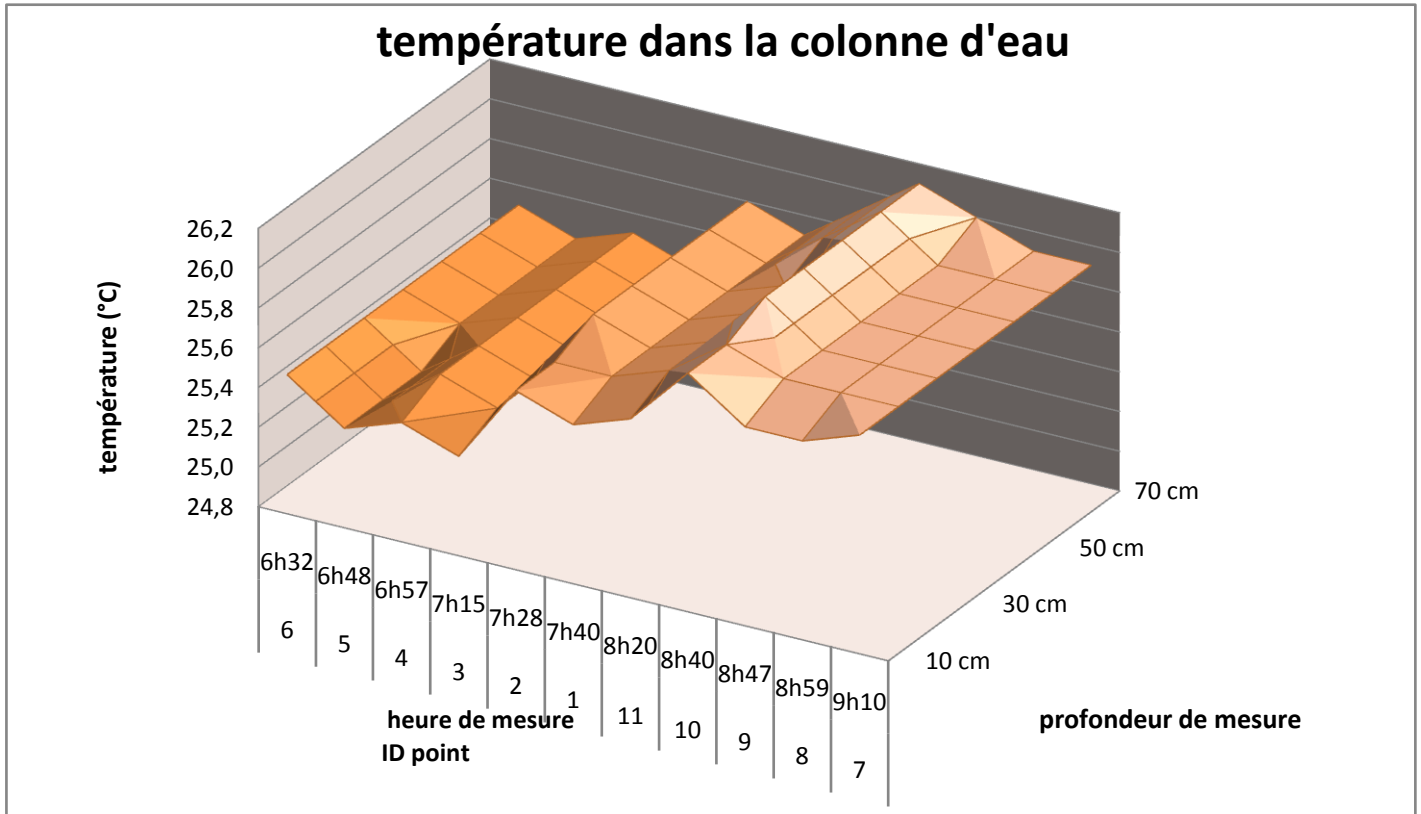


Figure 23 : gradient de température naturel (avant réchauffement solaire) dans la colonne d'eau, pour les 11 points de mesures. Augmentation d'environ 0.1°C sur une profondeur de 70cm.

Le gradient de température est peu variable dans la colonne d'eau (figure 23). On a en moyenne une augmentation de 0.1°C pour un point donné, avec l'augmentation de la profondeur. On remarque aussi que la température globale a tendance à augmenter en fonction de l'heure de mesure. On retrouve ici l'effet du réchauffement de la température ambiante entre 7 et 9h, car il n'a pas été possible d'effectuer toutes les mesures avant le réchauffement solaire.

Ces courbes nous montrent que l'impact de la profondeur est faible sur la mesure de la température. De plus nous avons étudié l'évolution de la température, à 4 profondeurs différentes, sur l'intégralité d'une journée (figure 24).

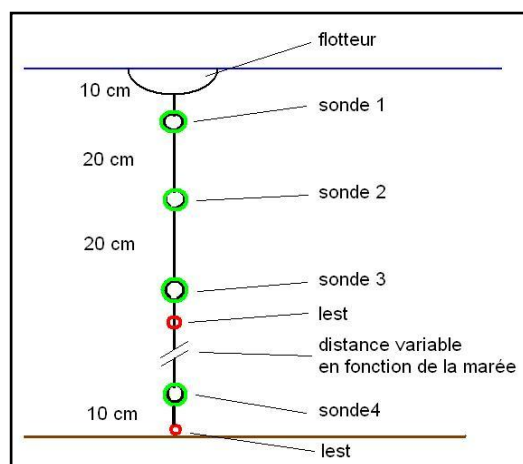


Figure 24 : Schémas de l'installation mise en œuvre pour mesurer l'évolution de la température dans la colonne d'eau pendant une journée.

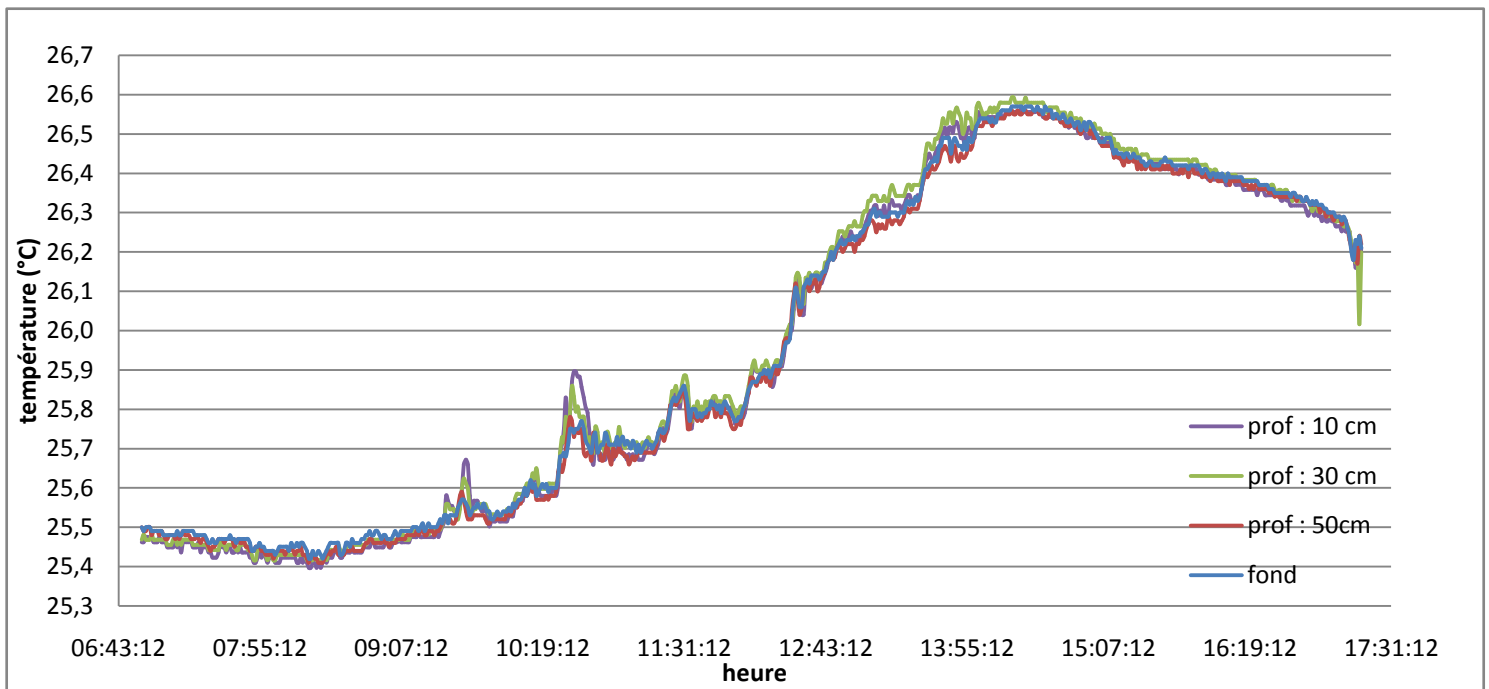


Figure 25 : évolution de la température dans la colonne d'eau pendant une journée.

Cette dernière mesure nous montre l'homogénéité de la température dans la colonne d'eau en fonction de l'heure de la journée (figure 25).

Les petites variations de température dans la colonne d'eau (gradient naturel avant réchauffement), ainsi que l'évolution quasi uniforme de la température le long d'une journée nous montre que les variations de profondeur lors des acquisitions in situ n'ont pas d'influence sur la précision de la mesure.

d) Validation des images thermiques

i) correction des données aériennes

Les mesures in situ, corrigées du réchauffement solaire, ont permis de calibrer les acquisitions aériennes, en corrigeant l'absorption atmosphérique.

On observe une bonne corrélation entre les acquisitions in situ et les mesures aériennes avec un coefficient de corrélation $R=0,9$. Néanmoins, la droite moyenne calculée par régression linéaire correspond à une fonction affine ne passant pas par l'origine. Elle est d'équation $y=0.638x+8.895$ où x est la température in situ et y la température aérienne (figure 26). Afin de corriger les acquisitions aériennes, nous avons appliqué la fonction réciproque à l'ensemble des pixels de l'image thermique.

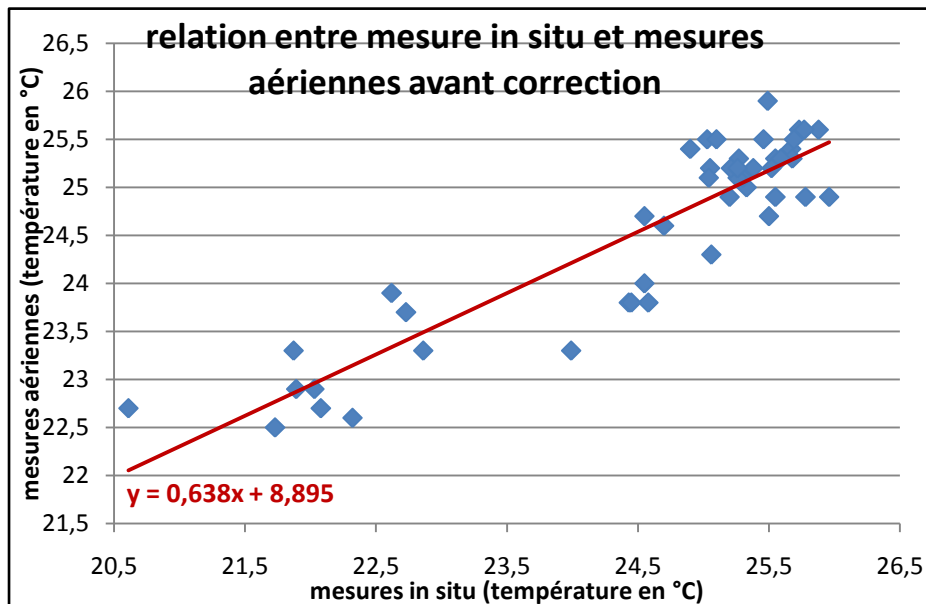
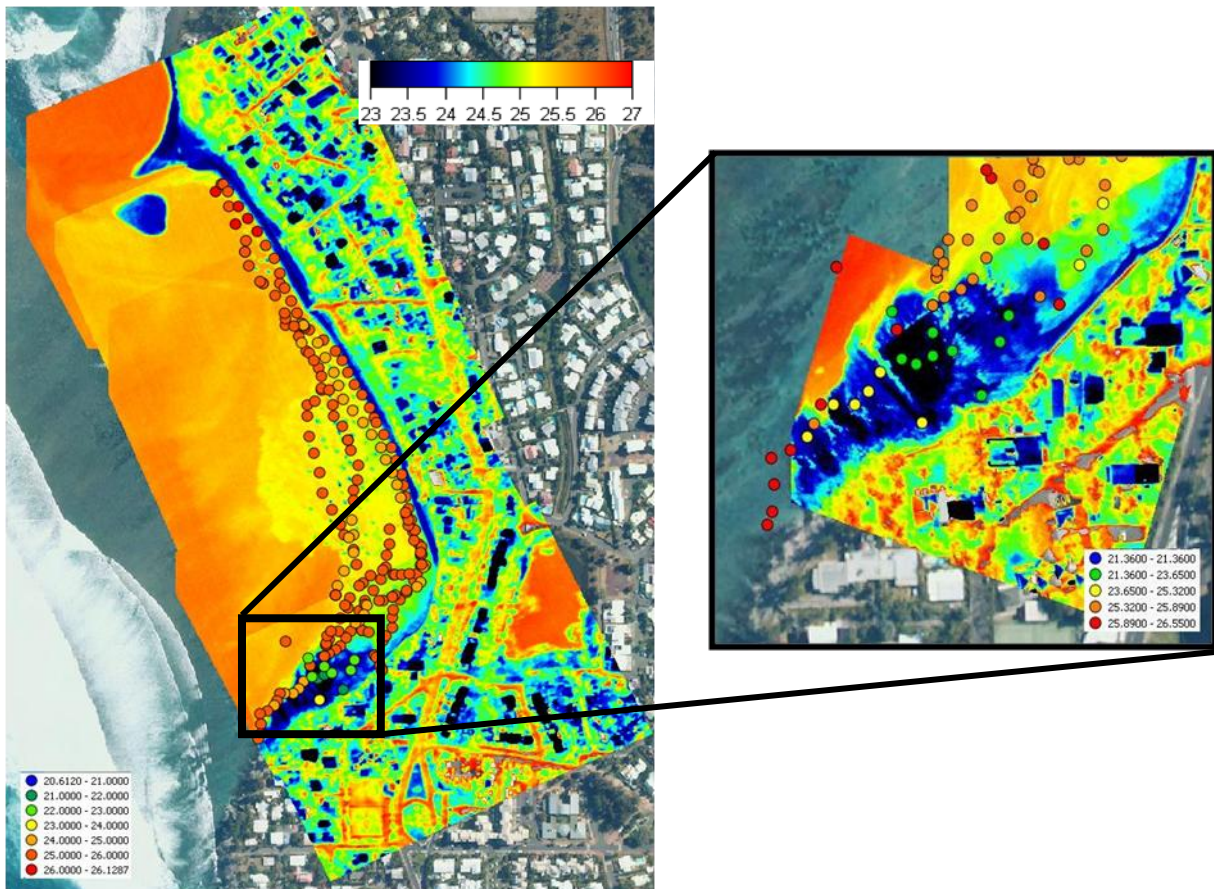


Figure 26 : corrélation entre les mesures aériennes et les mesures in situ, avant correction des données aériennes.

Après correction, on observe toujours une bonne corrélation entre les températures extraites de l'image aérienne et les acquisitions in situ. La droite moyenne extraite du graphique de corrélation est une fonction affine passant pas l'origine, d'équation $y=x$, ce qui permet de valider le traitement des données aériennes (figure 27).

Les données in situ permettent une très bonne calibration des mesures aériennes.

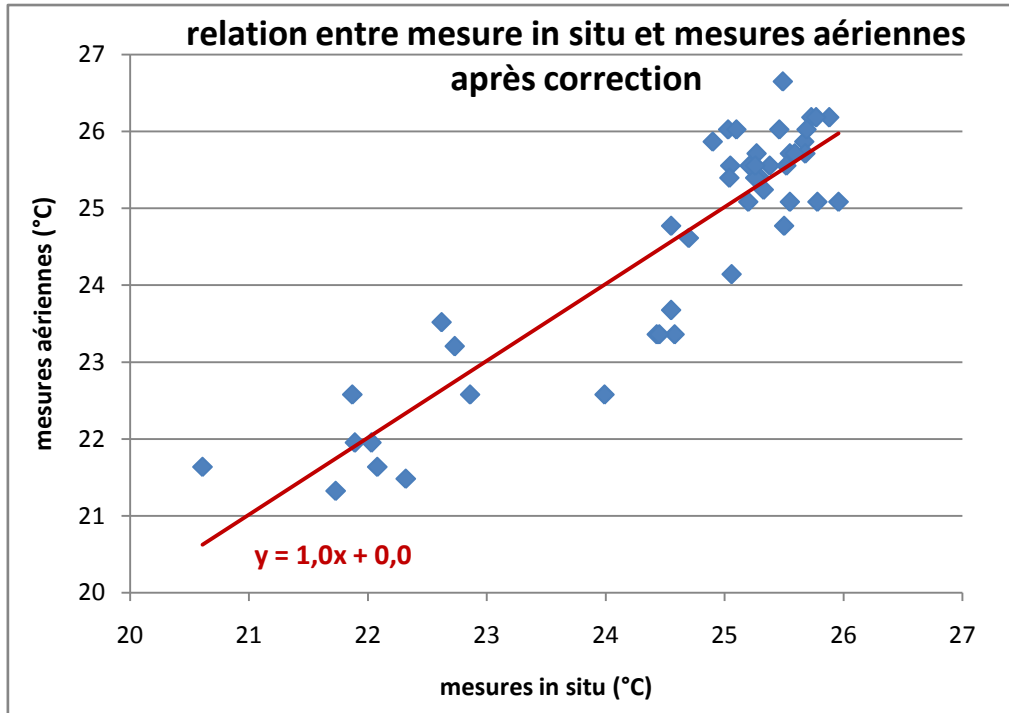


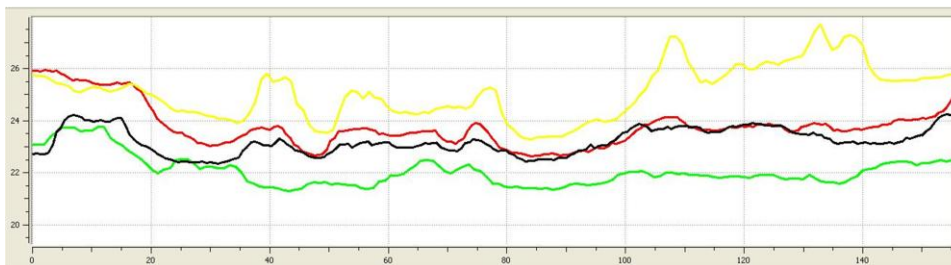
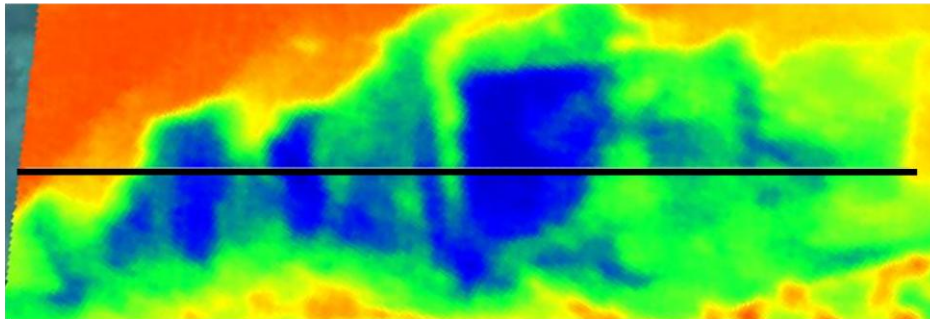
Figure 27 : corrélation entre les mesures aériennes et les mesures in situ, après correction des données aériennes.

ii) Comparaison multitemporelle

Les différentes missions mises en œuvre nous ont permis d'acquérir plusieurs jeux de données sur le site pilote de l'étang salé, à 4 dates différentes. Ces acquisitions répétées ont mis en évidence la répétabilité des mesures thermiques sur une zone active au niveau des résurgences d'eau douce.



Figure 28 : comparaison multitemporelle des données thermiques à 4 dates différentes. Position du profile superposé à l'acquisition optique (en haut), position du profile superposé à l'acquisition thermique (milieu). Valeurs des températures sur le profile, pour 4 date différentes (bas).



Ces 4 profiles de forme similaire montrent la robustesse de la technique d'imagerie thermique, mais également une stabilité de positionnement et d'amplitude de l'anomalie de température (figure 28). L'acquisition du 22 novembre a été réalisée en fin de journée. Les variations plus importantes sont dues à la température des affleurements rocheux après une journée d'exposition au soleil.

iii) Influence de la bathymétrie

Afin de déterminer l'influence de la bathymétrie sur la température de surface, nous nous sommes focalisés sur la partie nord de l'étang salé. En effet, cette zone présente un chenal d'environ 1.5m de profondeur (figure 29). Nous pouvons voir, sur l'acquisition thermique, une très faible anomalie de température au niveau du chenal. Au premier ordre, cette différence de température d'environ 0.1°C nous permet de dire que la température de surface n'est pas, ou très peu influencée par la bathymétrie. Néanmoins, cette faible variation pourrait correspondre à une circulation sous marine plus froide dans le chenal.

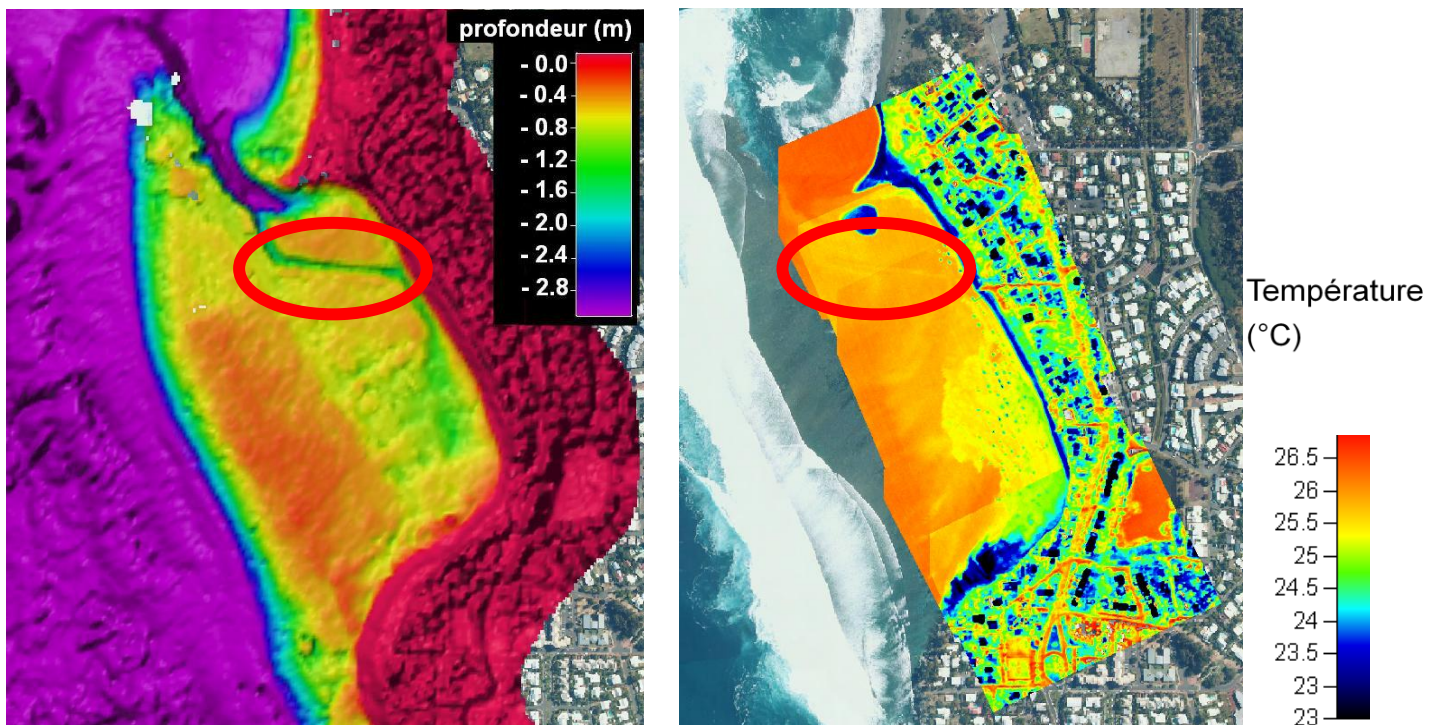


Figure 29 : comparaison entre la bathymétrie (littor3D) de l'étang salé (à gauche) et l'acquisition thermique (à droite).

V - Résultats

a) Acquisition Optique

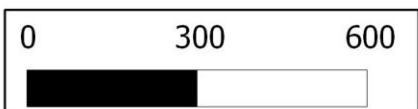


Projet EUTROLAG
Acquisition aérienne optique du lagon de Saint Leu le 08 04 2012

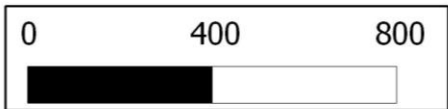


Projet EUTROLAG
Acquisition aérienne optique du lagon de Saint Pierre le 06 04 2012

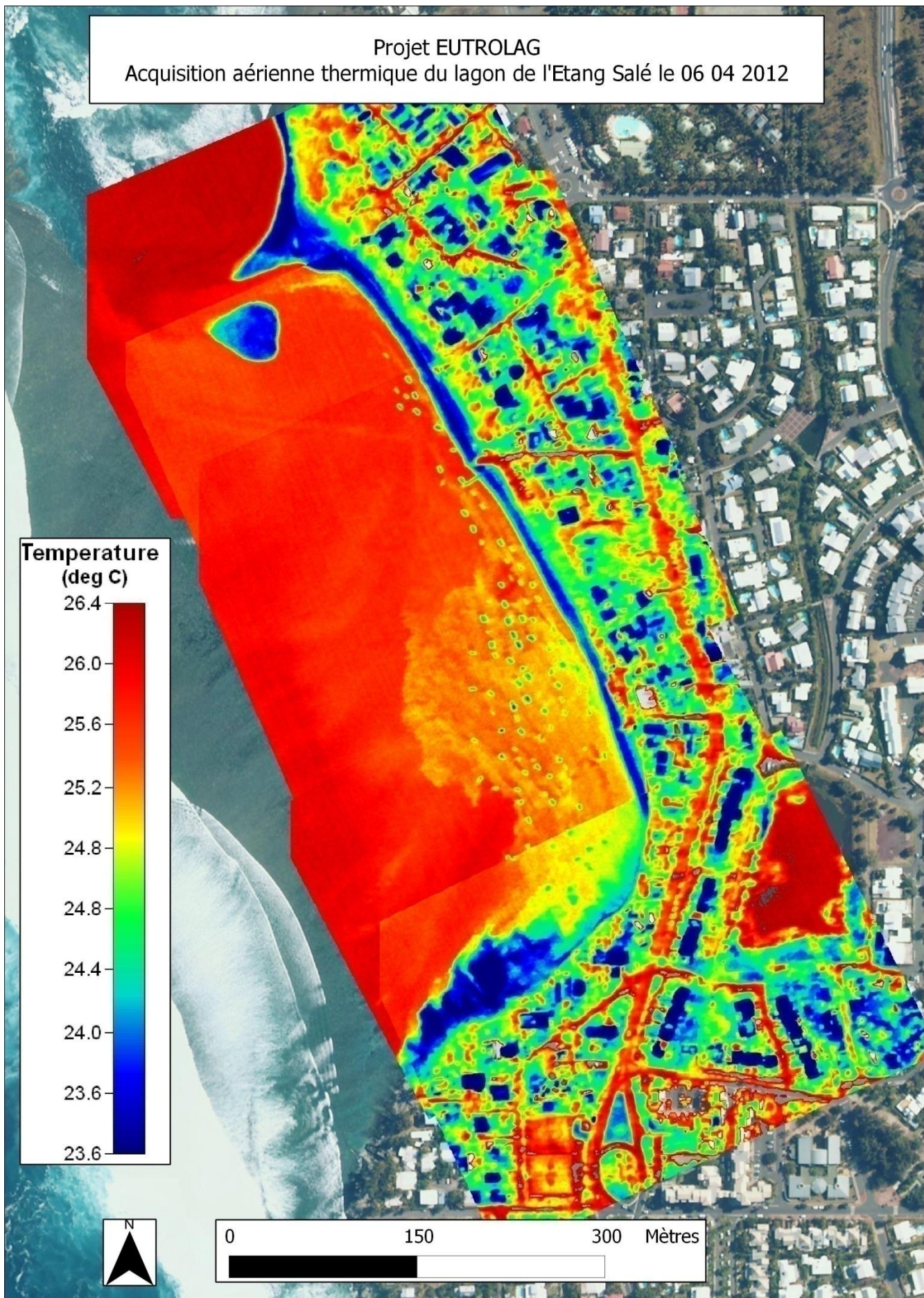




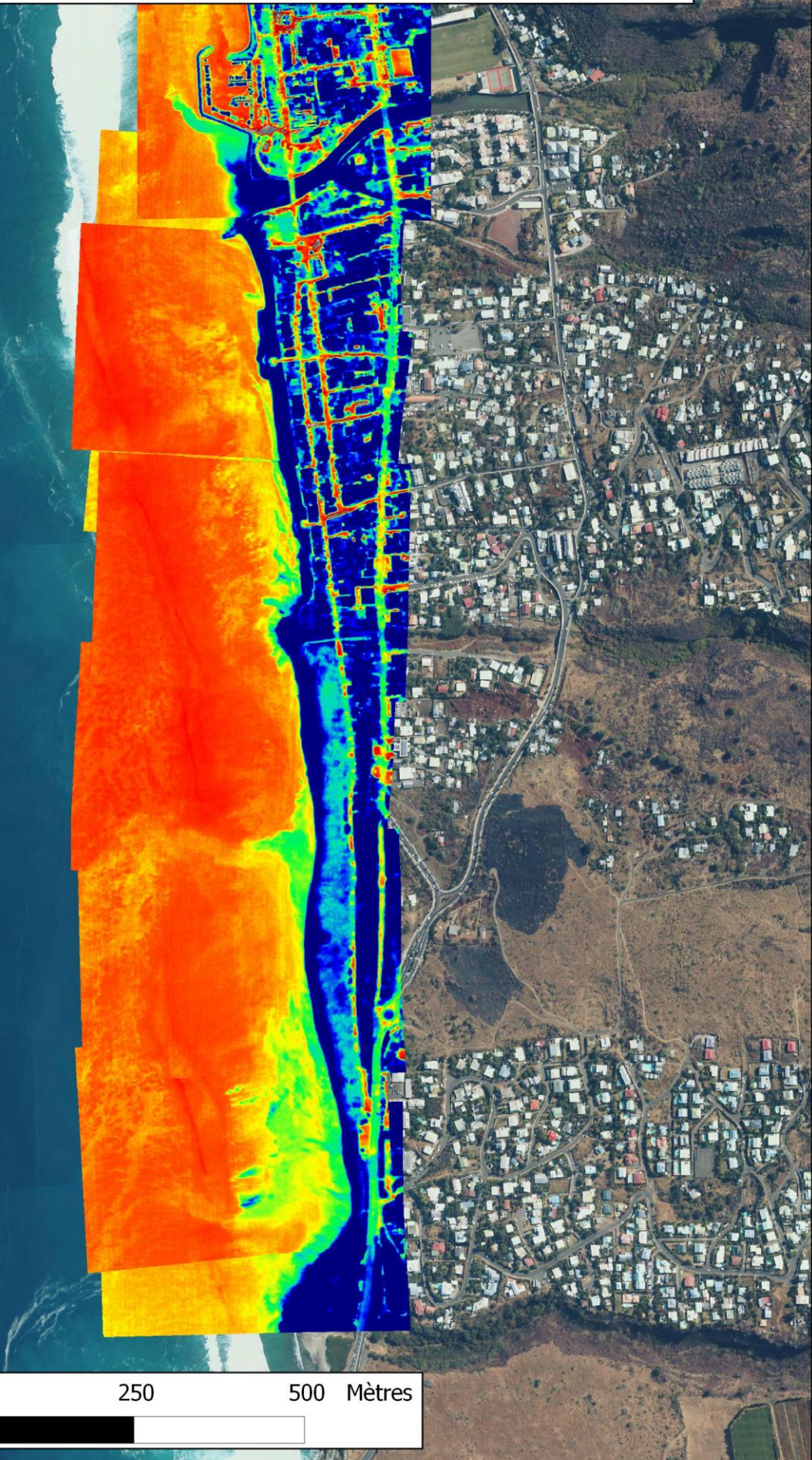
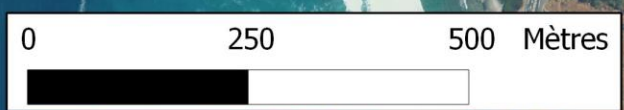
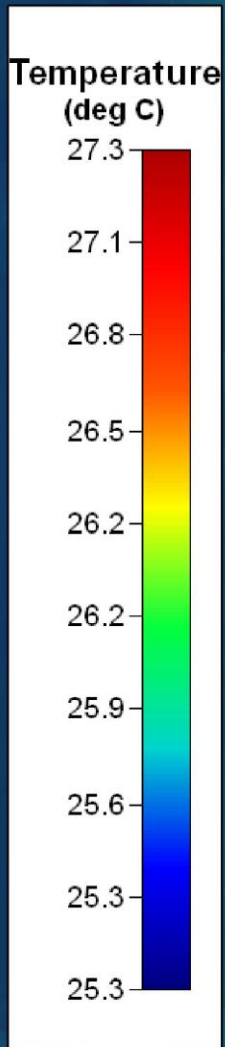
Projet EUTROLAG
Acquisition aérienne optique du lagon de la Saline le 08 04 2012 (zone Sud)



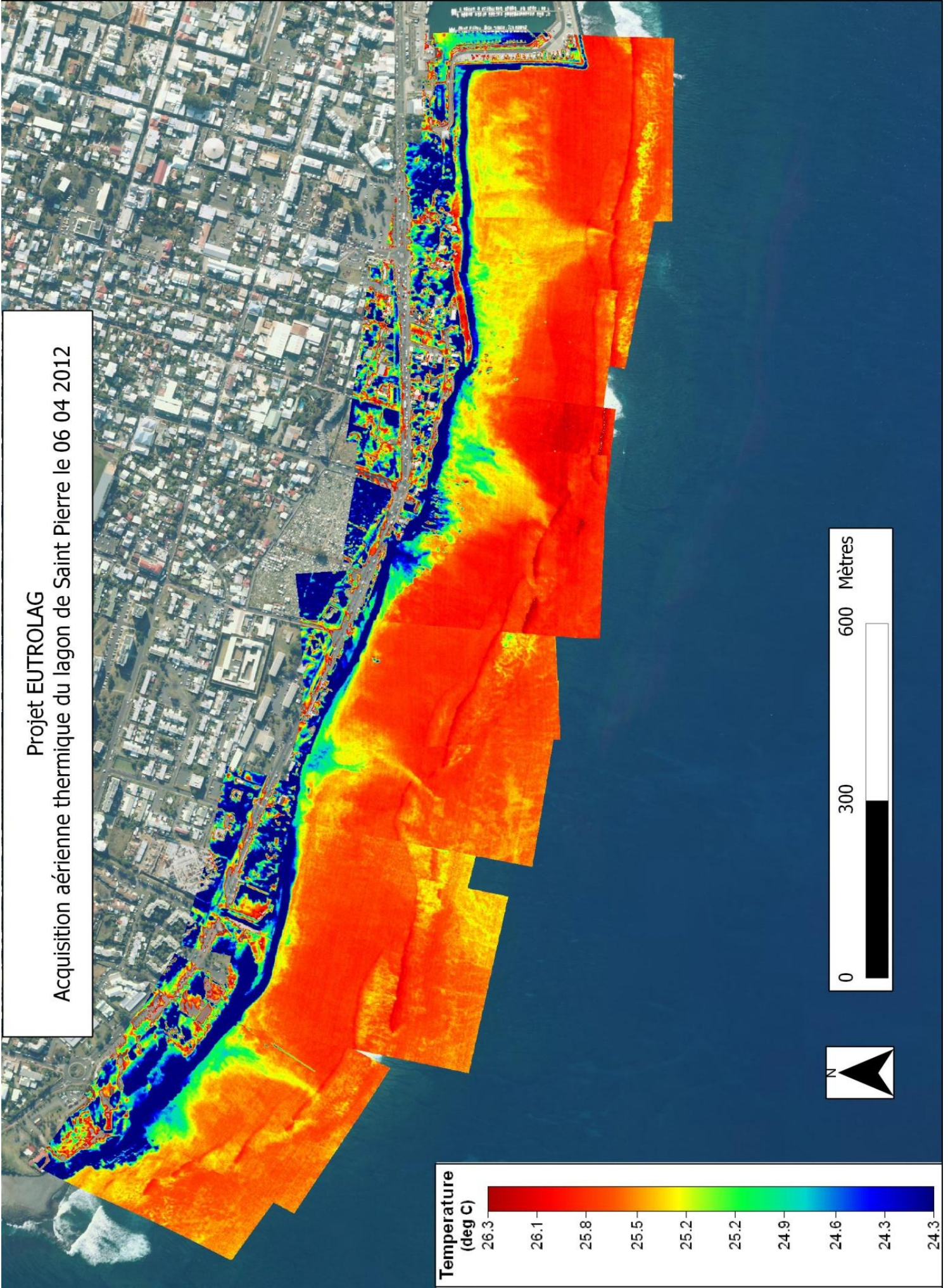
b) Thermique



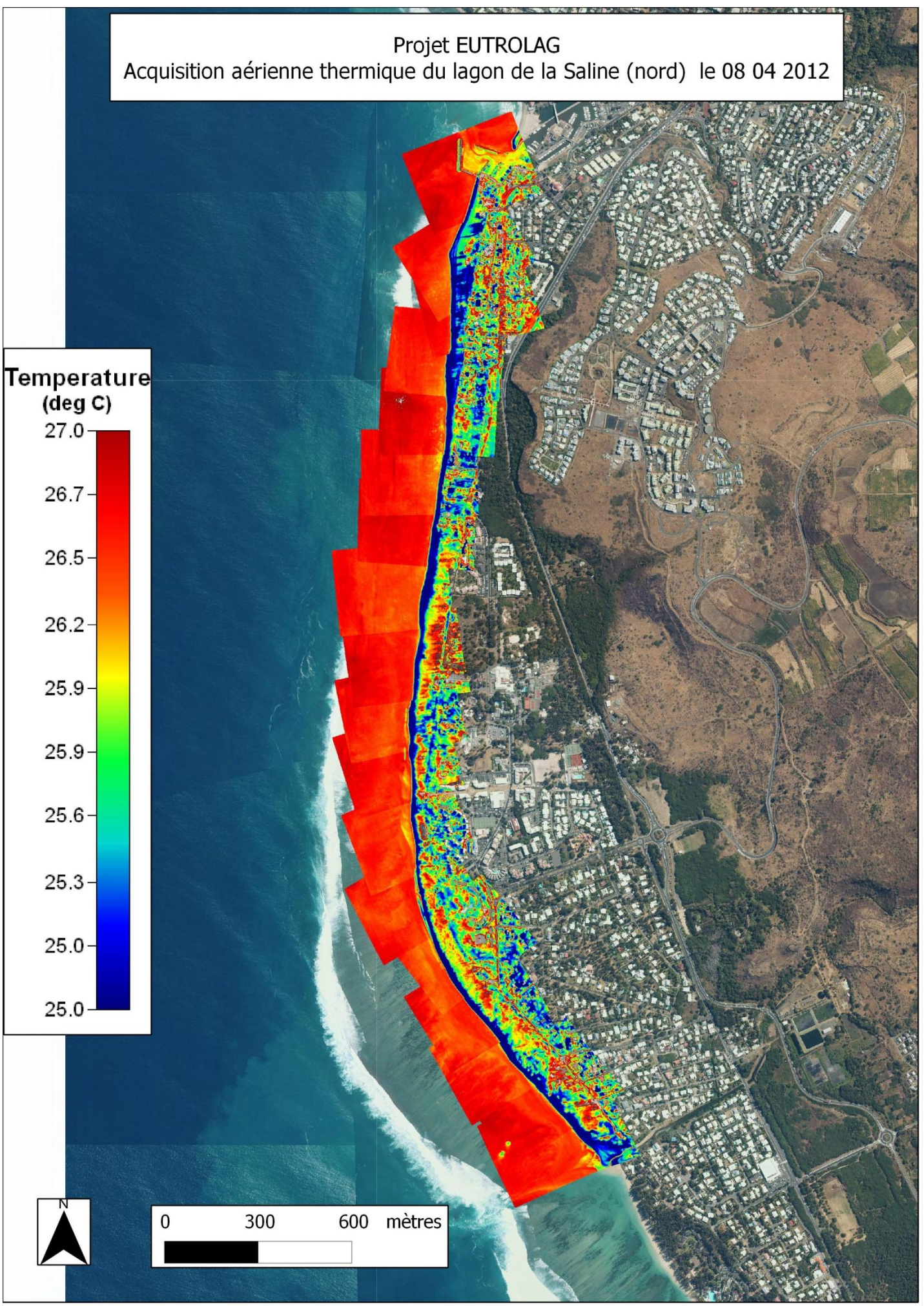
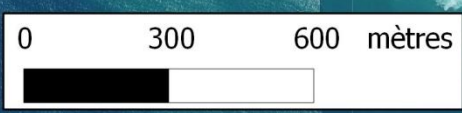
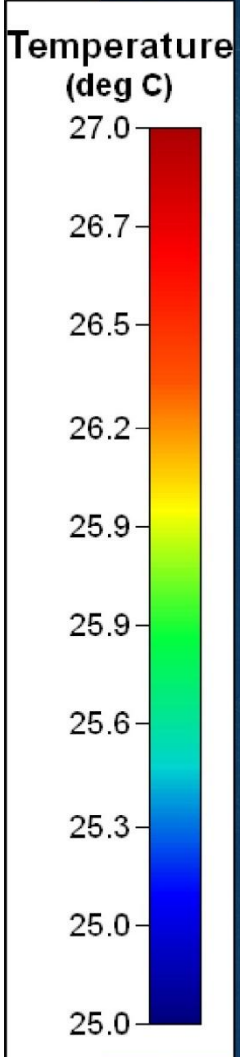
Projet EUTROLAG
Acquisition aérienne thermique du lagon de Saint Leu le 08 04 2012



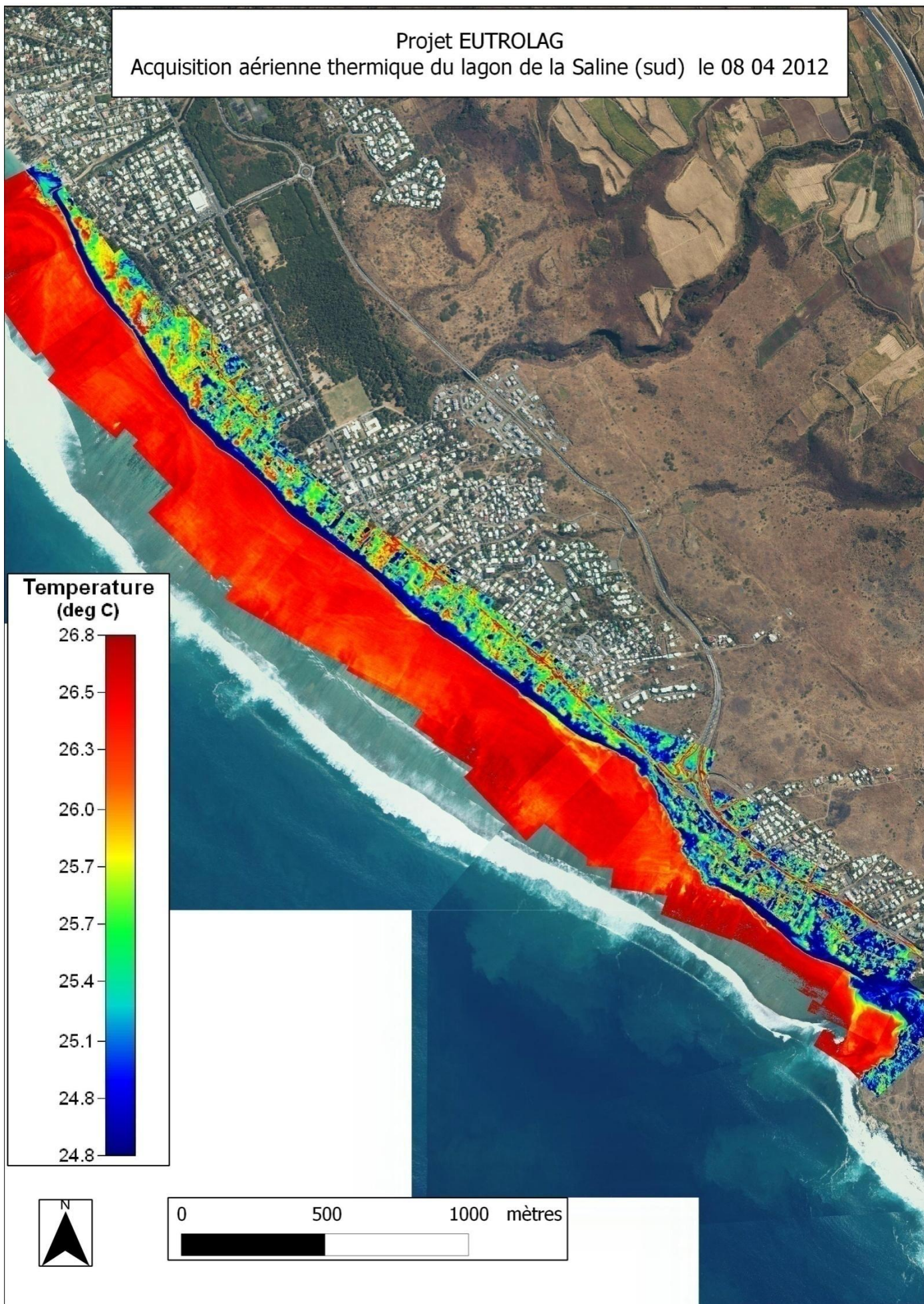
Projet EUTROLAG
Acquisition aérienne thermique du lagon de Saint Pierre le 06 04 2012



Projet EUTROLAG
Acquisition aérienne thermique du lagon de la Saline (nord) le 08 04 2012



Projet EUTROLAG
Acquisition aérienne thermique du lagon de la Saline (sud) le 08 04 2012



VI - Conclusion

Les résurgences d'eau douce dans les lagons réunionnais sont nombreuses, actives et réparties sur de vastes zones. Les moyens de mesure traditionnels de salinité ne sont pas adaptés à la création d'une cartographie exhaustive de ces résurgences.

Ces résurgences ayant une température plus faible que l'eau des lagons, la mesure par imagerie thermique est adaptée à leur détection. De plus, la mesure aérienne permet de couvrir une grande surface en un temps réduit.

Nous avons donc équipé un hélicoptère d'un capteur thermique pour effectuer les mesures de température de surface. Différents capteurs de positionnement ont également été mis en place pour corriger la géométrie des clichés et permettre de les assembler en une mosaïque géoréférencée.

L'acquisition thermique aérienne présente des erreurs de mesure dues à des paramètres physiques. Nous avons donc utilisés des mesures in situ, effectuées en parallèle de l'acquisition aérienne, pour corriger ces artéfacts et obtenir des températures absolues.

Les deux missions préliminaires en mai 2010 et novembre 2011 nous ont permis de déterminer la période optimale pour effectuer les acquisitions ainsi qu'un protocole de mesure précis afin d'être opérationnel pour les acquisitions principales qui se sont déroulées en avril 2012.

Les grandes quantités de données acquises pendant ces missions nous ont obligés à concevoir une chaîne de traitement semi-automatisée capable de traiter rapidement les acquisitions.

Les résultats des traitements permettent de caractériser la position et l'intensité des résurgences dans les quatre lagons étudiés.