



Co-funded by
the European Union

MODULE 08

PROGRAMME DE FORMATION

THERMOGRAPHIE

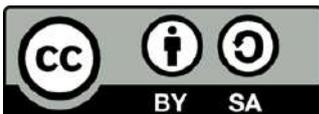


Dirección General de Formación
CONSEJERÍA DE ECONOMÍA,
HACIENDA Y EMPLEO



BZB
Bildungszentren des
Baugewerbes e.V.





Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

Table des matieres

1. Objectifs du module	5
2. Thermographie	6
2.1 Cas d'utilisation dans le secteur de la construction.....	7
Manque d'isolation et fuites d'air.....	7
Ponts thermiques.....	8
Localisation des systèmes de chauffage par le sol.....	8
Localisation de l'eau dans les toits plats.....	9
Analyse de lignes électriques.....	9
Humidité des ouvrages de génie civil.....	10
Analyse des panneaux photovoltaïques.....	11
Analyse des réseaux, du sol.....	12
2.2 Avantages des drones pour la thermographie :.....	13
2.3 Matériel requis.....	15
Matériel - Options pour les caméras thermiques.....	16
Matériel - Options pour un drone caméra thermique.....	18
2.4 Logiciel requis.....	23
3. Etude thermique à l'aide de drones - Théorie et pratique	25
3.1 Contenu théorique.....	25
3.2 Contenu pratique (vols d'entraînement en extérieur / intérieur si possible)...	28
Scénario de test.....	28
Pré-vol.....	28
En vol.....	30
4. Réalisation d'une inspection thermographique	31
4.1 Conditions.....	31
Sensibilité thermique.....	31
Valeur d'émission.....	32
Réflexion.....	32
Inspection des modules solaires à l'aide de caméras thermiques.....	34
4.2 Appareil photo.....	35
4.3 Analyse et rapports.....	36
La fonction image dans l'image (PIP).....	36
Fusion thermique.....	36
Rapport.....	37
5. Annexe a	40

DRONES4VET : participants et auteurs du projet Erasmus+

Equipe du CMQE HEREC Occitanie. France:

Régis Lequeux – professeur et ingénieur en génie civil, Lycée Dhuoda, Nîmes – coordinateur des 10 modules

Nicolas Privat - professeur et ingénieur en génie civil, Lycée Dhuoda, Nîmes

Eric Remola – professeur de génie civil, Lycée Dhuoda, Nîmes

Nicolas Vassart - professeur et docteur en génie civil, Lycée Dhuoda, Nîmes

Valerie Poplin - Directrice exécutive du CMQE

Equipe du MTU Ireland :

Sean Carroll, Maître de conférence, ingénieur en génie civil

Michal Otreba Inz, Maître de conférence, ingénieur en génie civil

coordinateurs des “Levelling & Follow-up sessions for educators”

University of Applied Sciences Kufstein Tirol, Autriche

Emanuel Stocker, Enseignant-chercheur en gestion des infrastructures et de l'immobilier. Manuel coordinateur.

Sarah Plank, Contrôleur de la Recherche et Développement

Equipe CRN Paracuellos. (DG Formación. Comunidad de Madrid) Espagne :

José Manuel García del Cid Summers, Directeur

Daniel Sanz, directeur de Dron-Arena

Santos Vera, technicien

Jorge Gómez Sal, chef de l'unité technique

Fernando Gutierrez Justo. Erasmus coordinateur

Promoteurs du projet

Equipe BZB Düsseldorf. Allemagne :

Frank Bertelmann-Angenendt, chef de projet

Markus Schilaski, chef de projet

Equipe DEX. Espagne – Gestion Erasmus+ :

Ainhoa Perez

Ignacio Gomez Anguelles

Diego Diaz Mori

Yvan Corbat

1. Objectifs du module

Ce module vous permet de comprendre l'analyse thermographique avec des drones. Les objectifs de la thermographie par drones comprennent l'identification des anomalies, l'évaluation des conditions d'isolation ou d'humidité, l'amélioration de l'efficacité énergétique et la surveillance de l'environnement. Ces applications offrent un moyen non intrusif, rentable et efficace de capturer des données thermiques à partir d'un point de vue aérien.

- Compétences souhaitées
- Description des parties du bâtiment exposées à l'effet thermique
 - Enveloppe : Façades et toits
 - Canalisations et équipement technique du bâtiment
 - Système solaire / photovoltaïque
- Identification des points faibles qui influencent le comportement thermique/énergétique du bâtiment,
 - Enveloppe
 - Contrôle de l'étanchéité à l'air
 - humidité
 - Système solaire / photovoltaïque
- Analyse des images thermographiques
- Équipement / Matériel
 - drone
 - Caméras
- Configuration de la caméra
 - Logiciel
- Préparation de la documentation / des rapports

2. Thermographie

La thermographie est une technique d'imagerie sans contact qui utilise le rayonnement infrarouge pour créer des représentations visuelles des variations de température à la surface d'un objet ou d'un organisme vivant. Elle repose sur le principe que tous les objets émettent un rayonnement infrarouge en fonction de leur température.

En thermographie, une caméra spéciale, appelée caméra thermique ou caméra infrarouge, est utilisée pour capturer le rayonnement infrarouge émis par les objets. La caméra détecte et mesure l'intensité du rayonnement infrarouge, puis la convertit en une image visuelle dont les différentes couleurs ou nuances représentent des températures différentes.

La thermographie est un moyen non invasif et non destructif de visualiser les différences de température, ce qui peut être utile dans un large éventail d'applications. Toutefois, il est important de noter que la thermographie est un outil de diagnostic et qu'il ne faut pas s'y fier uniquement pour établir des diagnostics définitifs. Elle est souvent utilisée en conjonction avec d'autres méthodes de diagnostic pour fournir une évaluation plus complète.

Les drones peuvent être utilisés pour la thermographie en les équipant de caméras thermiques spéciales. Ces caméras détectent le rayonnement thermique émis par les objets et peuvent l'utiliser pour créer des images de la température de surface des bâtiments et d'autres objets. Le pilote du drone le dirige ensuite dans la direction souhaitée et active la caméra thermique. Le drone vole alors autour des zones d'intérêt et capture des images thermiques. Celles-ci sont ensuite transmises à un ordinateur où elles peuvent être analysées par des experts.

L'analyse d'images thermiques peut être utilisée, par exemple, pour identifier des dommages ou des défauts dans les bâtiments qui ne sont pas visibles à l'œil nu. Elle peut également être utilisée pour vérifier l'efficacité énergétique des bâtiments et identifier les points faibles.

2.1 Cas d'utilisation dans le secteur de la construction

La thermographie par drone offre plusieurs avantages par rapport aux méthodes traditionnelles d'inspection thermique, comme l'amélioration de l'accessibilité, de l'efficacité et de la sécurité.

Manque d'isolation et fuites d'air

L'imagerie thermique est une méthode simple pour détecter les défauts d'un bâtiment, tels que le manque d'isolation, le décollement du plâtre et la condensation.

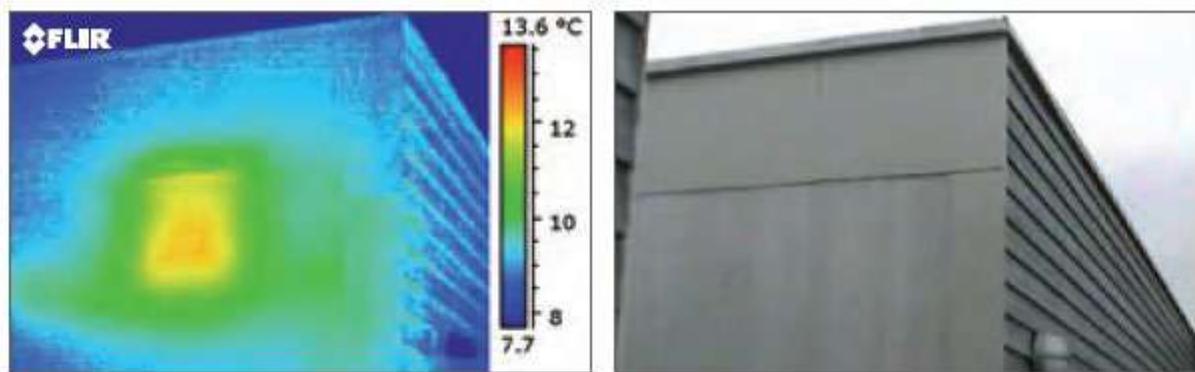


Figure 2-1: Isolation manquante dans la façade (FLIR Systems)

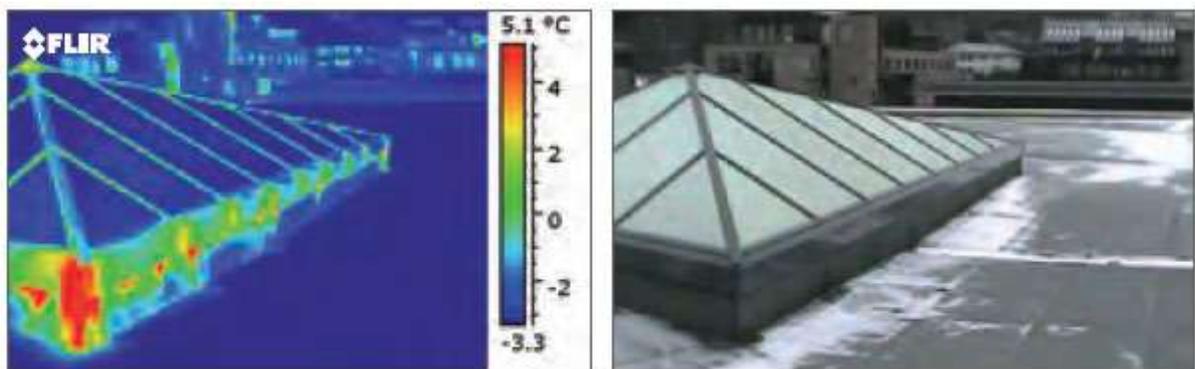


Figure 2-2: Toit en verre avec évacuation de l'air chaud (FLIR Systems)

Lorsqu'on utilise une caméra thermique pour rechercher une isolation défectueuse ou des pertes d'énergie, il devrait idéalement y avoir un écart d'au moins 10 °C entre les températures extérieure et intérieure. L'utilisation d'une caméra thermique dotée d'une résolution d'image élevée et d'une grande sensibilité thermique permet également de réduire l'écart de température.

Dans les climats froids, les inspections de bâtiments sont souvent effectuées en hiver. Dans les climats plus chauds, où il est important de vérifier l'isolation pour s'assurer que l'air frais produit par la ventilation ou la climatisation reste dans le bâtiment, les mois d'été sont idéaux pour ce type d'inspection.

Ponts thermiques

Une autre application est, par exemple, la localisation des ponts thermiques, qui indiquent les endroits d'un bâtiment où l'énergie est gaspillée. Un pont thermique est une zone où l'enveloppe du bâtiment a une résistance thermique plus faible. Cela est dû à des défauts de construction ou des constructions anciennes. La chaleur suit le chemin le plus facile de la zone chauffée vers l'extérieur, le chemin de moindre résistance.

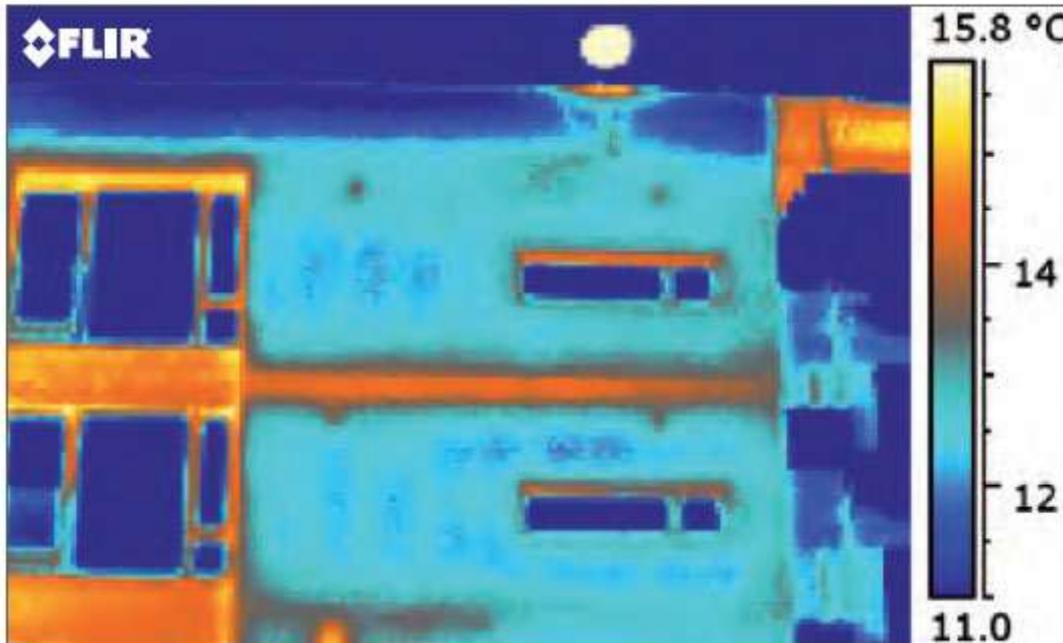


Figure 2-3: Pont thermique au plafond (FLIR Systems)

Localisation des systèmes de chauffage par le sol

L'imagerie thermique est une technique facile à utiliser pour localiser les tuyaux et les tubes et vérifier s'il y a des fuites, même lorsque les conduites d'eau se trouvent dans le sol ou sous le plâtre. La chaleur des tuyaux rayonne à travers la surface, ce qui permet de voir facilement l'évolution de la température à l'aide d'une caméra thermique.

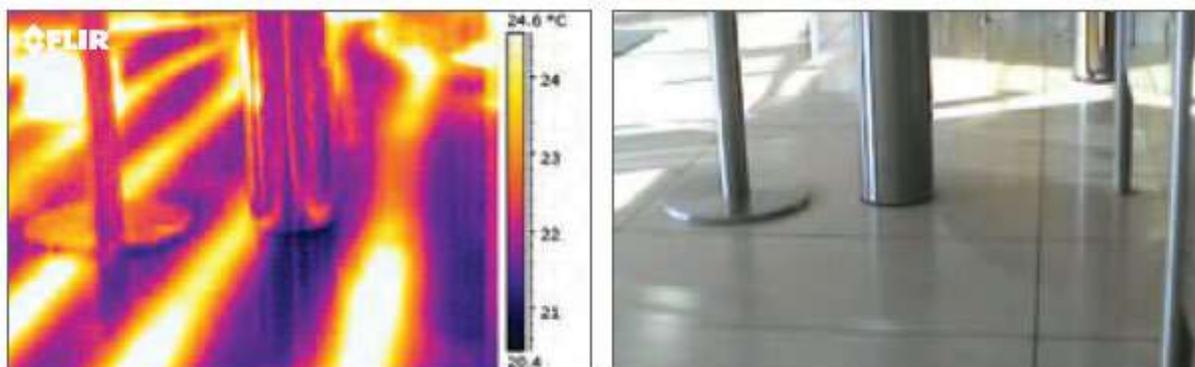


Figure 2-4: Localisation du système de chauffage (FLIR Systems)

Localisation de l'eau dans les toits plats

L'imagerie thermique est également utilisée pour détecter les fuites dans les toits plats. L'eau retient la chaleur plus longtemps que le reste du matériau de couverture et peut être facilement détectée à l'aide d'une caméra thermique en fin de soirée ou la nuit, après que le reste du toit se soit refroidi.

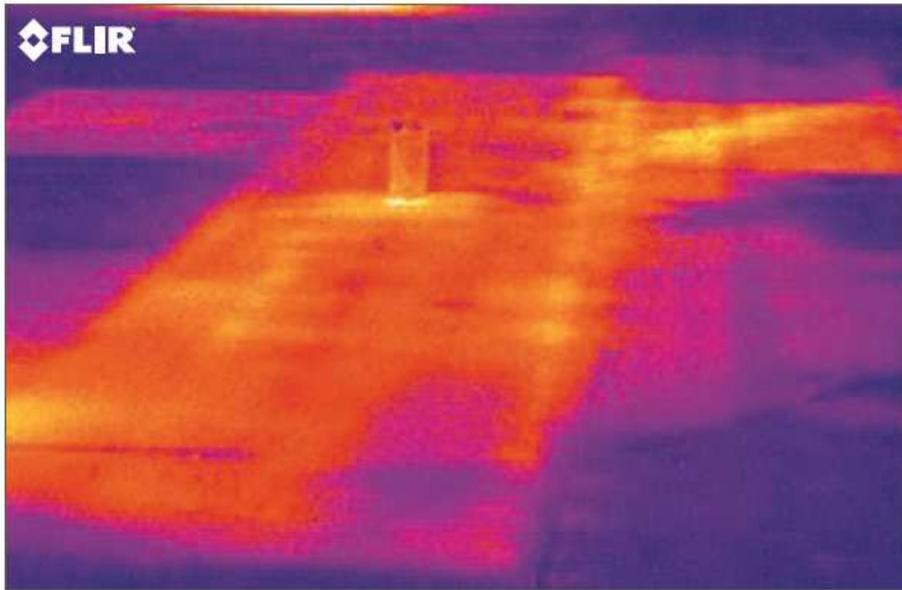


Figure 2-5: Localisation de l'eau dans un toit plat (FLIR Systems)

Analyse de lignes électriques

Un contact défectueux induit un échauffement des conducteurs et des contacteurs, ou une surtension dans des câbles de section insuffisante, ou une réduction de section de conducteur suite à la corrosion ou un frottement. Le drone permet de voir de près le phénomène sans danger.

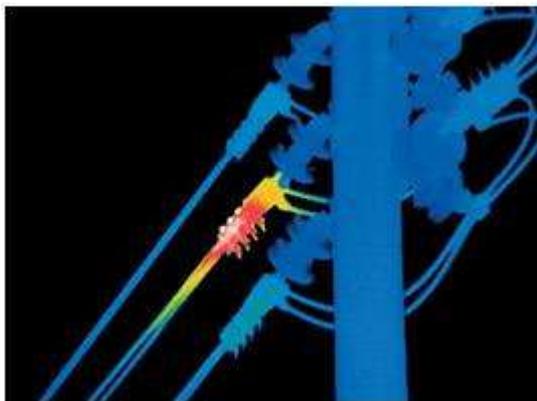


Figure 2-1 Raccordement défectueux qui s'échauffe (sachuin)

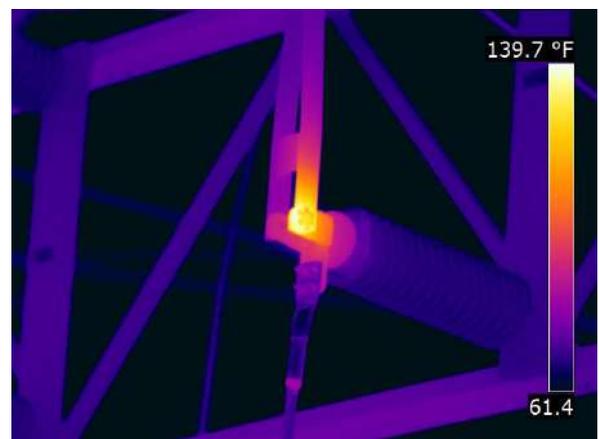


Figure 2-2 Contact défectueux (drone-thermal-camera.com)

Humidité des ouvrages de génie civil

L'humidité dans les ponts, les barrages ou les murs de soutènements (ou les bâtiments) est un facteur favorisant les pathologies du béton ou la corrosion de l'acier ou même le pourrissement du bois. Tous les ouvrages sont susceptibles d'être touchés par une persistance de l'humidité même par temps sec. L'analyse se fera toujours après un temps de séchage « normal » et avec comparaison avec d'autres parties similaires non touchées.

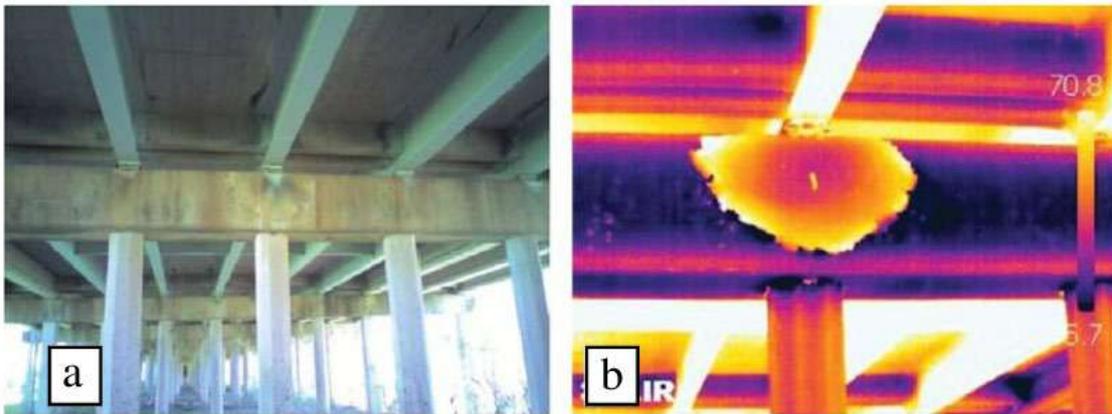


Figure 2-3 Poutre de pont humide par temps sec (semanticscolar.org)

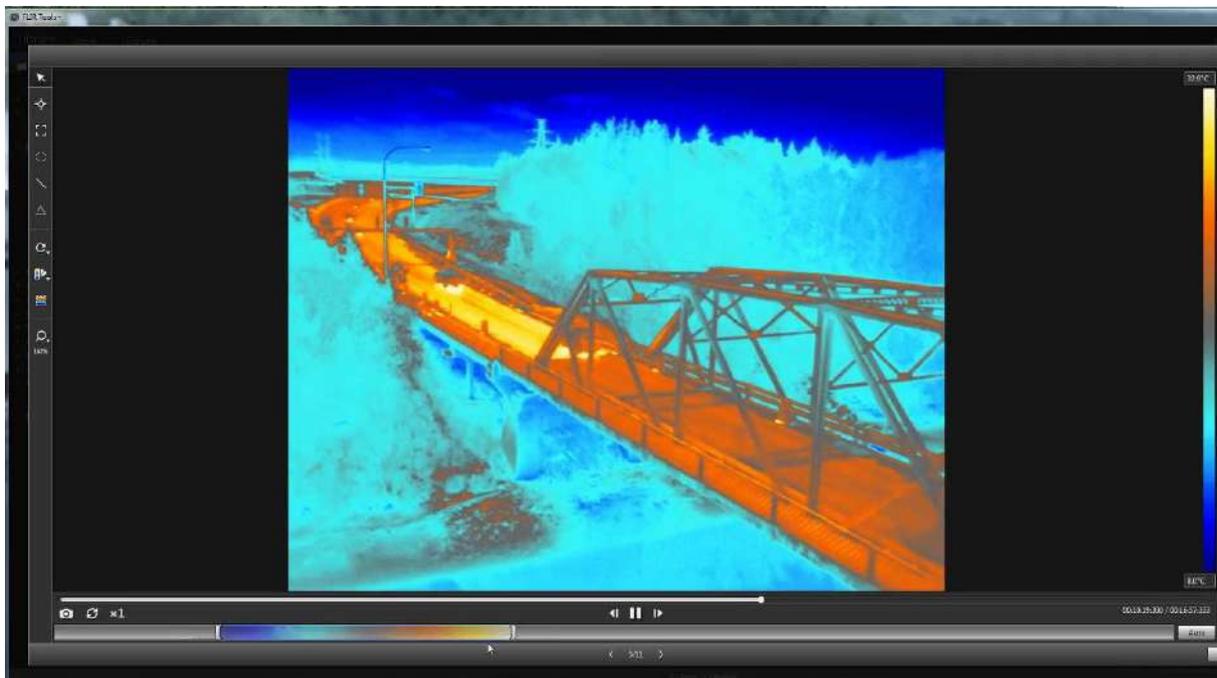


Figure 2-4 Analyse d'un pont métallique (Brunswick engineering)

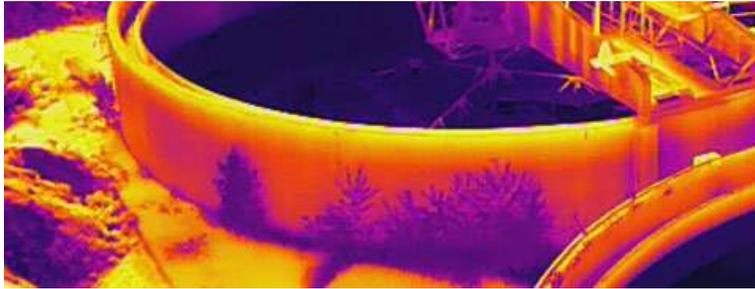


Figure 2-5 fuites d'eau dans des réservoirs de station d'épuration (3Dvirtual360.com.au)

Analyse des panneaux photovoltaïques

Les cellules qui ne sont plus dans leur état d'origine et qui sont cassées peuvent être détectées car elles sont plus chaudes que les autres, ou des contacts défectueux sont plus chauds que eux d'à-côté.

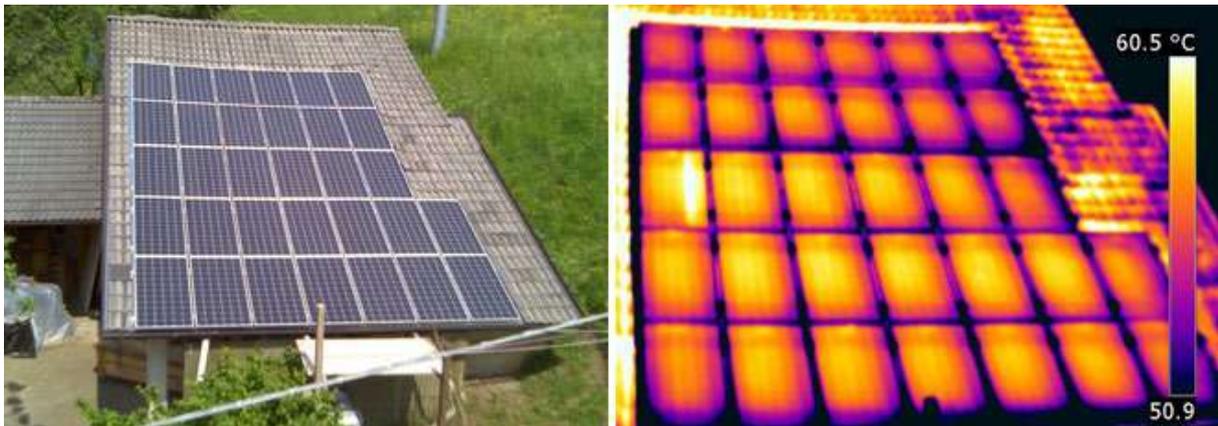


Figure 2-6 une bande de cellules est ici défectueuse (analistgroup.com)

De nombreux défauts peuvent apparaître simultanément : conatcts chauds, micro-onduleurs en surtension, panneaux ou bandes de panneaux hors-circuit...

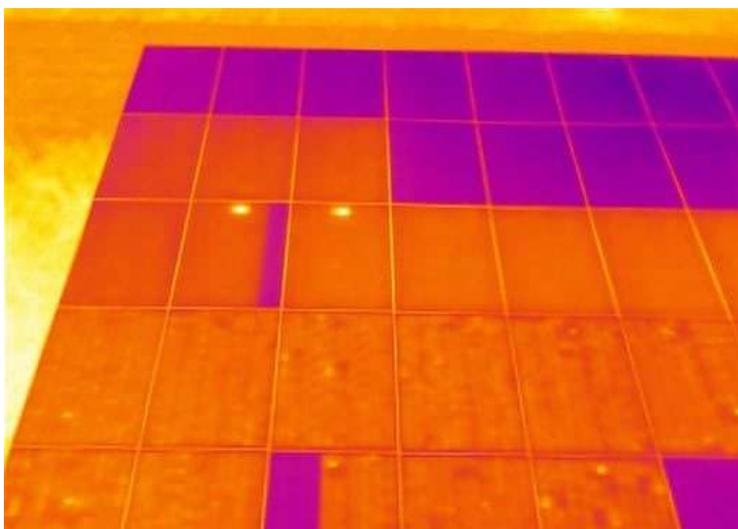


Figure 2-7 Plusieurs défauts simultanés (diagnosticphotovoltaïque.fr)

Analyse des réseaux, du sol

Les drones, en coopération avec une caméra thermique, permettent l'inspection du chauffage urbain ou de conduites dont la température est détectable. Les avantages sont la prévention des excavations défectueuses, la localisation des conduites et l'extension des couches thermographiques à partir des données SIG.



Figure 2-8 tuyaux de gaz froids (thermalcapture.com)

La thermographie peut également être utilisée pour détecter des fuites et des cavités souterraines. L'application est ici la détection de l'état du sol. Des images thermiques du chantier sont prises depuis le ciel afin d'identifier les vestiges de la construction et d'éliminer les sources de danger éventuelles.

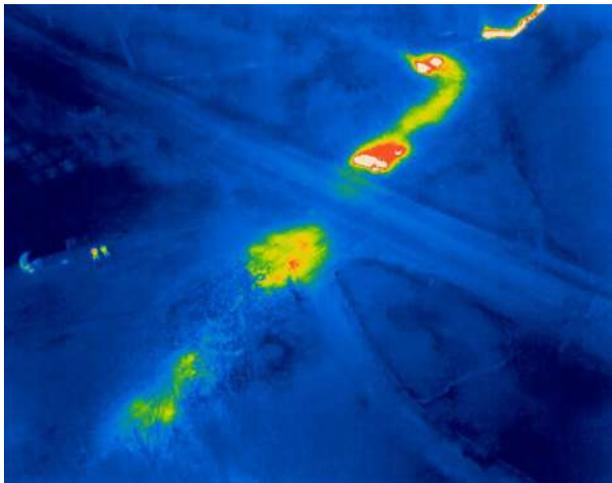


Figure 2-9 Fuites dans un réseau de chaleur (drone-thermal-camera.com)

Les points froids dans la capture d'image représentent des vides lorsque la surface du sol a une température uniforme pendant la journée.

2.2 Avantages des drones pour la thermographie :

- **Accessibilité :** Les drones équipés de caméras thermiques peuvent accéder à des zones difficiles ou dangereuses pour l'homme, comme les toits, les structures élevées ou les espaces confinés. Ils peuvent voler rapidement et facilement jusqu'aux endroits souhaités, offrant ainsi une vue d'ensemble de la zone.
- **Efficacité :** Les drones peuvent couvrir de vastes zones en un temps relativement court, ce qui permet des inspections thermiques efficaces. Ils peuvent capturer des images thermiques haute résolution ou des séquences vidéo tout en survolant une zone désignée, fournissant ainsi des données précieuses pour l'analyse.
- **Sécurité :** L'utilisation de drones pour la thermographie élimine la nécessité pour le personnel d'accéder physiquement à des endroits potentiellement dangereux ou difficiles d'accès. Cela réduit le risque d'accidents ou de blessures liés aux inspections effectuées en hauteur, à des températures extrêmes ou dans des environnements dangereux.
- **Flexibilité et mobilité :** Les drones sont très maniables et peuvent naviguer dans des environnements complexes, ce qui permet de capturer des données thermiques sous différents angles et perspectives. Ils peuvent facilement ajuster leur trajectoire de vol ou leur altitude pour se concentrer sur des zones d'intérêt spécifiques.
- **Collecte et analyse des données :** Les caméras thermiques montées sur des drones capturent des images infrarouges qui peuvent être utilisées pour identifier les anomalies de température et les modèles de chaleur. Les données recueillies peuvent être analysées pour détecter les inefficacités énergétiques, les problèmes d'isolation ou les dysfonctionnements des équipements dans les bâtiments, les lignes électriques, les panneaux solaires et d'autres infrastructures.
- **Intégration avec les logiciels de cartographie :** La thermographie par drone peut être intégrée à des logiciels de cartographie et à des systèmes d'information géographique (SIG) pour créer des cartes thermiques détaillées ou des modèles 3D. Cela permet un géoréférencement précis et une analyse spatiale des données thermiques, facilitant ainsi la prise de décision et la planification.

Dans l'ensemble, les drones constituent une plateforme polyvalente et efficace pour la thermographie aérienne, permettant d'améliorer la collecte et l'analyse des données dans divers secteurs, notamment la construction, l'énergie, l'agriculture et l'entretien des infrastructures.

La thermographie passive ou active peut rendre visibles des structures qui ne le sont pas par les caméras visuelles. Par exemple, la délamination peut être rendue visible dans la maçonnerie, dans les poches d'air ou dans les matériaux composites. Cela est possible sans endommager la surface.

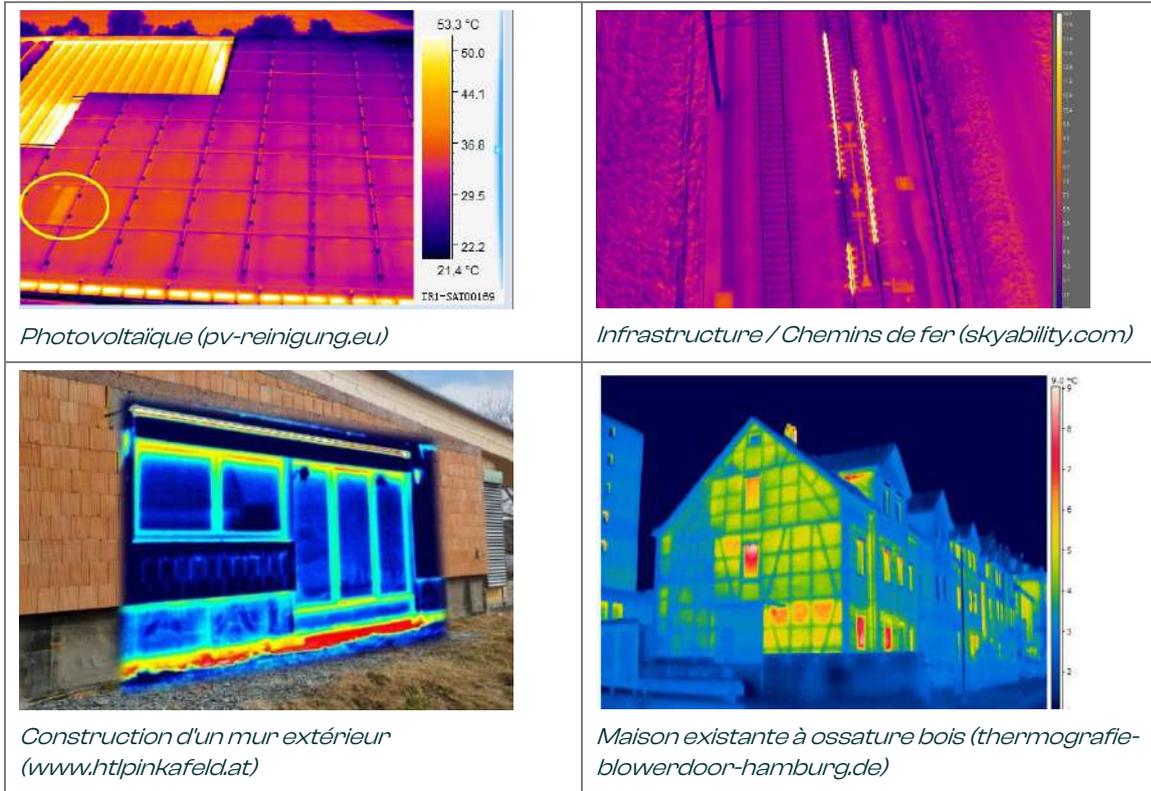


Figure 2- 6 Exemples de drones et de thermographie

La signification des couleurs est définie. Le rouge illustre les zones chaudes du bâtiment, tandis que le bleu représente les zones plus froides. Les températures situées dans la zone intermédiaire sont représentées en jaune et en vert, avec une nouvelle gradation entre le vert, un peu plus froid, et le jaune, qui représente les zones plus chaudes.

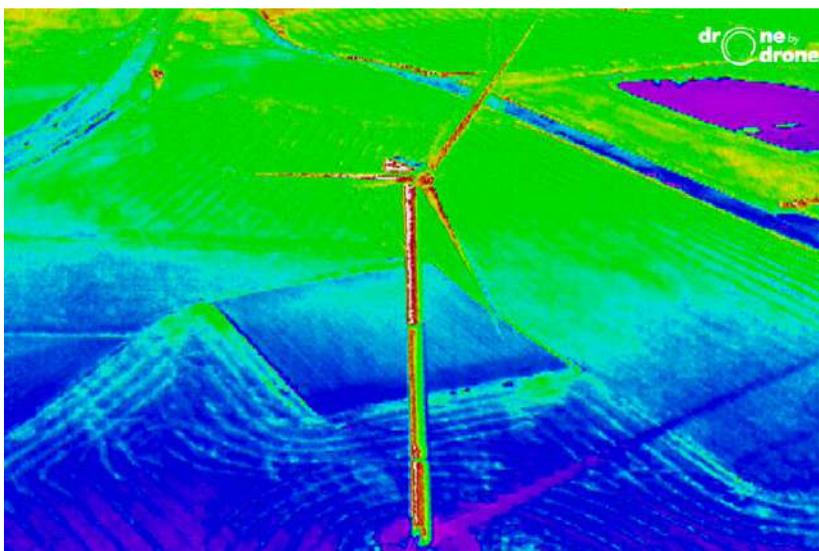


Figure 2-10 Cette éolienne est plus chaude que le sol (dronebydrone.com)

2.3 Matériel requis

En matière de thermographie par drone, il existe des exigences matérielles spécifiques à prendre en compte pour garantir la précision et la fiabilité de l'imagerie thermique. Voici les principaux composants matériels généralement utilisés pour la thermographie par drone :

- Drone : Le choix d'un drone adapté à la thermographie est crucial. Les facteurs à prendre en compte sont la stabilité de vol, la capacité de charge, le temps de vol et la capacité d'intégration des caméras thermiques. Les DroneVolt Hercules, DJI Mavic, Autelrobotics Evo II, DJI Matrice sont des options populaires, car ils offrent des caractéristiques de vol stables et peuvent accueillir différentes charges utiles.
- Caméra thermique : Il est essentiel de choisir la bonne caméra thermique pour obtenir des mesures de température précises et une imagerie thermique détaillée. Recherchez des caméras dotées d'une résolution thermique, d'une plage de température et d'une sensibilité élevées.



- Rotule et fixation : Un cardan est un système de stabilisation qui permet à la caméra thermique de rester stable pendant le vol, en minimisant les vibrations et en maintenant la qualité de l'image. Le drone doit être équipé d'un cardan compatible ou d'un système de fixation pour attacher et stabiliser la caméra thermique.
- Contrôle et intégration de la caméra : Le contrôleur de vol du drone doit permettre une intégration transparente avec la caméra thermique, permettant de contrôler les fonctions de la caméra telles que la capture d'images, l'enregistrement vidéo et l'étalonnage de la température. Assurez-vous que le logiciel ou le micrologiciel du drone prend en charge le modèle spécifique de caméra thermique que vous avez l'intention d'utiliser.
- Émetteur et récepteur : Les drones pour la thermographie nécessitent un système d'émetteur et de récepteur fiable pour la diffusion vidéo en temps réel et le contrôle à distance. Il permet à l'opérateur de visualiser l'imagerie thermique en direct et d'ajuster les paramètres de vol en fonction des besoins.
- Gestion de la batterie et de l'alimentation : Une capacité de batterie adéquate est essentielle pour garantir un temps de vol suffisant pour les missions de thermographie. Envisagez d'avoir des batteries de rechange à portée de main.

pour maximiser l'efficacité opérationnelle. En outre, un système de gestion de l'alimentation peut aider à surveiller les niveaux de batterie et fournir des alertes pour remplacer ou recharger la batterie en temps voulu.

- Stockage et transmission des données : Les drones génèrent une quantité importante de données d'imagerie thermique. Assurez-vous que le drone dispose d'une capacité de stockage suffisante à bord ou qu'il est capable de transmettre les données sans fil à une station au sol pour le stockage et l'analyse.
- Station au sol et affichage : Une station au sol est généralement utilisée pour contrôler le vol du drone, surveiller l'imagerie thermique en temps réel et gérer la planification de la mission. Elle se compose d'un contrôleur, d'un écran ou d'un appareil mobile permettant de visualiser le flux thermique en direct et d'interagir avec l'interface de commande du drone.

Il est important de noter que les exigences matérielles spécifiques peuvent varier en fonction de l'application envisagée, de la complexité des inspections thermiques et du niveau de précision souhaité des données. La consultation d'experts ou de thermographes expérimentés en matière de drones peut fournir des indications précieuses sur le choix des composants matériels les mieux adaptés à vos besoins spécifiques.

Matériel - Options pour les caméras thermiques

En ce qui concerne les caméras de drone pour la thermographie, il existe plusieurs options qui peuvent être utilisées pour capturer des images thermiques et effectuer des inspections thermographiques. Vérifiez la compatibilité et les capacités de charge utile respectives dans chaque cas. Voici quelques options de caméras de drone couramment utilisées pour la thermographie :

- FLIR Vue Pro : La FLIR Vue Pro est une caméra thermique populaire pour les drones. Elle offre différentes options de résolution (par exemple, 336x256 ou 640x512) et plusieurs options d'objectif pour répondre à différents besoins. La Vue Pro est connue pour sa grande sensibilité thermique et sa capacité à capturer des données de température précises.
DJI Zenmuse XT2 : La DJI Zenmuse XT2 est une caméra à double capteur qui combine une caméra visuelle et une caméra thermique FLIR Boson. Elle fournit des images thermiques haute résolution et peut capturer simultanément des images thermiques et visuelles. La Zenmuse XT2 offre des fonctions d'imagerie thermique avancées et s'intègre aux plateformes de drones de DJI. Elle convient au modèle de drone Matrice 300 / 350 RTK.
- FLIR Duo Pro R : La FLIR Duo Pro R est une caméra à double capteur qui associe une caméra thermique à une caméra visible haute résolution. Elle fournit une imagerie thermique radiométrique qui permet de mesurer et d'analyser la température avec précision. La Duo Pro R est connue pour sa taille compacte et son intégration facile aux drones.
- Workswell WIRIS Pro : La Workswell WIRIS Pro est une caméra thermique de qualité professionnelle conçue spécialement pour les drones. Elle est dotée d'un capteur thermique haute résolution et de plusieurs options d'objectif pour

fournir une imagerie thermique détaillée. La WIRIS Pro dispose également de fonctionnalités telles que l'intégration du GPS et de l'IMU pour une géolocalisation précise des données thermiques.

- TeAx ThermalCapture : TeAx ThermalCapture est une solution d'imagerie thermique qui peut être intégrée à diverses plateformes de drones. Elle comprend des composants matériels et logiciels qui permettent de capturer des images thermiques radiométriques et d'effectuer le post-traitement et l'analyse des données thermiques.
- Yuneec E20Tvx pour H520E H850 Hexacopter 640 x 512

Il est important de noter que la compatibilité de ces caméras peut varier en fonction de la plateforme du drone et du modèle de la caméra. Avant d'acheter une caméra thermique pour la thermographie par drone, assurez-vous qu'elle est compatible avec votre drone et que vous disposez des options de montage et d'intégration nécessaires. En outre, tenez compte de facteurs tels que la résolution thermique, la sensibilité, les capacités d'enregistrement des données et la possibilité de calibrer et d'analyser les données thermiques pour choisir la caméra qui correspond le mieux à vos besoins spécifiques et à votre budget.

Matériel - Options pour un drone caméra thermique

Voici quelques drones dotés d'une fonction de thermographie. La compilation comprend une sélection de drones courants. La liste ne prétend pas à l'exhaustivité.

DJI Mavic 3T (Thermique)

Ce drone compact et portable combine une caméra visuelle haute résolution et une caméra thermique FLIR Lepton. Il offre une configuration à double capteur, vous permettant de capturer simultanément des images en lumière visible et des images thermiques. Le Mavic 2 Enterprise Dual convient à diverses applications, notamment les inspections, la sécurité publique et les opérations de recherche et de sauvetage.

Spécifications :

- 45 minutes de temps de vol maximum possible
- Poids : 920g
- Résolution de la caméra thermique 640 x 512 pixels
- Évitement des obstacles
- Convient à l'inspection thermique des bâtiments, ainsi qu'à l'inspection des systèmes photovoltaïques
- Prix : environ 5 500 €.



Figure 2-9 DJI Mavic 3T (storedji.com)

DJI Matrice 30 T

Le DJI Matrice M30 est un drone très puissant pour les tâches d'inspection exigeantes sur toutes sortes de structures. Il est capable de fonctionner même dans des conditions météorologiques défavorables, jusqu'à environ -20°C, et dans des conditions d'éclairage difficiles. Il fournit des images impressionnantes grâce à sa caméra grand angle de 12 MP et à sa caméra de 48 MP dotée d'un zoom optique jusqu'à 16x. Un télémètre laser d'une portée allant jusqu'à 1200 m permet de déterminer facilement la distance.

Spécifications :

- 41 minutes de temps de vol maximum possible
- Poids : 3,770g
- Résolution de la caméra thermique 640 x 512 pixels
- Évitement des obstacles
- Télémètre laser d'une portée de 3m à 1200m
- Convient à l'inspection thermique des bâtiments, ainsi qu'à l'inspection des systèmes photovoltaïques
- Prix : appr 12.500 €



Figure 2-11 DJI Matrice 30 T (w.grube.at)

DJI Matrice 350 RTK

Conçu pour des applications commerciales et industrielles, le Matrice 350 RTK est un drone polyvalent qui peut être équipé de caméras thermiques telles que la Zenmuse XT2. Il offre des capacités de vol avancées, des durées de vol plus longues et une solide capacité de charge utile. Les options de caméra thermique offrent une sensibilité thermique élevée et des fonctions d'analyse avancées pour des inspections et des cartographies détaillées.

Spécifications :

- 55 minutes de temps de vol maximum possible
- Poids : 3 770 g (sans charge utile ni batterie)
- Évitement des obstacles
- Convient à l'inspection thermique des bâtiments, ainsi qu'à l'inspection des systèmes photovoltaïques
- Prix : environ 13.500 € (sans l'appareil photo)

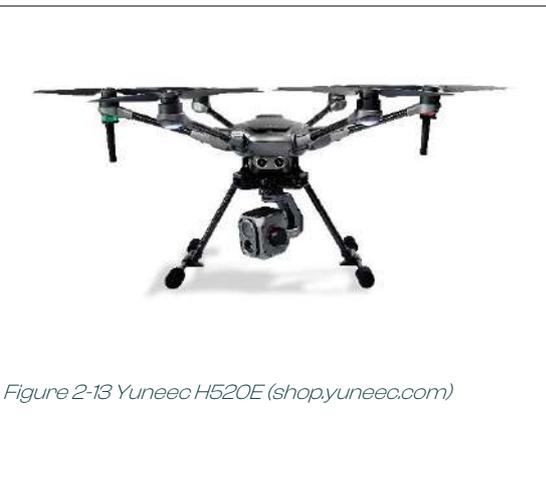


Yuneec H520E-SpecCombo Hexacopter RtF

Le Yuneec H520 E est un drone professionnel qui peut être intégré à la caméra thermique E20T. Il est équipé d'une caméra thermique radiométrique avec une plage de température réglable et des mesures de température précises. Le H520 est connu pour sa stabilité, ses performances de vol fiables et ses capacités de planification de vol avancées.

Spécifications :

- 25 minutes de temps de vol maximum possible
- Poids : 1.860 g
- Résolution de la caméra thermique 1344 x 759 pixels
- Évitement des obstacles
- Convient à l'inspection thermique des bâtiments, ainsi qu'à l'inspection des systèmes photovoltaïques
- Prix : environ 5 500 €.



FLIR SkyRanger R70

Ce drone robuste et résistant aux intempéries est spécialement conçu pour les applications industrielles. Il peut être intégré à la caméra thermique FLIR Vue Pro R, qui offre une imagerie thermique haute résolution. Le SkyRanger R70 offre de longues durées de vol, des fonctions de contrôle de vol avancées et convient à divers secteurs tels que l'inspection des infrastructures, l'énergie et la sécurité publique.

Spécifications :

- 40/59 minutes de temps de vol maximum possible
- Poids : 5 000 g
- Résolution de la caméra thermique StormCaster-T : 640 x 512 pixels
- Prix : pas d'info



Figure 2-14 FLIR SkyRanger R70 (www.flir.eu)

Parrot Anafi Thermal

Le Parrot Anafi Thermal est un drone spécialement conçu pour les applications d'imagerie thermique. Il s'agit d'un quadcopteur compact et léger qui combine une caméra visuelle haute résolution et une caméra thermique FLIR Lepton intégrée.

Spécifications :

- 25 minutes de temps de vol maximum possible
- Poids : 315 g
- Résolution de la caméra thermique 160 x 120
- Non Évitement d'obstacles
- Convient à l'inspection thermique des bâtiments, ainsi qu'à l'inspection des systèmes photovoltaïques
- Prix : environ 2 500 €.



Figure 2-15 Parrot Anafi Thermal (www.parrot.com)

Parrot Anafi USA

Le Parrot Anafi Thermal est un drone spécialement conçu pour les applications d'imagerie thermique. Il s'agit d'un quadcopteur compact et léger qui combine deux caméras visuelles haute résolution (zoom) avec une caméra thermique FLIR Boson intégrée.

Spécifications :

- 32 minutes de temps de vol possible
- Poids : 496 g
- Résolution de la caméra thermique 320 x 256
- Non Évitement d'obstacles
- Zoom 32x
- IP53
- Prix : environ 8 000 €.



Figure 2-16 Parrot Anafi USA (drohnen.de)

Autel EVO II Dual 640T

Le Autel Evo II Dual est un drone pliable équipé d'une caméra visuelle et d'une caméra thermique FLIR Boson. Il offre une caméra visuelle de 48 mégapixels et une caméra thermique d'une résolution de 640x512, fournissant des images détaillées. L'Evo II Dual est connu pour sa polyvalence et ses fonctions conviviales, ce qui le rend adapté à diverses applications, notamment les inspections et la sécurité publique.

Spécifications :

- 38 minutes de temps de vol maximum possible
- Poids : 1,110 g
- Résolution de la caméra thermique 640 x 512
- Évitement des obstacles
- Convient à l'inspection thermique des bâtiments, ainsi qu'à l'inspection des systèmes photovoltaïques
- Prix : environ 5 500 €.



Figure 2-17 Autel EVO II Dual 640T (shop.autelrobotics.com)

Flyability Elios 3

Le Flyability Elios 3 est un drone d'inspection intérieure spécialisé, conçu pour les espaces confinés et complexes. Il est principalement utilisé pour les inspections industrielles dans des domaines tels que les centrales électriques, les installations pétrolières et gazières, les sites de construction et les infrastructures. L'Elios 3 est connu pour sa robustesse et sa capacité à résister aux collisions, ce qui le rend adapté aux inspections dans des environnements difficiles.

Spécifications :

- 10 minutes
- Poids : 1.800 g
- Système d'éclairage
- Évitement des obstacles
- Capteur Lidar
- GPS Indoor Flyware
- Convient à l'inspection thermique des bâtiments intérieurs
- Prix : environ 50 000 €.



Figure 2-18 Flyability Elios 3 (halorobotics.com)

2.4 Logiciel requis

Plusieurs logiciels sont disponibles pour le traitement et l'analyse des images thermiques capturées par des drones à des fins de thermographie. Ces solutions logicielles permettent d'extraire des informations précieuses des données thermiques, de générer des rapports et d'effectuer diverses tâches d'analyse. Voici quelques options logicielles populaires pour la thermographie par drone :

- **FLIR Tools** : FLIR Tools est une suite logicielle fournie par FLIR Systems, l'un des principaux fabricants de caméras thermiques. Elle permet aux utilisateurs d'importer, d'analyser et de générer des rapports à partir d'images thermiques capturées par des caméras FLIR, y compris celles montées sur des drones. FLIR Tools offre des fonctionnalités telles que la mesure de la température, l'amélioration de l'image et des outils d'analyse personnalisables.
- **Pix4Dmapper** : Pix4Dmapper est un logiciel de photogrammétrie qui peut traiter les images visuelles et thermiques capturées par des drones. Il permet de créer des modèles 3D précis, des orthomosaïques et des cartes thermiques à partir des images capturées. Pix4Dmapper offre des capacités d'analyse avancées, y compris des mesures volumétriques, l'analyse de la température et la détection des changements dans le temps.
- **DroneDeploy** : DroneDeploy est une plateforme logicielle basée sur le cloud qui prend en charge l'analyse de l'imagerie thermique. Elle permet aux utilisateurs de télécharger, de traiter et d'analyser des images thermiques capturées par des drones. DroneDeploy fournit des outils pour créer des cartes thermiques, effectuer des analyses de température et générer des rapports personnalisables. DroneDeploy offre également une intégration avec les plateformes de drones les plus courantes et des fonctions de collaboration pour les projets en équipe.
- **FLIR Tools+ ou ResearchIR** : FLIR Tools+ et FLIR ResearchIR sont des options logicielles d'imagerie thermique avancées fournies par FLIR Systems. Ces logiciels sont conçus pour des tâches d'analyse thermographique plus complexes. Ils offrent des fonctions avancées telles que la correction de l'émissivité, l'analyse de laps de temps, le post-traitement des données radiométriques et des capacités avancées de création de rapports.
- **Raptor Maps** : Raptor Maps est une plateforme logicielle spécifiquement axée sur l'analyse de l'imagerie thermique pour l'inspection des panneaux solaires. Elle fournit des outils pour détecter les défauts, classer les problèmes et générer des rapports détaillés. Raptor Maps propose des algorithmes d'analyse automatisés et s'intègre à diverses plateformes de drones et caméras thermiques couramment utilisées pour les inspections de panneaux solaires.
- **DJI Thermal Analysis Tool 3.0** : peut être utilisé pour analyser et traiter les images thermiques. En identifiant les informations de température des zones critiques de la cible, le logiciel peut être utilisé pour analyser des objets dans de nombreuses applications industrielles.

Ce ne sont là que quelques exemples de logiciels disponibles pour la thermographie par drone. Le choix du logiciel dépend de vos besoins spécifiques, du type d'analyse dont vous avez besoin et de la compatibilité avec votre drone et votre caméra thermique. Il est conseillé d'explorer les caractéristiques et les capacités des différentes options logicielles, de prendre en compte les exigences spécifiques de votre application et de sélectionner le logiciel qui répond le mieux à vos besoins.

3. Etude thermique à l'aide de drones - Théorie et pratique

3.1 Contenu théorique

Voici quelques éléments théoriques relatifs à la thermographie :

Vue d'ensemble :

- Pertinence des drones dans le secteur de la construction et fréquence d'utilisation, -domaines.
- Les exigences relatives à la mise en œuvre générale, telles que les influences du vent et du temps, la saison de l'année avec ses températures et l'heure de la journée. Il est donc important qu'il fasse clair pendant la journée et que les conditions météorologiques soient bonnes, sans quoi la qualité et la possibilité de mise en œuvre s'en trouveront affectées. Ainsi, la pluie et l'orage ne conviennent pas à la mise en œuvre. La saison joue également un rôle, car la zone doit être exempte de neige ou de feuilles d'automne et ne doit pas être surchauffée par un ensoleillement trop fort ou des températures trop élevées en été. En outre, une surface sèche n'entraîne pas de distorsions dans le résultat.
- Coûts d'acquisition et différences entre les modèles (quelles fonctions sont essentielles pour quoi).

Thermographie, y compris :

- Rayonnement infrarouge et température :
 - Rayonnement infrarouge (IR) : Le rayonnement infrarouge est une forme de rayonnement électromagnétique dont les longueurs d'onde sont supérieures à celles de la lumière visible. Le rayonnement infrarouge est émis par tout objet dont la température est supérieure au zéro absolu (0 Kelvin = -273,15°C). Il est invisible pour l'œil humain.
 - Émissivité : L'émissivité est la mesure de la capacité d'un objet à émettre un rayonnement infrarouge. Elle varie en fonction des propriétés du matériau et de l'état de la surface. Comme l'émissivité varie en fonction de la température et des caractéristiques de la surface, les valeurs indiquées ici n'ont qu'une valeur indicative. Pour mesurer la température absolue avec précision, l'émissivité du matériau doit être déterminée avec exactitude.

Matériau	Émissivité
Aluminium	0.05
Brique	0.91
Béton	0.93
Grès	0.67
Laiton oxydé	0.61
Porcelaine	0.92
Acier, oxydé	0.79

Tableau 3-1: Émissivité de quelques matériaux

- Rayonnement du corps noir : Un corps noir est un objet idéalisé qui émet et absorbe tous les rayonnements incidents. Il suit la loi de Planck, qui décrit la distribution spectrale du rayonnement émis par un corps noir à une température donnée.
- Caméras d'imagerie thermique :
 - Fonctionnement : Les caméras thermiques détectent et mesurent le rayonnement infrarouge émis par les objets. Elles se composent d'un détecteur infrarouge, d'une optique et d'un système électronique de traitement de l'image.
 - Sensibilité thermique : La sensibilité thermique fait référence à la plus petite différence de température qu'une caméra peut détecter. La sensibilité thermique est un terme synonyme de différence de température équivalente au bruit (NETD), qui désigne la plus petite différence de température détectable lors de l'utilisation d'un dispositif thermique. Généralement mesurée en milliKelvin (mK), cette valeur fonctionne comme un indice de bruit électronique pour le système. Idéalement, il est souhaitable d'utiliser une caméra thermique dont le mK est le plus bas possible. Un NETD plus faible signifie que le capteur peut capturer plus efficacement des variations de température infimes. Inversement, un NETD élevé compromet la clarté de l'image, ce qui affecte négativement les performances analytiques et la visibilité, en particulier dans des conditions météorologiques difficiles.
- Principes de l'imagerie thermique :
 - Modes de transfert de la chaleur : La chaleur peut être transférée par conduction, convection et radiation. L'imagerie thermique se concentre principalement sur le transfert de chaleur par rayonnement.
 - Anomalies thermiques : Les anomalies thermiques sont des variations ou des irrégularités de température qui peuvent indiquer des problèmes tels que des fuites de chaleur, des défauts électriques ou des dysfonctionnements mécaniques.

- Inspections thermographiques :
 - Applications : La thermographie est largement utilisée dans divers domaines, notamment l'inspection des bâtiments pour détecter les inefficacités énergétiques, l'inspection électrique pour identifier les composants en surchauffe et l'inspection mécanique pour contrôler les performances des équipements.
 - Facteurs environnementaux : Les conditions environnementales, telles que la température ambiante, l'humidité et le mouvement de l'air, peuvent influencer les inspections thermographiques et doivent être prises en compte lors de l'interprétation des données.
 - Bonnes pratiques : Un étalonnage correct de la caméra, un réglage de l'émissivité et des mesures de distance précises sont essentiels pour des inspections thermographiques fiables.
- Analyse des données et rapports :
 - Analyse d'images : Des outils logiciels sont utilisés pour analyser les images thermiques, y compris la mesure de la température, le profilage de la température et la détection des anomalies.
 - Rapports : Les rapports de thermographie comprennent généralement des images visuelles et thermiques, des données de température, des annotations et des recommandations sur les mesures à prendre.

Il est important de noter que la thermographie est un domaine spécialisé qui requiert des connaissances théoriques approfondies et une expérience pratique pour une interprétation précise des images thermiques.

3.2 Contenu pratique (vols d'entraînement en extérieur / intérieur si possible)

L'expérience pratique de la thermographie par drone implique l'application des connaissances théoriques de la thermographie à des scénarios réels en utilisant des drones équipés de caméras thermiques. Voici quelques aspects de l'expérience pratique en thermographie par drone :

Scénario de test

Des illustrations basées sur des expériences personnelles ou des démonstrations faites par un professionnel puis testées par des personnes intéressées sont également possibles à l'intérieur d'un hall en tenant l'appareil contre un pont thermique et en observant le changement. Le processus est dicté par une séquence prédéfinie, qui a été marquée sur le plan d'étage. Des lignes indiquent les étapes à suivre pour exploiter au mieux les différences de température. Pour ce faire, des appareils influençant la température, tels qu'un réfrigérateur et un congélateur, un ventilateur de chauffage, un radiateur, un appareil de climatisation et un outil ménager électrique, sont placés à différents endroits du hall et diffusent leur température. À l'extérieur, cela est également possible et pourrait être illustré par les dispositifs déjà mentionnés, ainsi que par les murs de la maison, le système de ventilation et les éléments de construction du bâtiment.

Pré-vol

Planification des vols - Drones :

Une mesure thermographique doit toujours être effectuée en hiver, pendant la saison de chauffage. Il doit y avoir une différence de température d'au moins dix à quinze degrés Celsius entre l'intérieur et l'extérieur. L'image thermique doit être prise au plus tard le matin. Pendant la journée et la soirée, les parties du bâtiment étudiées peuvent être réchauffées par le soleil, ce qui risque de fausser les résultats des mesures. Le bâtiment doit être chauffé uniformément avant et pendant la mesure. Les fenêtres doivent rester fermées une heure avant et pendant la session thermographique.

- Avant de faire voler le drone, le pilote doit identifier la zone / la construction qui doit être inspectée thermographiquement.
- Vérifiez les conditions météorologiques pour vous assurer qu'elles conviennent au vol du drone. Évitez de voler par vent fort, sous la pluie ou à des températures extrêmes. Il en va de même pour la fumée, la poussière et les débris.
- Inspecter la zone sur place pour identifier les obstacles, les dangers potentiels et les sites de décollage et d'atterrissage appropriés.
- Planifiez la trajectoire et l'altitude du vol en fonction des exigences de l'inspection, des spécifications du drone et des conditions environnementales.
- La trajectoire de vol doit couvrir l'ensemble de la zone d'intérêt et l'altitude doit être optimisée pour capturer des images thermiques claires et détaillées.

Réglages de l'appareil photo :

- Les paramètres de la caméra, tels que la plage de température, l'émissivité et la palette, doivent être optimisés pour capturer des images thermiques précises et fiables.
- Le pilote doit ajuster les réglages de la caméra en fonction du type d'inspection et du matériau inspecté.

D'autres facteurs à prendre en compte sont liés à la capture des RI :

- Objets à étudier
 - Émissivité
 - Transparence
 - Réflectivité
 - Peinture sur un objet
 - Verre
 - Distance par rapport à la cible
 - Angle de vue
 - Rugosité ou douceur de la surface
- Quantité d'énergie thermique
- Drone - charges utiles à prendre en compte

En vol

Acquisition d'images :

- Le drone doit être piloté à une vitesse et une altitude constantes/programmées pour capturer des images thermiques claires et détaillées.
- Le pilote doit s'assurer que la caméra thermique capture des images qui se chevauchent suffisamment pour permettre un assemblage précis des images lors du post-traitement.

Analyse des données :

- Après avoir capturé les images thermiques, les données doivent être analysées afin d'identifier toute anomalie thermique ou variation de température.
- Des logiciels tels que FLIR Tools ou DJI thermal analysis tool peuvent être utilisés pour analyser les images thermiques et générer des rapports.

Rapport :

- Le rapport d'analyse thermique doit comprendre des images visuelles et thermiques, des données de température, des annotations et des recommandations sur les mesures à prendre.
- Le rapport doit être préparé de manière claire et concise, afin que les parties prenantes puissent facilement comprendre les résultats et agir en conséquence.

4. Réalisation d'une inspection thermographique

4.1 Conditions

La condition de base pour la thermographie de l'enveloppe extérieure d'un bâtiment est toujours donnée lorsqu'un flux de chaleur forcé par des différences de température s'écoule de manière aussi constante que possible dans le temps. Ce flux de chaleur génère alors des températures de surface localement différentes en raison des résistances thermiques localement différentes des composants traversés, qui sont enregistrées par la caméra thermographique. Pour ce faire, un certain nombre de critères importants doivent être respectés lors de la réalisation d'une thermographie par un conseiller en énergie. Le non-respect de ces critères peut rendre l'interprétation plus difficile ou conduire à des conclusions erronées. Le point le plus important est la météo. Les différences de température jouant un rôle important dans la mesure, l'hiver est la saison idéale pour l'imagerie thermique.

La thermographie de l'extérieur peut théoriquement être réalisée quelle que soit l'heure de la journée, à condition qu'elle ne soit pas trop lumineuse (< 1500 lux). Par conséquent, les images thermographiques sont principalement prises le matin, car toutes les surfaces éclairées par le soleil ne sont pas encore trop ensoleillées. La lumière du soleil peut également perturber les images prises à l'intérieur, malgré la forte inertie thermique de l'enveloppe du bâtiment, en éclairant les fenêtres.

D'autre part, il est recommandé d'effectuer une thermographie lorsque le ciel est complètement nuageux, car la température à la base des nuages correspond alors presque à la température ambiante et il y a donc un équilibre presque parfait et les effets de rayonnement et d'ombre sont presque totalement absents.

Sensibilité thermique

La sensibilité thermique décrit la faible différence de température que la caméra peut encore détecter. Plus la sensibilité thermique est élevée, plus la différence de température minimale que la caméra thermique peut détecter et afficher est faible. Normalement, la sensibilité thermique est indiquée en °C ou en mK. Les caméras thermiques les plus modernes pour les applications dans le bâtiment ont une sensibilité thermique de 0,03 °C (30 mK).

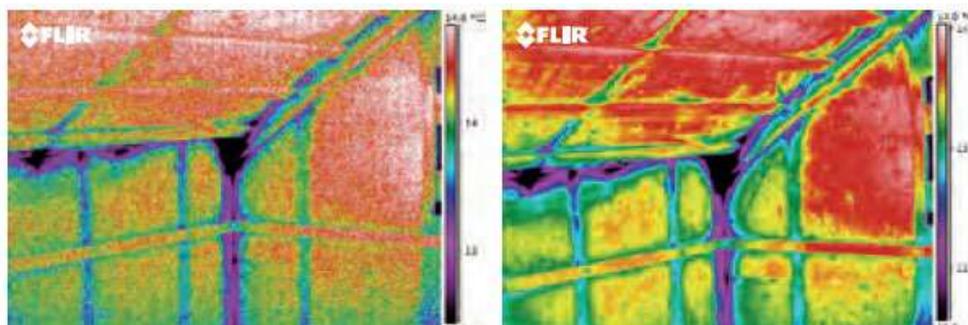


Figure 4- 1: Sensibilité thermique 65mk à gauche vs 45mk à droite (FLIR Systems)

La détection de ces petites différences de température est essentielle dans la plupart des applications d'imagerie thermique. Une sensibilité élevée de la caméra est particulièrement importante dans les applications de construction où les différences de température sont généralement plus faibles. Une sensibilité plus élevée est nécessaire pour capturer des images plus détaillées afin d'améliorer les diagnostics, sur la base desquels des décisions sont prises quant aux actions nécessaires. Plus la sensibilité est élevée, meilleure est la capacité de la caméra à capturer de minuscules détails, même à de faibles différences de température.

Valeur d'émission

La thermographie est étroitement liée au terme valeur d'émission. Étant donné que la transmission (transmittance pour le rayonnement) est plutôt faible pour la plupart des matériaux, la réflexion et l'émission restent des facteurs de mesure importants pour obtenir au total les 100 % mentionnés ci-dessus ou la valeur 1.



Figure 4- 2: Valeur d'émission (FLIR Systems)

Dans l'image thermique de gauche, l'émissivité correcte pour la peau humaine (0,97) a été réglée et la température relevée indique la valeur correcte (36,7 °C). Dans l'image thermique de droite, la mauvaise émissivité a été introduite (0,15), ce qui donne une valeur de température incorrecte (98,3 °C). Voir le tableau 1 ci-dessus avec les valeurs d'émissivité des différents matériaux.

Réflexion

Certains matériaux, dont la plupart des métaux, réfléchissent le rayonnement thermique aussi fortement qu'un miroir réfléchit la lumière visible. Les réflexions sont souvent à l'origine d'une mauvaise interprétation de l'image thermique ; la réflexion du rayonnement thermique sur le corps de l'opérateur ou sur une lampe peut conduire à des données de température incorrectes. L'opérateur doit donc choisir avec soin l'angle sous lequel la caméra thermique est dirigée vers l'objet afin d'éviter les réflexions de ce type.

Ne pas utiliser de surfaces métalliques pour les valeurs de mesure réelles ! Ne pas observer les barres en cuivre nu !

Mesurer les sorties de câble des barres de cuivre, de l'isolation du câble ou de la gaine thermorétractable au niveau de la cosse de câble !

Application au bâtiment : Attention aux gouttières : elles sont le plus souvent en zinc ou en cuivre et peuvent refléter le ciel. Les fenêtres en verre vues de l'extérieur reflètent les arbres, les bâtiments voisins ou le ciel et les nuages. Les vieilles fenêtres et portes en aluminium nu réfléchissent également. Les fenêtres à double vitrage sont séparées par des profilés en tôle qui, de par leur construction, constituent un pont thermique. Les angles ou les bords intérieurs des pièces représentent un pont thermique géométrique et sont généralement plus froids que les murs ou le plafond. Il est important de maintenir la température en dessous du point de rosée. Les façades en tôle de zinc réfléchissent. Supposons que vous vous trouviez dans une pièce et que vous souhaitez mesurer la température de la vitre d'une fenêtre. La vitre a une valeur d'émissivité de 0,5, ce qui signifie que le rayonnement arrivant à la caméra est composé à 50 % du rayonnement du verre (en fonction de la température du verre) et à 50 % du rayonnement réfléchi par la surface. Si un mur intérieur sombre et mat se reflète dans la vitre, on peut approximativement fixer la température intérieure à 20°C par exemple et la valeur d'émission à 0,5 ou 50% sur la caméra ou dans le logiciel d'évaluation. Cependant, si un radiateur de 65°C se reflète dans la vitre, ou si l'opérateur de la caméra infrarouge s'y voit, la valeur correspondante doit être réglée comme température d'arrière-plan. L'image suivante permet de comprendre pourquoi cela est important et quels sont les facteurs à prendre en compte.

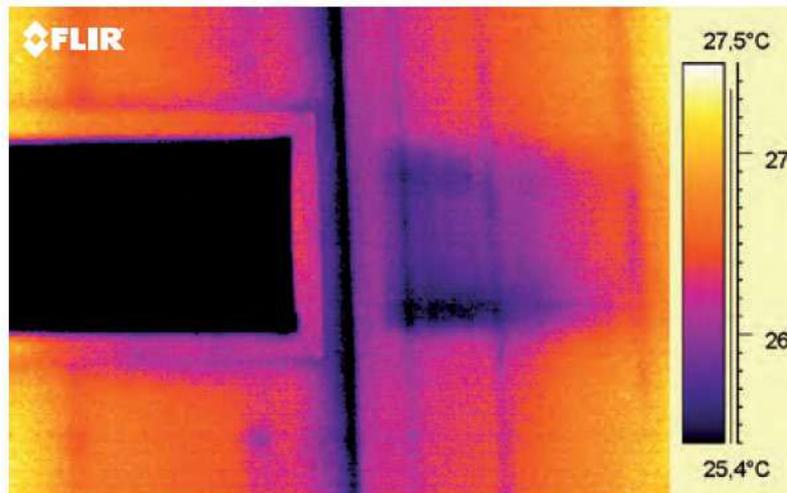


Figure 4- 3: Réflexion sur le mur de droite à partir de la fenêtre de gauche (FLIR Systems)

En plein été, avec des températures extérieures de 35°C et un ciel bleu lumineux, la mesure de la température de la surface vitrée d'une fenêtre depuis la rue peut refléter le ciel (par exemple -20°C) ou la façade en ardoise noire de la maison voisine (60°C), ce qui entraîne des erreurs de mesure considérables si la température d'arrière-plan n'est pas correctement prise en compte.

Inspection des modules solaires à l'aide de caméras thermiques

Pour obtenir un contraste thermique suffisant lors de l'inspection des cellules solaires sur place, il faut un rayonnement solaire de 500 W/m² ou plus. Un résultat optimal peut être obtenu avec une intensité de rayonnement de 700 W/m². L'emplacement et les conditions météorologiques locales exercent une influence majeure. Les basses températures extérieures peuvent également augmenter le contraste thermique.

En général, les modules PV sont montés sur des cadres en aluminium très réfléchissants, qui apparaissent comme des zones froides sur l'image thermique parce qu'ils reflètent le rayonnement thermique du ciel. En pratique, cela signifie que la caméra thermique affichera la température du cadre comme étant clairement inférieure à 0 °C. Toutefois, comme son algorithme d'affichage s'adapte automatiquement aux températures mesurées les plus élevées et les plus basses, de nombreuses anomalies thermiques faibles ne seront pas immédiatement visibles. Pour obtenir un contraste thermique élevé de l'image thermique, le niveau et la portée doivent donc être constamment corrigés à la main.

Pour éviter les réflexions de la caméra thermique et de l'opérateur sur le verre, la caméra ne doit pas être disposée perpendiculairement au module à examiner. Cependant, l'émissivité est maximale à angle droit et diminue avec l'augmentation de l'angle. Un angle de vue de 5 à 60° est un bon compromis (0° est perpendiculaire).

Conditions ambiantes et de mesure : Pour effectuer un examen thermographique, le ciel doit être dégagé, car les nuages réduisent le rayonnement solaire et produisent en outre des réflexions gênantes. Néanmoins, il est possible d'obtenir des images significatives même par temps nuageux, à condition que la caméra thermique utilisée soit suffisamment sensible. De même, il est souhaitable qu'il n'y ait pas de vent, car tout flux d'air à la surface du panneau solaire entraîne un refroidissement par convection, ce qui réduit le gradient de température. Plus la température de l'air est basse, plus le contraste thermique potentiel est élevé. Il est donc possible d'effectuer des relevés thermographiques tôt le matin.

4.2 Appareil photo

Une caméra infrarouge affiche les températures. Cela peut se faire en noir et blanc, les luminosités correspondant alors aux températures. En général, toutefois, différentes représentations en fausses couleurs sont choisies. L'attribution des couleurs aux températures est souvent intuitivement attendue par l'observateur, du bleu au rouge, c'est-à-dire du froid au chaud. Dans l'image de la caméra, un coin de couleur fournit l'affectation des températures aux couleurs.

Une caméra infrarouge est un système calibré, également appelé radiomètre. Différents facteurs jouent un rôle dans la précision de mesure absolue de la caméra. Les températures de l'optique ou du détecteur sont notamment mesurées dans la caméra afin de paramétrer correctement les caractéristiques d'étalonnage internes.

Il est donc toujours important que la caméra elle-même soit thermiquement stable. Ainsi, pour la thermographie d'un bâtiment, il ne faut pas sortir de la voiture avec la caméra à une température de 20°C et s'attendre à des valeurs mesurées correctes à des températures extérieures de -20°C. La caméra ne doit pas être utilisée pour mesurer la température du bâtiment. Ces valeurs ne sont obtenues que lorsque la caméra elle-même est thermiquement stable, c'est-à-dire lorsqu'elle a fonctionné à -20°C pendant environ ½ heure.

4.3 Analyse et rapports

Il existe quelques fonctionnalités qui rendent la documentation et les rapports plus traçables.

La fonction image dans l'image (PIP)

Cela permet à l'utilisateur de combiner les images de la caméra numérique et de la caméra thermique. L'image combinée présente un cadre sur l'image numérique avec une partie de l'image thermique qui peut être déplacée et redimensionnée. Cela permet à l'utilisateur de localiser plus facilement les problèmes.

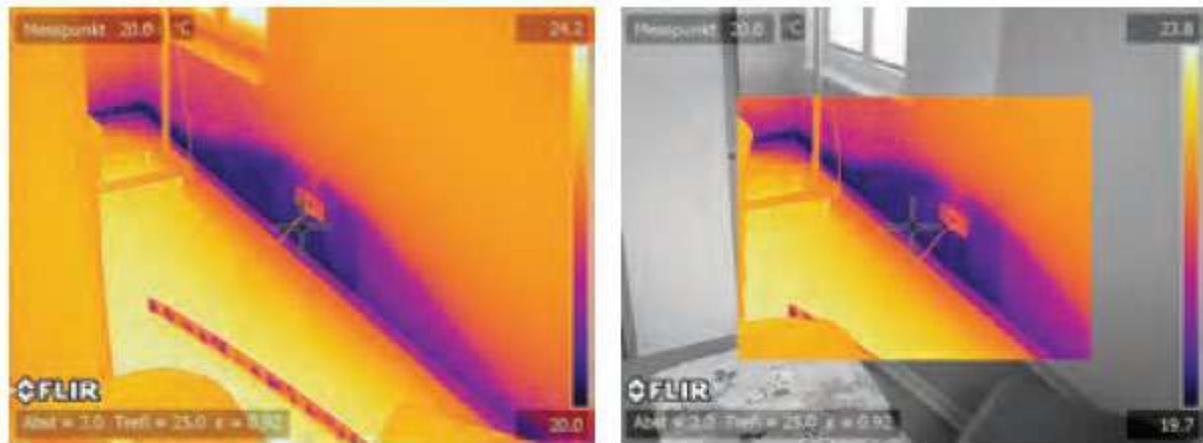


Figure 4- 4: Fonction "image dans l'image" Picture In Picture PIP (FLIR Systems)

Fusion thermique

Cette fonction permet à l'utilisateur de combiner de manière transparente les deux images en définissant des paramètres de température, en affichant les données thermiques à l'intérieur des limites et la photo numérique à l'extérieur. Cela permet d'isoler les problèmes et d'effectuer les réparations plus efficacement.

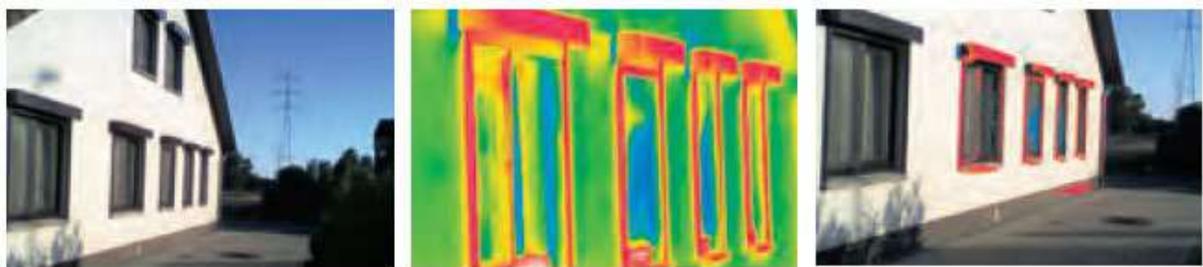


Figure 4- 5: image réelle - infrarouge - fusion thermique (FLIR Systems)

Rapport

Un rapport de thermographie comprend généralement des informations détaillées sur l'inspection par imagerie thermique effectuée sur un sujet particulier, tel qu'un bâtiment, un système électrique ou un équipement mécanique. Le contenu d'un rapport de thermographie peut varier en fonction de l'application spécifique, mais voici un aperçu général de ce qu'il peut contenir :

1. Introduction :
 - a. Objectif de l'inspection thermographique.
 - b. Date et lieu de l'inspection.
 - c. Identification de l'objet inspecté (par exemple, bâtiment, panneau électrique).
2. Étendue des travaux :
 - a. Explication des domaines ou composants couverts par l'inspection.
 - b. Toute limitation ou contrainte pendant l'inspection.
3. Matériel et méthodologie :
 - a. Détails sur l'équipement d'imagerie thermique utilisé.
 - b. Description de la méthode d'inspection.
 - c. Toute technique spécialisée employée au cours de l'inspection.
4. Conditions environnementales :
 - a. Température et conditions météorologiques pendant l'inspection.
 - b. Notation de tout facteur susceptible d'avoir influencé les résultats (par exemple, le vent, la lumière du soleil).
5. Préparation et considérations :
 - a. Mesures prises pour préparer le sujet à l'inspection thermographique.
 - b. Considérations pour obtenir des résultats précis et fiables.
6. Images thermiques :
 - a. Présentation des images thermiques prises lors de l'inspection.
 - b. Annotation des résultats significatifs et des anomalies.
7. Analyse et interprétation :
 - a. Interprétation des modèles et anomalies thermiques observés.
 - b. Identification des problèmes potentiels ou des domaines de préoccupation.
 - c. Comparaison des écarts de température et de leur signification.
8. Recommandations :
 - a. Actions recommandées sur la base des résultats.
 - b. Les niveaux de priorité pour traiter les problèmes identifiés.
 - c. Suggestions pour une enquête plus approfondie, si nécessaire.
9. Conclusions :
 - a. Résumé des principales observations et conclusions.

b. Évaluation globale de l'état du sujet.

10. Annexe:

- a. Documentation complémentaire, tableaux ou graphiques.
- b. Images thermiques brutes pour référence.

11. Informations de contact:

- a. Coordonnées du thermographe ou de l'équipe d'inspection.
- b. des informations sur la manière de demander des éclaircissements ou des services supplémentaires.

Il est important qu'un rapport de thermographie soit clair, concis et facilement compréhensible par les lecteurs techniques et non techniques. En outre, le rapport doit être conforme à toutes les normes et lignes directrices pertinentes de l'industrie.

L'**annexe A** présente un extrait d'un rapport pour l'inspection d'un système photovoltaïque (PV).

Liste des figures

Figure 2-1 Raccordement défectueux qui s'échauffe (sachu.in).....	9
Figure 2-2 Contact défectueux (drone-thermal-camera.com).....	9
Figure 2-3 Poutre de pont humide par temps sec (semanticssolar.org).....	10
Figure 2-4 Analyse d'un pont métallique (Brunswick engineering)	10
Figure 2-5 fuites d'eau dans des réservoirs de station d'épuration (3Dvirtual360.com.au).....	11
Figure 2-6 une bande de cellules est ici défectueuse (analistgroup.com).....	11
Figure 2-7 Plusieurs défauts simultanés (diagnosticphotovoltaïque.fr)	11
Figure 2-8 tuyaux de gaz froids (thermalcapture.com).....	12
Figure 2-9 Fuites dans un réseau de chaleur (drone-thermal-camera.com).....	12
Figure 2-10 Cette éolienne est plus chaude que le sol (dronebydrone.com).....	14
Figure 2-11 DJI Matrice 30 T (w.grube.at).....	18
Figure 2-12 DJI Matrice 350 (droon.ee).....	19
Figure 2-13 Yuneec H520E (shop.yuneec.com).....	19
Figure 2-14 FLIR SkyRanger R70 (www.flir.eu).....	20
Figure 2-15 Parrot Anafi Thermal (www.parrot.com).....	20
Figure 2-16 Parrot Anafi USA (drohnen.de).....	21
Figure 2-17 Autel EVO II Dual 640T (shop.autelrobotics.com).....	21
Figure 2-18 Flyability Elios 3 (halorobotics.com).....	22

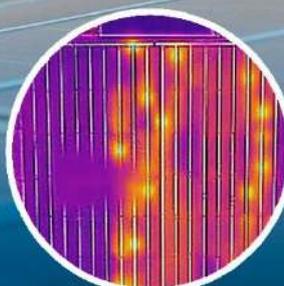
Liste des tableaux

Tableau 3-1: Emissivité de quelques matériaux.....	26
--	----

5. Annexe a

SOLARTESTER

INSPECTION REPORT

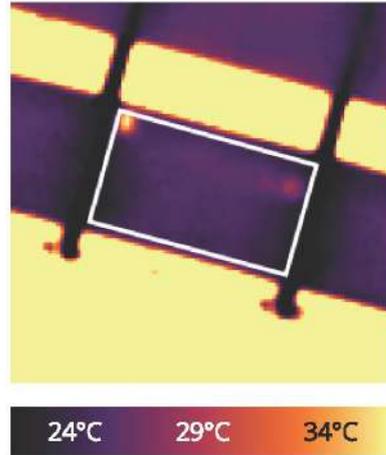


www.solartester.nl

Content

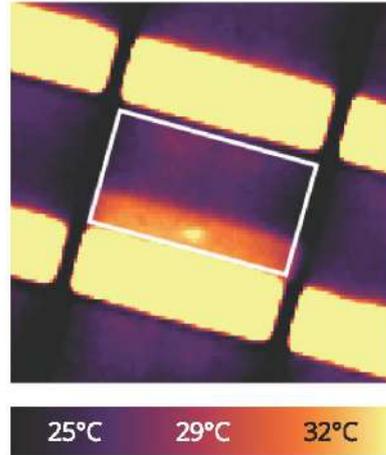
1. ST-9999 SOLARTESTER SAMPLE REPORT	1
Site properties	1
High level site plan	2
Inspection history	2
2. INSPECTION DETAILS	3
Data product	3
Timing	3
Main equipment	3
3. RGB ORTHOMOSAÏC	4
4. THERMAL ORTHOMOSAÏC	5
5. LAYER FEATURES	6
Thermal Anomalies	6

THERMAL ANOMALIES - ID 7



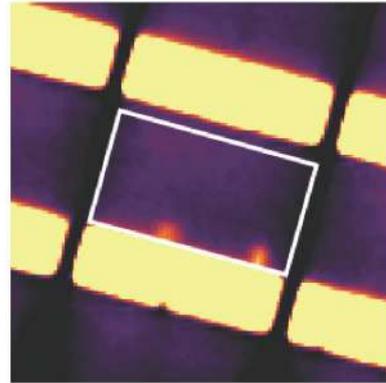
ANOMALY TYPE	Multiple hotspot	MEAN TEMPERATURE	25.5 °C
ANOMALY CAUSE	Dropping	MIN TEMPERATURE	23.6 °C
MAX TEMPERATURE	34.3 °C	LONGITUDE	4.5281328 °
DELTA TEMPERATURE	8.9 °C	LATITUDE	51.7144612 °

THERMAL ANOMALIES - ID 8



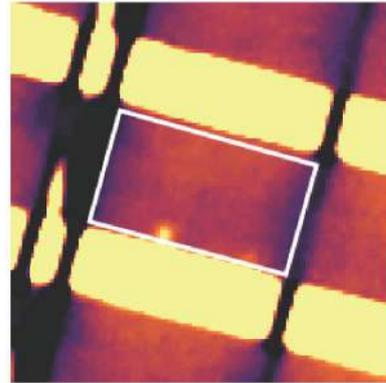
ANOMALY TYPE	Single bypassed	MEAN TEMPERATURE	27.9 °C
ANOMALY CAUSE	Physical internal	MIN TEMPERATURE	24.8 °C
MAX TEMPERATURE	32.4 °C	LONGITUDE	4.5286966 °
DELTA TEMPERATURE	4.6 °C	LATITUDE	51.7144612 °

THERMAL ANOMALIES - ID 9



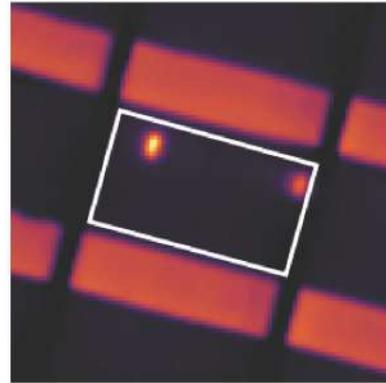
ANOMALY TYPE	Multiple hotspot	MEAN TEMPERATURE	25.6 °C
ANOMALY CAUSE	Dropping	MIN TEMPERATURE	23.9 °C
MAX TEMPERATURE	32.7 °C	LONGITUDE	4.5290964 °
DELTA TEMPERATURE	7.1 °C	LATITUDE	51.7144612 °

THERMAL ANOMALIES - ID 10



ANOMALY TYPE	Multiple hotspot	MEAN TEMPERATURE	25.7 °C
ANOMALY CAUSE	Dropping	MIN TEMPERATURE	23 °C
MAX TEMPERATURE	29.6 °C	LONGITUDE	4.5288414 °
DELTA TEMPERATURE	3.9 °C	LATITUDE	51.714461 °

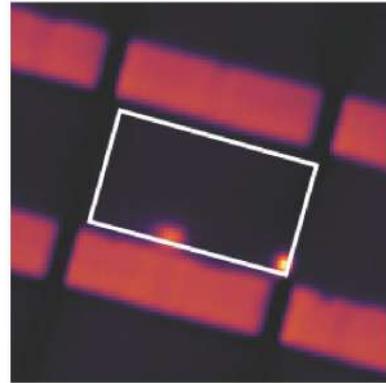
THERMAL ANOMALIES - ID 11



24°C 41°C 59°C

ANOMALY TYPE	Multiple hotspot	MEAN TEMPERATURE	26.2 °C
ANOMALY CAUSE	Dropping	MIN TEMPERATURE	24 °C
MAX TEMPERATURE	58.5 °C	LONGITUDE	4.5289707 °
DELTA TEMPERATURE	32.3 °C	LATITUDE	51.7144612 °

THERMAL ANOMALIES - ID 12



ANOMALY TYPE	Multiple hotspot	MEAN TEMPERATURE	26.7 °C
ANOMALY CAUSE	Dropping	MIN TEMPERATURE	24.3 °C
MAX TEMPERATURE	61.9 °C	LONGITUDE	4.5287534 °
DELTA TEMPERATURE	35.3 °C	LATITUDE	51.714461 °

SOLAR TESTER

solartester.nl

Graafsebaan 139
5248NL Rosmalen
The Netherlands

info@solartester.nl

ST-9999 SOLARTESTER SAMPLE REPORT

This section gives a brief overview of site-specific information, including inverter and panel properties.

SITE PROPERTIES

ADDRESS	Graafsebaan 139 Rosmalen	PANEL ORIENTATION	S
PEAK POWER	1 MWp	PANEL MAXIMUM POWER	370 Wp
NUMBER OF PANELS	2800	AREA	0.85 ha
PANEL INCLINATION	30	PANEL MODEL	Solar Tester
		INVERTER MODEL	Demo

HIGH LEVEL SITE PLAN



INSPECTION HISTORY

23 Jul 2022

Solar Inspection Pro

COMPLETED

INSPECTION DETAILS

DATA PRODUCT

Our “Pro” Solar Site Inspection functionality provides a complete overview of all the issues of your site and their potential causes.

TIMING

TIMEZONE	GMT+2
THERMAL FLIGHT(S)	<small>START</small> 23 Jul 2022 10:08
RGB FLIGHT(S)	<small>START</small> 23 Jul 2022 10:08

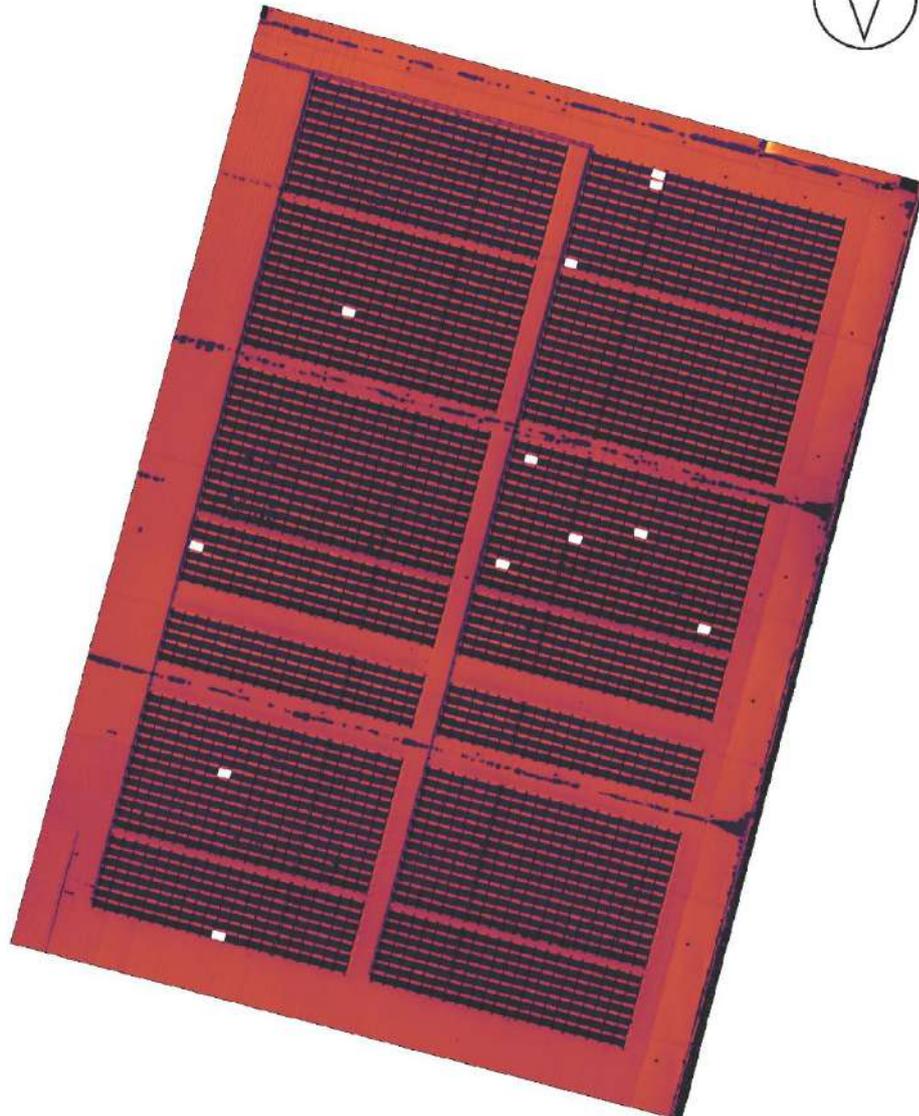
MAIN EQUIPMENT

THERMAL DRONE	DJI Matrice 200
THERMAL CAMERA	FLIR Zenmuse XT2 Thermal - 9Hz 640 R 13mm
RGB DRONE	DJI Matrice 200
RGB CAMERA	FLIR Zenmuse XT2 RGB

RGB ORTHOMOSAÏC

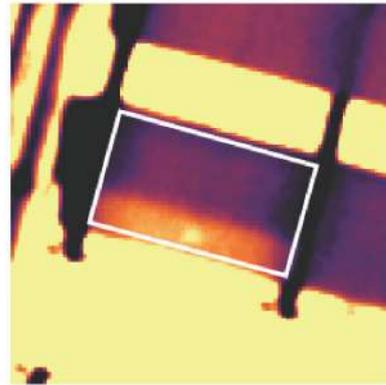


THERMAL ORTHOMOSAÏC



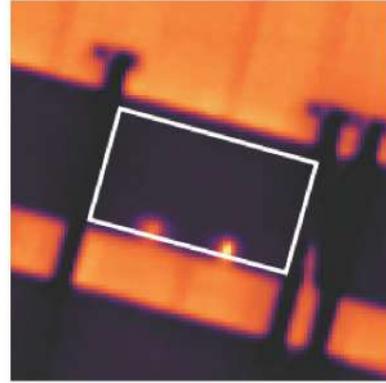
LAYER FEATURES

THERMAL ANOMALIES - ID 1



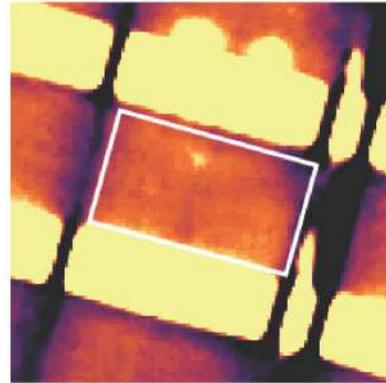
ANOMALY TYPE	Single bypassed	MEAN TEMPERATURE	28.2 °C
ANOMALY CAUSE	Physical internal	MIN TEMPERATURE	24.7 °C
MAX TEMPERATURE	33.1 °C	LONGITUDE	4.5288326 °
DELTA TEMPERATURE	5 °C	LATITUDE	51.7144612 °

THERMAL ANOMALIES - ID 2



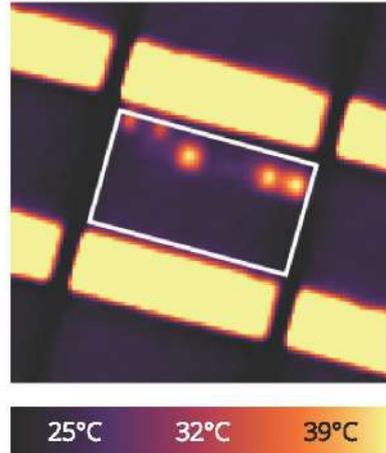
ANOMALY TYPE	Multiple hotspot	MEAN TEMPERATURE	28.4 °C
ANOMALY CAUSE	Dropping	MIN TEMPERATURE	26.2 °C
MAX TEMPERATURE	52.5 °C	LONGITUDE	4.5290063 °
DELTA TEMPERATURE	24 °C	LATITUDE	51.7144612 °

THERMAL ANOMALIES - ID 3



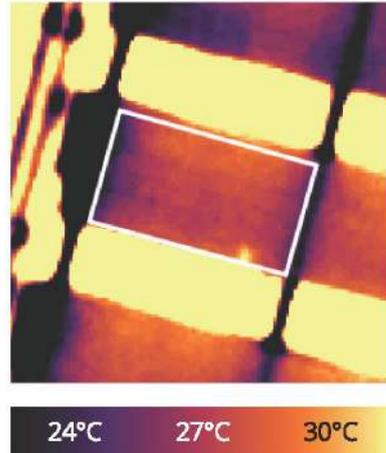
ANOMALY TYPE	Hotspot	MEAN TEMPERATURE	28.9 °C
ANOMALY CAUSE	Dropping	MIN TEMPERATURE	26.1 °C
MAX TEMPERATURE	30.5 °C	LONGITUDE	4.5290015 °
DELTA TEMPERATURE	1.6 °C	LATITUDE	51.714461 °

THERMAL ANOMALIES - ID 4



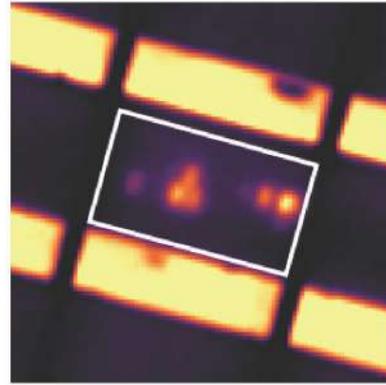
ANOMALY TYPE	Multiple hotspot	MEAN TEMPERATURE	26.6 °C
ANOMALY CAUSE	Physical internal	MIN TEMPERATURE	24.8 °C
MAX TEMPERATURE	39.2 °C	LONGITUDE	4.5283909 °
DELTA TEMPERATURE	12.5 °C	LATITUDE	51.7144612 °

THERMAL ANOMALIES - ID 5



ANOMALY TYPE	Hotspot	MEAN TEMPERATURE	27.1 °C
ANOMALY CAUSE	Dropping	MIN TEMPERATURE	24.4 °C
MAX TEMPERATURE	30 °C	LONGITUDE	4.5280887 °
DELTA TEMPERATURE	2.9 °C	LATITUDE	51.7144612 °

THERMAL ANOMALIES - ID 6



ANOMALY TYPE	Multiple hotspot	MEAN TEMPERATURE	27.8 °C
ANOMALY CAUSE	Physical internal	MIN TEMPERATURE	25.6 °C
MAX TEMPERATURE	43.3 °C	LONGITUDE	4.5281439 °
DELTA TEMPERATURE	15.6 °C	LATITUDE	51.7144612 °