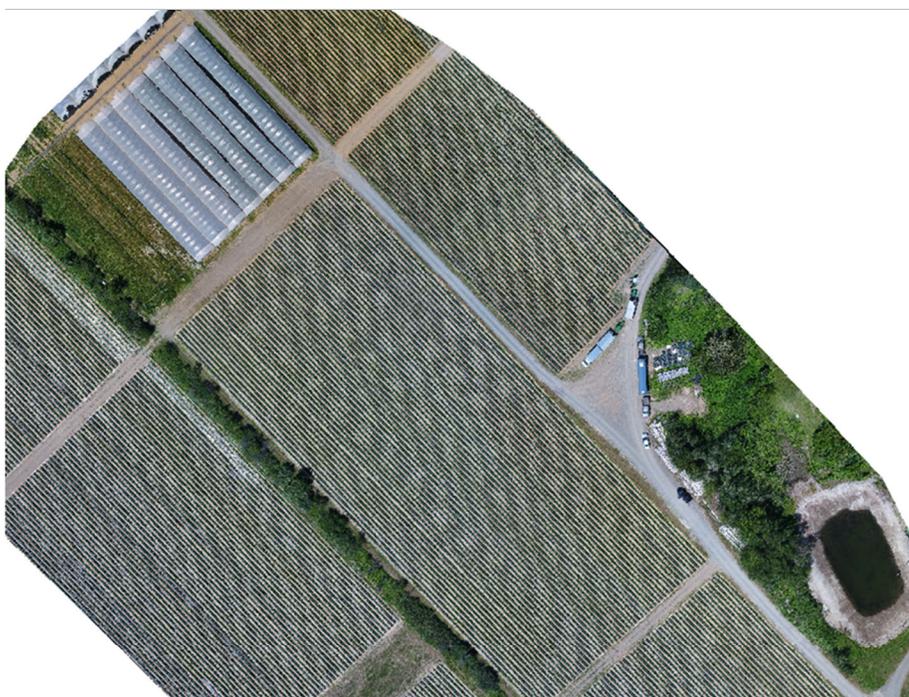


RAPPORT FINAL

UTILISATION DE L'IMAGERIE THERMIQUE ACQUISE PAR DRONE POUR DÉTERMINER LE POSITIONNEMENT GÉOGRAPHIQUE OPTIMAL DES TENSIONNÈTRES DANS LES CHAMPS IRRIGUÉS



Paul Deschênes, agr., M.Sc. - IRDA

Jérémy Vallée, agr. - IRDA

Patrick Chatelle, M.Sc. - DroneXperts

Daniel Bergeron, agr., M.Sc. - DRCN du MAPAQ

Carl Boivin, agr., M.Sc. - IRDA

L'IRDA a été constitué en mars 1998 par quatre membres fondateurs, soit le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) et le ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation (MESI).

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement est une corporation de recherche à but non lucratif qui travaille chaque année sur une centaine de projets de recherche en collaboration avec de nombreux partenaires du milieu agricole et du domaine de la recherche.

Notre mission

L'IRDA est un institut de recherche et de développement qui a pour mission de soutenir le développement d'une agriculture durable au Québec en favorisant le recours à l'innovation et aux partenariats.

Notre vision

Au terme du plan stratégique 2017-2020, l'IRDA sera reconnu comme le chef de file en matière de R-D agroenvironnementale au Québec. Une reconnaissance de l'IRDA :

- par les entreprises, pour la valeur ajoutée de son soutien à leurs efforts d'innovation;
- par les partenaires, pour son leadership en matière d'agroenvironnement;
- par le gouvernement, pour son apport à la mise en œuvre des politiques et stratégies gouvernementales.

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

PARTENAIRE

**Agriculture, Pêcheries
et Alimentation**

Québec 

ÉQUIPE DE RÉALISATION DU PROJET

- Demandeur : Ferme François Gosselin
- Responsable du projet : Carl Boivin, agr., M.Sc. - IRDA
- Paul Deschênes, agr., M.Sc. - IRDA
- Jérémie Vallée, agr., B.Sc. - IRDA
- Patrick Chatelle, M.Sc. - DroneXperts
- Daniel Bergeron, agr., M.Sc. - MAPAQ

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Carl Boivin
IRDA
2700, rue Einstein, Québec (Québec) G1P 3W8
418 643-2380, poste 430
carl.boivin@irda.qc.ca

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche est réalisé grâce à une aide financière accordée par le Programme d'appui au développement de l'agriculture et de l'agroalimentaire en région (PADAAR).

TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|---|-------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Mise en contexte | 1 |
| 2 | Objectif | 3 |
| 3 | Matériel et méthode | 4 |
| | Site expérimental | 4 |
| | Statut hydrique du sol | 4 |
| | Caractérisation de propriétés physiques du sol | 5 |
| | Imagerie thermique et indice de végétation | 6 |
| | Traitement de données | 6 |
| 4 | Analyse des résultats | 7 |
| | Propriétés physiques du sol..... | 7 |
| | Suivi du statut hydrique du sol..... | 7 |
| | Imagerie thermique et indice de végétation..... | 9 |
| | Relations entre les données terrain et l'imagerie thermique | 9 |
| 5 | Conclusion | 14 |
| 6 | Annexe | 15 |
| 7 | Bibliographie..... | 24 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1. Localisation de l'installation des tensiomètres Irrrometer..... | 5 |
| Figure 2. Corrélation entre l'ensemble des valeurs de tension et de température moyenne..... | 9 |
| Figure 3. Corrélation entre les valeurs de tension et de température moyenne – Loam..... | 10 |
| Figure 4. Corrélation entre les valeurs de tension et de température moyenne – Loam argileux. | 10 |
| Figure 5. Corrélation entre les valeurs de tension et de température moyenne – Loam sablo-argileux. | 11 |
| Figure 6. Corrélation entre l'ensemble des valeurs de proportion de détritux et de température moyenne. | 12 |
| Figure 7. Corrélation entre l'ensemble des valeurs de proportion de matière organique et de température moyenne..... | 12 |
| Figure 8. Image thermique (orthomosaïque), vol du 11 juillet 2018. | 15 |
| Figure 9. Image thermique (orthomosaïque), vol du 19 juillet 2018. | 16 |
| Figure 10. Image thermique (orthomosaïque), vol du 27 juillet 2018. | 17 |
| Figure 11. Image thermique (orthomosaïque), vol du 3 août 2018..... | 18 |
| Figure 12. Image thermique (orthomosaïque), vol du 21 août 2018..... | 19 |
| Figure 13. Image thermique (orthomosaïque), vol du 31 août 2018..... | 20 |
| Figure 14. Image thermique (orthomosaïque), vol du 7 septembre 2018..... | 21 |
| Figure 15. Orthomosaïque Indice NDVI, vol du 11 juillet 2018. | 22 |

1 MISE EN CONTEXTE

L'irrigation est de plus en plus utilisée en horticulture au Québec et sur le territoire de la Capitale-Nationale et Chaudière-Appalaches. Seulement pour le territoire de la Capitale-Nationale, ce sont près de 2000 hectares de fraises, bleuets, pommes de terre et légumes variés qui profitent maintenant de l'irrigation. Cette technique offre de nombreux avantages comme l'atteinte de bons rendements de qualité, mais exige en contrepartie une régie stricte pour éviter des manques ou des surplus qui pourraient favoriser des maladies et augmenter les risques de pollution de la nappe par les fertilisants. Aussi, la ressource eau étant souvent limitée, comme à l'Île d'Orléans, un usage qui favorisera une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau d'irrigation sera à privilégier.

Pour optimiser la régie de l'irrigation, les producteurs ont de plus en plus recours à des outils qui permettent d'estimer l'humidité du sol. Les plus utilisés sont les tensiomètres. Ces appareils sont très précis et sont un très bon indicateur de l'état hydrique du sol. Leur limite est qu'ils mesurent le sol à un endroit précis d'un champ donné. Le volume de sol mesuré par un tensiomètre peut être de l'ordre de 2,5 litres. Compte tenu de la faible proportion de sol mesuré, par rapport à l'ensemble d'un champ, il faut en installer environ un tensiomètre par hectare en production de fraises par exemple. Il faut donc que le tensiomètre soit positionné à un endroit le plus représentatif possible de l'ensemble du champ. Il devient très difficile pour les entreprises et leurs conseillers de bien déterminer l'endroit optimal pour installer les outils. Évidemment, il faut considérer la topographie et la texture de sol en surface, mais d'autres facteurs comme la texture du sol en profondeur, le drainage, la hauteur de la nappe phréatique, la présence de brise-vent, etc. Tous ces paramètres vont grandement influencer la réserve en eau et le prélèvement par la plante et par le fait même le positionnement des tensiomètres.

Les producteurs qui respectent la consigne quant au nombre de tensiomètres installés par unité de surface (exemple 3 tensiomètres dans un champ de 3 hectares) sont très souvent confrontés au fait que les valeurs de tension observées sont fort différentes entre elles et ils ont ainsi beaucoup de difficulté à interpréter les valeurs mesurées et à déterminer le moment opportun pour déclencher les irrigations. Il faut donc trouver une méthode qui permettrait de déterminer des zones homogènes dans un champ donné et donc les endroits optimaux où installer les tensiomètres. Ces zones intègreraient l'ensemble des paramètres de sol (surface et profondeur) et des conditions locales (brise-vent, pente, etc.). Par la suite, le producteur n'aura qu'à installer par exemple un tensiomètre dans une zone qui se tient naturellement plus humide, un autre dans la zone intermédiaire et un autre, s'il le désire, dans la zone plus sèche. Ainsi, il serait possible de prendre des décisions éclairées et qui permettront une régie facilitée et une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau. Dans la fraise à jours neutres par exemple, le nombre d'irrigations peut varier entre 50 et 80 par saison, selon les conditions. Ce sont donc autant d'occasions où les décisions seront plus faciles et plus rapides à prendre, tout en étant optimales.

Pour caractériser l'ensemble d'un champ, il faudrait être en mesure de prendre une image quasi instantanée de l'état de stress hydrique de tous les plants et sous diverses conditions (après une pluie, une irrigation, en situation plus sèche, etc.) et de pouvoir associer ce stress aux conditions de sol et pente, brise-vent, etc. Cette caractérisation n'aurait pas à être effectuée chaque année. Une fois réalisée, elle serait pérenne dans le temps, à

moins que des conditions ne changent, par exemple, lors de l'implantation ou l'enlèvement de brise-vent. L'imagerie thermique acquise par drone peut offrir cette possibilité. En effet, lorsqu'un plant est stressé en eau, celui-ci ferme ses stomates pour limiter l'évaporation. Il s'en suit une élévation de la température de la plante. Donc, à un moment précis, la plante ayant un feuillage avec une température plus élevée sera plus stressée en eau qu'une plante bien irriguée et sera un indicateur d'état de manque d'eau dans le sol. Évidemment, tout cela est conditionnel à ce que d'autres facteurs comme les maladies racinaires ou l'excès d'eau par exemple ne soient pas présents, car ils pourraient être la cause du stress. C'est pourquoi il est important de jumeler à l'imagerie thermique les indices de végétation par différence normalisée NDVI (Indice de végétation par différence normalisé) qui sont des indicateurs additionnels permettant de déceler des problèmes de maladies ou insectes par exemple.

L'imagerie thermique acquise par drone a fait l'objet d'un projet dans la pomme de terre en 2016 et 2017 (Agili et coll. 2017). Les résultats obtenus ont clairement démontré le potentiel de cette technique comme outil indicateur de stress hydrique. Un essai préliminaire avec le fournisseur de services DroneXperts effectué en 2017 (un vol) à l'île d'Orléans dans un champ de fraises du requérant a permis d'obtenir des résultats très encourageants et a démontré le potentiel pour la fraise.

2 OBJECTIF

Cibler les zones homogènes dans un champ donné par imagerie thermique acquise par drone pour déterminer les endroits où l'installation des tensiomètres serait optimisée.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODE

SITE EXPÉRIMENTAL

L'étude a été réalisée à la ferme François Gosselin dans un champ (160 mètres de longueur par 70 mètres de largeur) en production commerciale de fraise à jours neutres, situé à Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans. Le projet s'est échelonné sur l'ensemble de l'été 2018, soit entre 19 juillet et le 13 septembre.

STATUT HYDRIQUE DU SOL

Le statut hydrique du sol a été précisé sur l'ensemble d'un champ en 21 points de mesures ainsi que dans un champ adjacent (1 point de mesure). Le statut hydrique du sol a été suivi à l'aide de tensiomètres (*Irrrometer*, SR,) (*Hortau*, TX3Web). La localisation des tensiomètres a été bien répartie sur l'ensemble du champ et est présentée à la Figure 1.

Localisation des tensiomètres

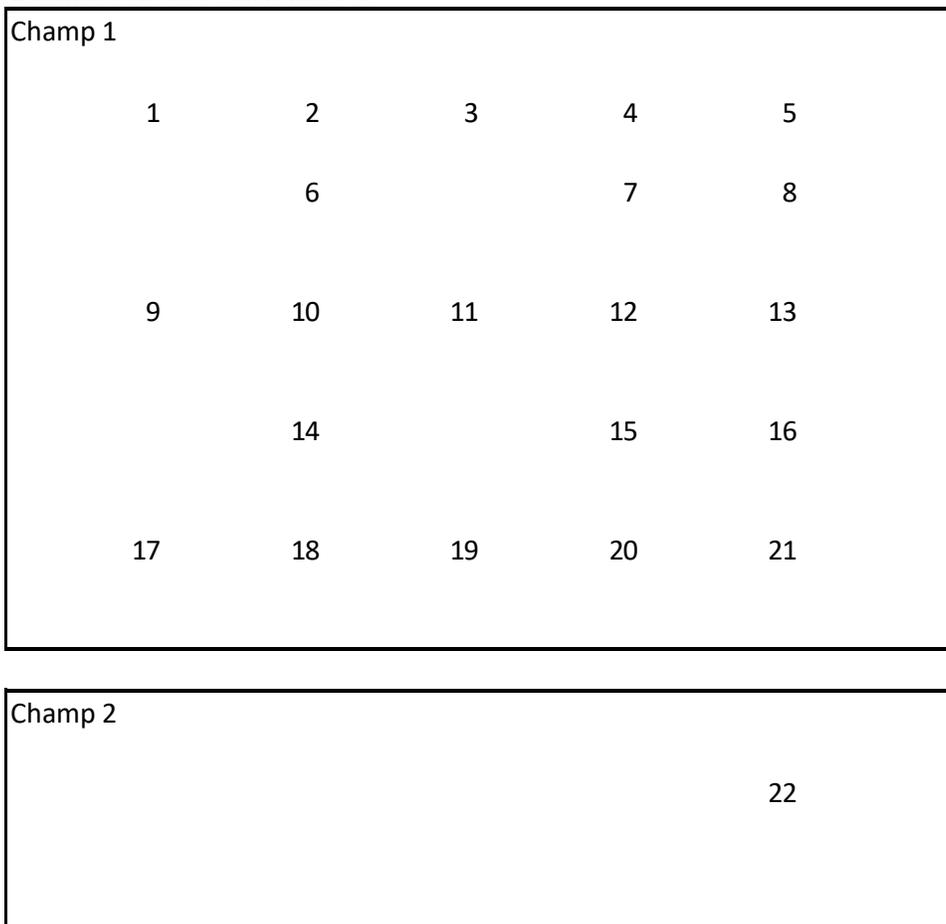


Figure 1. Localisation de l'installation des tensiomètres Irrrometer.

CARACTÉRISATION DE PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DU SOL

La caractérisation du champ a été effectuée sur l'horizon 0 à 20 cm. La granulométrie a été déterminée par la méthode de l'hydromètre en six points, suivie d'un tamisage des sables (Gee et Bauder, 1986). Le contenu en matière organique totale a été calculé selon le contenu en C_{tot} , déterminé au LECO, avec un facteur de conversion de 1,724.

IMAGERIE THERMIQUE ET INDICE DE VÉGÉTATION

La captation des différentes images s'est réalisée à l'aide de vols de drones (*DJI*, Inspire1, Phantom4 pro ou M200), de caméras visuelles (*DJI*, X4S, Phantom4), d'une caméra multispectrale (*Micasense*, Rededge M) et d'une caméra thermique (*DJI*, Zenmuse XTR). Les paramètres de vol pour la caméra visuelle ont été les suivants (M200 ou Phantom4) :

- Hauteur de vol 60 m
- Chevauchement 80/60
- Double grille, une seule altitude
- S'assurer que toutes les cibles sont visibles sur au moins 4 images

Pour les caméras multispectrale et thermique, les paramètres de vols ont été les suivants (Inspire1) :

- 2 caméras simultanément
- Prendre les photos de la plaque de calibration de réflectance
- Chevauchement élevé (80/80) pour les 2 caméras
- Vitesse de vol moyen
- Hauteur de vol 60 m
- Double grille, une seule altitude
- S'assurer que toutes les cibles sont visibles sur au moins 4 images

La méthodologie considère que DroneXperts respecte en tous points les normes et les demandes de permis exigés (COAS) par Transport Canada. Les pilotes responsables du vol sont qualifiés et sous la responsabilité de la compagnie. Les dates de vols ont tenu compte de la vitesse du vent, de la pluie, de la disponibilité du site, etc.

Traitement de données

Chaque captation est traitée avec le logiciel de photogrammétrie Pix4Dmapper. Ce logiciel permet de générer des points de correspondance entre chaque image, des nuages de points, maillage triangulaire et les orthomosaïques résultantes. Ce logiciel permet également de générer les cartes de réflectance afin de calculer des indices de végétation (multispectrale) et les valeurs de température (thermique) pour chaque pixel de l'orthomosaïque. Ces données peuvent par la suite être extraites à des fins d'analyses.

4 ANALYSE DES RÉSULTATS

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DU SOL

L'analyse des propriétés physiques des sols a permis de déterminer la présence de trois classes texturales à l'intérieur du champ, soit un loam, un loam sablo-argileux et un loam argileux. Une prédominance du loam sablo-argileux a été observée dans le champ, car 18 points d'échantillonnage sur 21 étaient de cette texture. La proportion de détritiques ayant un diamètre supérieur à 2 mm variait de 29 à 56 %. La matière organique, quant à elle, variait de 2,8 à 4,3 %. Aucun patron du sol concernant les détritiques et la matière organique n'a été observé. Malgré la grande uniformité de la texture du sol, ce champ présente tout de même de fortes caractéristiques hétérogènes. Les données sont présentées en annexe au Tableau 2.

SUIVI DU STATUT HYDRIQUE DU SOL

Le statut hydrique du sol a été suivi manuellement à l'aide des tensiomètres *Irrrometer* entre le 19 juillet et le 13 septembre. Ainsi, les données ont été saisies pendant huit semaines. Les résultats sont présentés au Tableau 1. Les valeurs du tensiomètre TX3 (tensiomètre 7 dans le tableau) ont été extraites de la plateforme web Irrolis aux mêmes heures que lors de la prise de mesure des tensiomètres *Irrrometer*. Les tensiomètres 14, 15 et 22 étaient munis de 2 points de mesures, le premier à 6 pouces et le deuxième à 12 pouces de profondeur.

La prise de données des valeurs de tensiométrie devait être réalisée immédiatement après le vol de drone. Cependant, pour certaines dates, la prise de données ne put être effectuée que plusieurs minutes après la fin du vol (jusqu'à 120 minutes). Cet écart pourrait avoir eu un effet quant à la correspondance entre les valeurs d'imagerie thermique obtenues avec le drone à celles de tension de l'eau du sol mesurées par les tensiomètres. Certains tensiomètres étaient déchargés à plusieurs reprises pendant la période de prise de données, diminuant ainsi le nombre de comparaisons possibles.

Tableau 1. Potentiel matriciel (kPa) mesuré par les tensiomètres (22) selon la date du suivi.

| Date | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 * | 15 * | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 * |
|---------------------------|----|----|------|----|------|------|----|------|----|----|----|----|------|-----------------|-----------------|----------------|----|------|----|------|----|----------------|
| Potentiel matriciel (kPa) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 juillet | 12 | 4 | 7 | 25 | 16 | n.d. | 12 | n.d. | 12 | 10 | 23 | 27 | 7 | 25 et 8 | 11 et 11 | n.d. | 44 | 0 | 8 | 3 | 24 | 15 et 21 |
| 27 juillet | 5 | 1 | 9 | 7 | 7 | 3 | 5 | n.d. | 10 | 2 | 1 | 8 | 6 | 4,9 à 3,1 | 5,7 à 4,8 | n.d. | 10 | 1 | 11 | 1 | 7 | 2 et 13 |
| 3 août | 6 | 1 | 3 | 19 | 20 | n.d. | 20 | n.d. | 8 | 4 | 7 | 9 | 13 | 37 et 4 | 19 et 5 | n.d. | 48 | 0 | 10 | 2 | 17 | 6 et 12 |
| 13 août** | 23 | 4 | 4 | 24 | n.d. | n.d. | 67 | n.d. | 11 | 20 | 36 | 44 | n.d. | 67 et 46 | 43 et 13 | n.d. | 2 | n.d. | 17 | n.d. | 70 | 53 et 29 |
| 21 août | 12 | 2 | 6 | 26 | n.d. | n.d. | 50 | n.d. | 12 | 10 | 18 | 28 | 7 | 36 et 20 | 49 et 10 | n.d. | 70 | 55 | 10 | 2 | 13 | 14 et 42 |
| 31 août | 24 | 5 | 5 | 21 | n.d. | n.d. | 26 | 16 | 20 | 7 | 8 | 18 | 17 | n.d. | 14 et 25 | n.d. | 42 | 19 | 10 | n.d. | 16 | n.d. |
| 7 sept. | 40 | 35 | n.d. | 25 | n.d. | n.d. | 59 | n.d. | 34 | 13 | 15 | 34 | 32 | n.d. | 8 | n.d. | 52 | 44 | 18 | n.d. | 38 | n.d. |
| 13 sept. | 29 | 16 | n.d. | 24 | n.d. | 56 | 60 | 54 | 28 | 10 | 8 | 28 | 28 | 40 | n.d. | 43 et 13 | 55 | 36 | 22 | n.d. | 34 | n.d. |

* La première et la deuxième valeur correspondent respectivement à la tension à 6 et 12 pouces de profondeur.

** Aucun vol de drone n'a été effectué pour cette date, les données de tensiométrie n'ont donc pas été mises en relation avec des données d'imagerie thermique.

IMAGERIE THERMIQUE ET INDICE DE VÉGÉTATION

Les images thermiques démontrent bien les variations de température dans la culture de fraise durant la période étudiée. Ces images sont présentées en annexe (Figure 8 à Figure 14).

L'image d'indice de végétation (Figure 15) effectuée le 11 juillet démontre un développement uniforme de la culture dans le champ où le suivi était effectué. En effet, la distribution des valeurs était plutôt homogène et ne laissait paraître aucun patron. Il faut cependant mentionner que les valeurs saturaient après 65-70 %.

RELATIONS ENTRE LES DONNÉES TERRAIN ET L'IMAGERIE THERMIQUE

Les valeurs de tension ont été mises en relation avec les valeurs de température provenant de l'imagerie thermique afin de déterminer si les valeurs de tension pouvaient être expliquées par les patrons de température. La corrélation entre ces deux paramètres est présentée à la Figure 2. Les données correspondent à l'ensemble des valeurs de tensiomètres couplées à leurs valeurs de température respectives pour chaque période d'envol de drone.

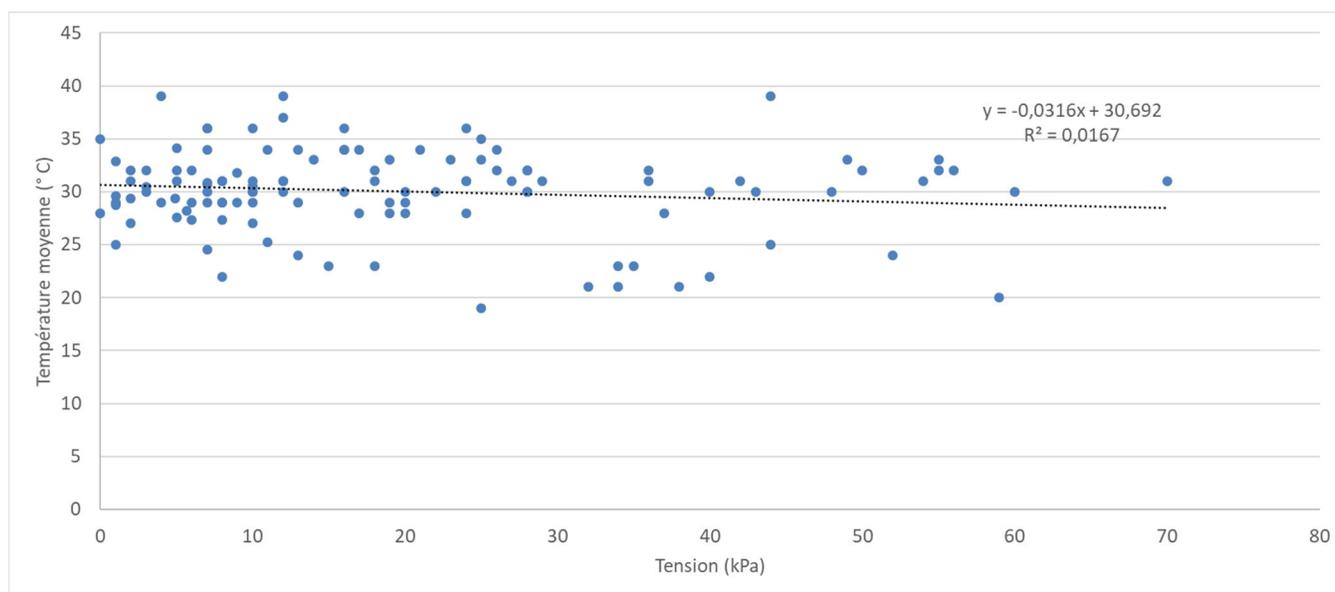


Figure 2. Corrélation entre l'ensemble des valeurs de tension et de température moyenne.

Cette très faible corrélation ($R^2=0,0167$) démontre l'absence de relation entre la tension et la température obtenue par imagerie thermique pour ce champ. De faibles corrélations (Loam $R^2=0,1019$; Loam argileux

$R^2=0,2179$; Loam sablo-argileux $R^2=0,0081$) sont aussi obtenues lorsque les valeurs sont séparées en fonction de la texture du sol (Figure 3, Figure 4, Figure 5).

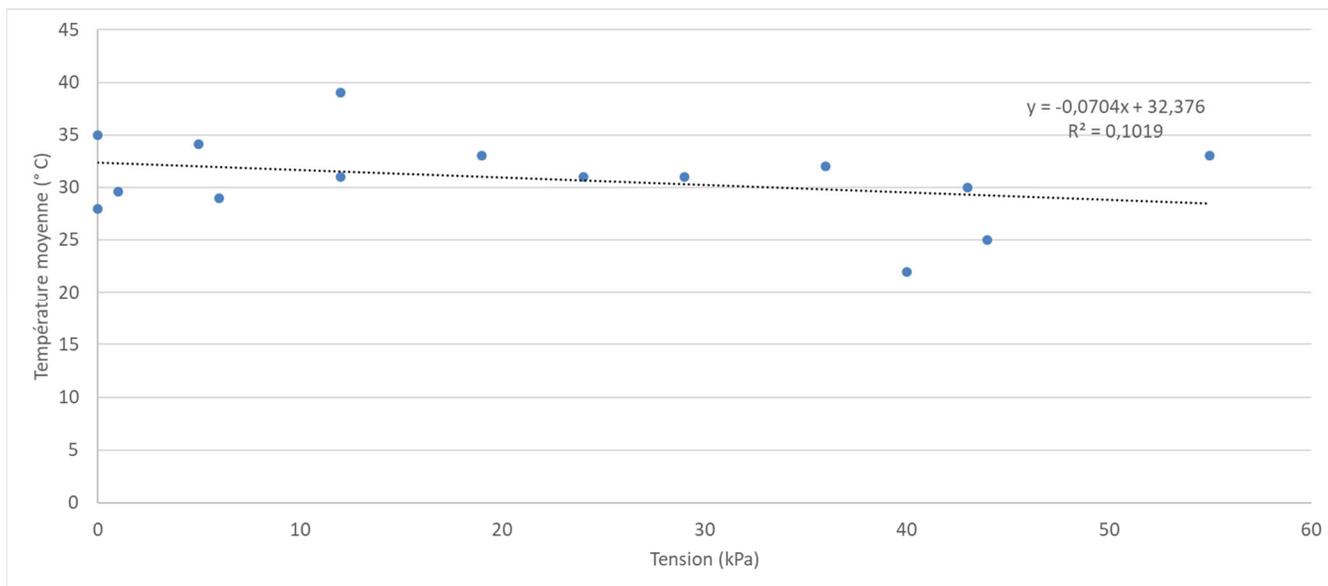


Figure 3. Corrélation entre les valeurs de tension et de température moyenne – Loam.

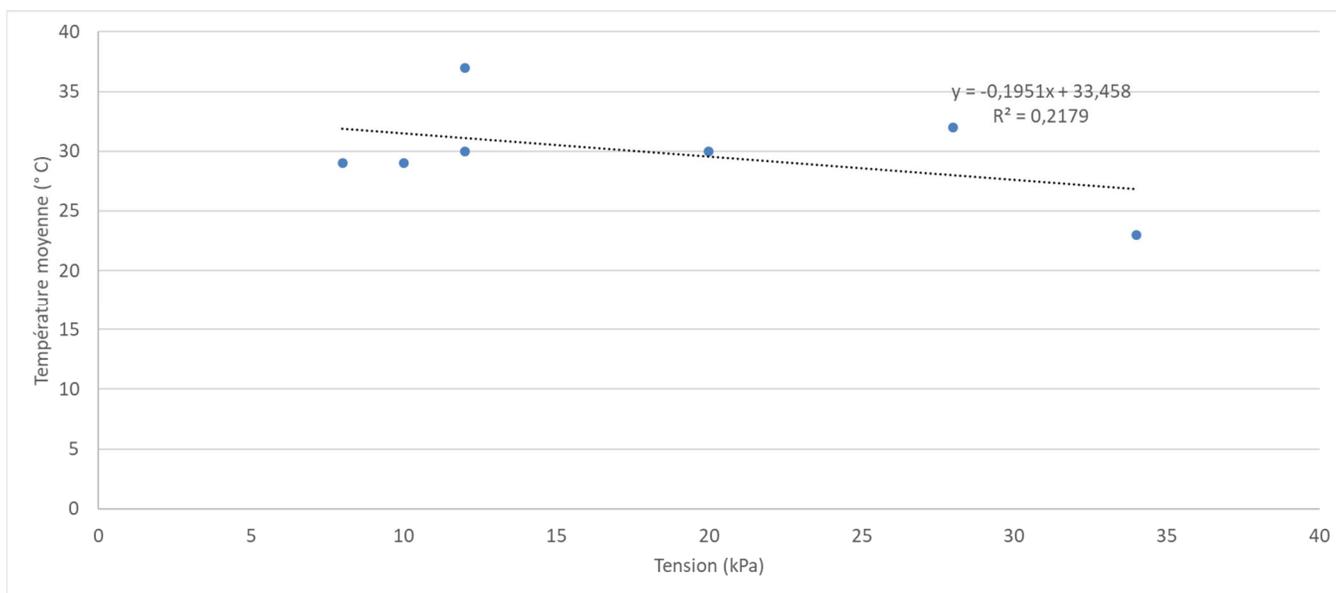


Figure 4. Corrélation entre les valeurs de tension et de température moyenne – Loam argileux.

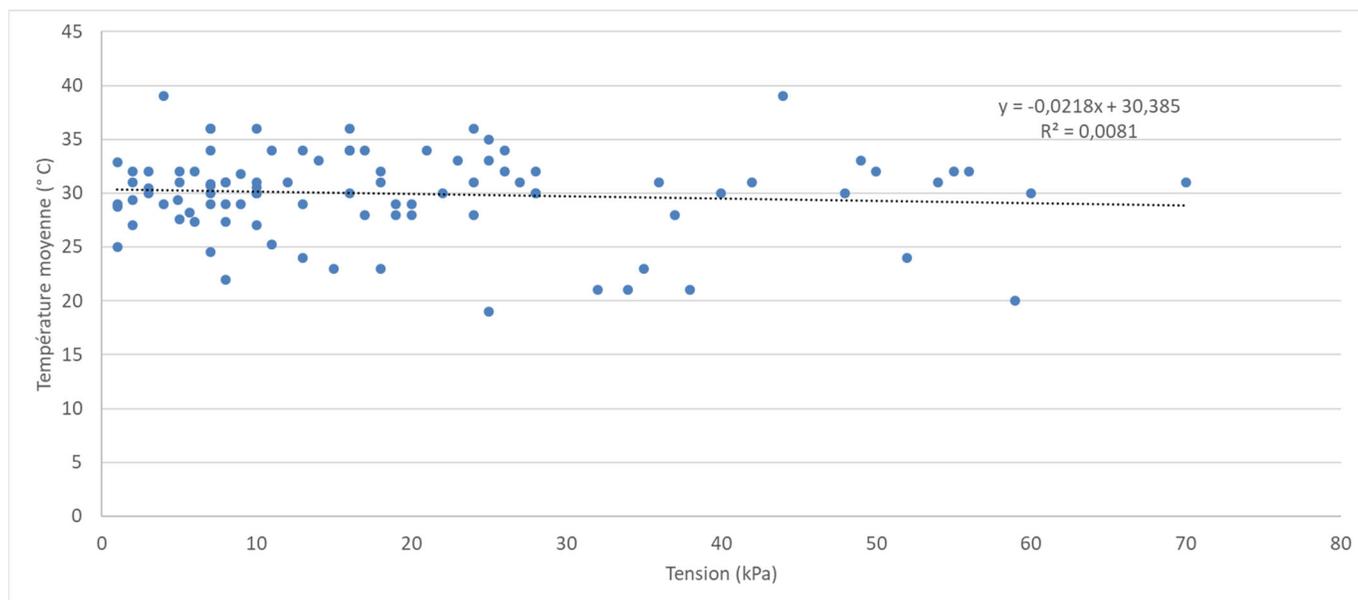


Figure 5. Corrélation entre les valeurs de tension et de température moyenne – Loam sablo-argileux.

Ces mêmes relations ont été observées à l'échelle d'une journée, mais toujours en démontrant de très faibles valeurs (données non présentées). Afin de faire ressortir un effet du terrain quant à l'observation de zones d'homogénéité, ces relations ont également été affectées par rang et par lignes correspondant à l'emplacement des tensiomètres et des valeurs d'imagerie thermique (données non présentées). Par exemple, la corrélation provenant des données du premier rang instrumenté, correspondant aux tensiomètres 2, 6, 10, 14 et 18, était générée. Cette même logique a été appliquée pour les lignes (ex. tensiomètres 1, 2, 3, 4 et 5). Ce regroupement de données n'a cependant pas permis d'observer de meilleures corrélations que celles déjà présentées.

Les données d'imagerie thermique ont été mises en relation avec les proportions de débris avec diamètre supérieur à 2 mm et de matière organique (Figure 6, Figure 7) afin de déterminer leur importance quant aux patrons de température observés. Les corrélations obtenues ne démontrent aucun lien clair entre la matière organique ou les proportions de débris et la température par imagerie thermique.

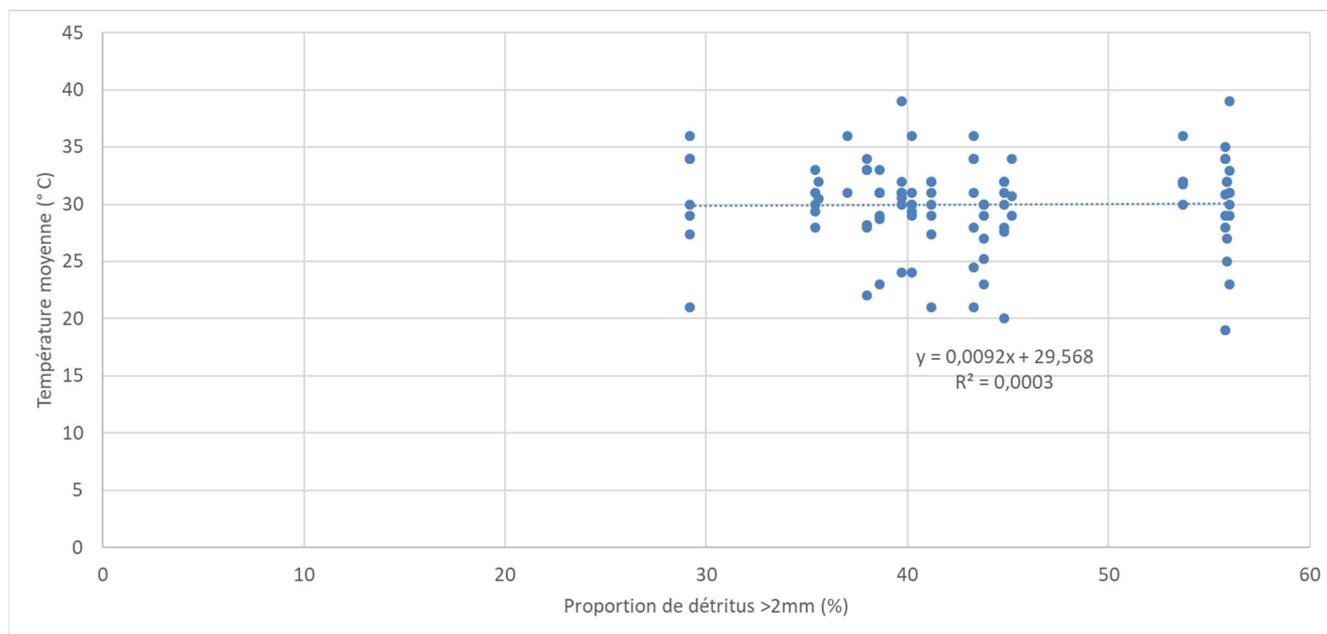


Figure 6. Corrélation entre l'ensemble des valeurs de proportion de débris et de température moyenne.

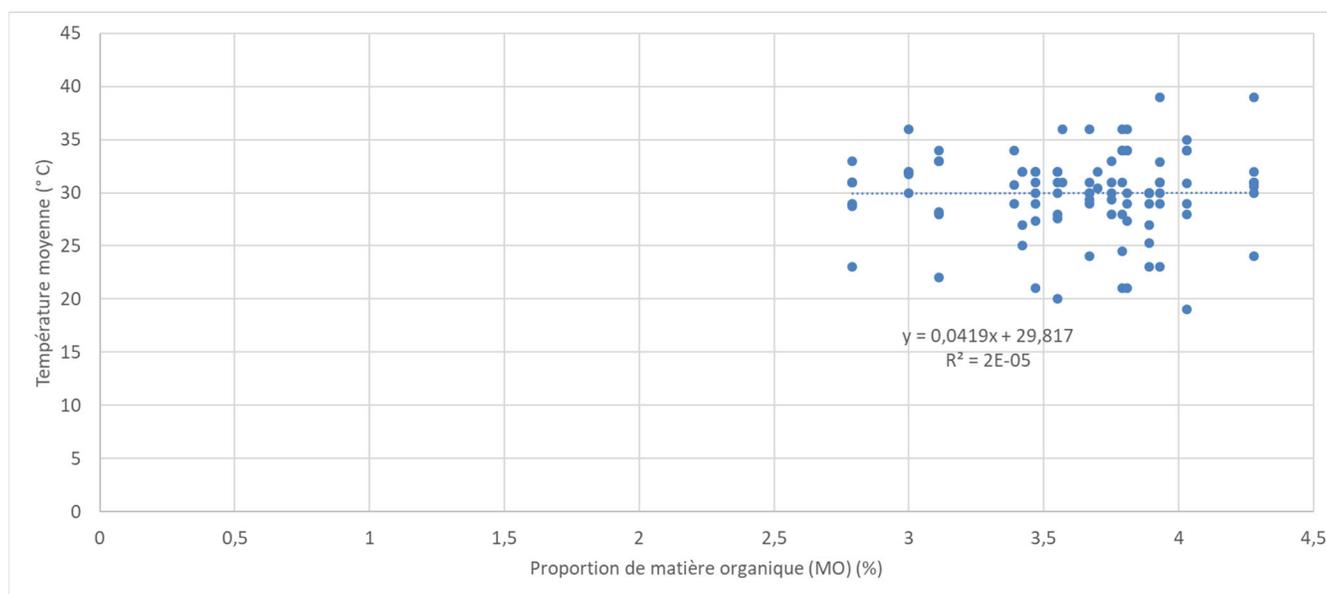


Figure 7. Corrélation entre l'ensemble des valeurs de proportion de matière organique et de température moyenne.

Plusieurs facteurs pourraient expliquer pourquoi les résultats ne permettent pas d'observer différentes zones de sol homogènes.

Ce projet a été réalisé sur une entreprise agricole qui effectue une excellente régie d'irrigation. Les apports en eau d'irrigation fréquents, allant jusqu'à plusieurs reprises par journée, font probablement en sorte de diminuer les variations de teneur en eau et de tension dans le sol. Ces faibles variations ont nécessairement un effet sur les variations observables par imagerie thermique, limitant ainsi l'apparition dans le champ de différentes zones homogènes en termes de température.

Les conditions météorologiques changeantes (pluie, vent, température, radiation solaire) ont modifié les valeurs de température par imagerie thermique d'une date à une autre, diminuant l'éventualité d'observer de manière continue des zones homogènes.

La présence de paillis de polyéthylène noir recouvrant les buttes de sol est également un paramètre à considérer, quoi que son effet n'est pas pu être analysé dans ce projet.

Les valeurs de température sur l'orthomosaïque sont des valeurs moyennes obtenues de chaque image qui se chevauchent. L'angle de la prise d'image occasionnera un effet sur le résultat de la température. Cet effet pourrait être évité en utilisant une autre méthode d'analyse, incluant les données brutes. Cependant, cette méthode ne pouvait être pratiquée dans le cadre de ce projet.

Les parties externes à la parcelle de fraise ne sont pas précises, car le drone n'a pas survolé cette zone. Il existait donc un chevauchement insuffisant pour un traitement efficace avec Pix4D pour les surfaces à l'extérieur du champ ou l'essai se déroulait. Cette observation ne vient cependant en aucun cas biaiser les résultats obtenus.

5 CONCLUSION

Malgré l'absence de relation entre les valeurs de températures moyennes, issues de l'imagerie thermique, et les valeurs de tension de l'eau du sol, cette approche mérite toutefois d'être toujours considérée pour l'observation de zones de sol présentant des conditions hydriques homogènes. Les résultats prometteurs obtenus dans le cadre d'un projet précédent, en culture de pommes de terre, permettent de l'affirmer (Agili et coll. 2017). Toutefois, le contexte dans lequel ce présent projet a été réalisé laisse croire que la visualisation, par l'imagerie thermique, de zones de sol homogène serait favorisée par la présence de différentes régions d'irrigation.

Les résultats obtenus pourront servir à mettre sur pied d'éventuels nouveaux projets afin de préciser les conditions culturales dans lesquelles l'imagerie thermique trouvera son plein potentiel afin d'optimiser la gestion de l'irrigation dans les entreprises agricoles.

6 ANNEXE

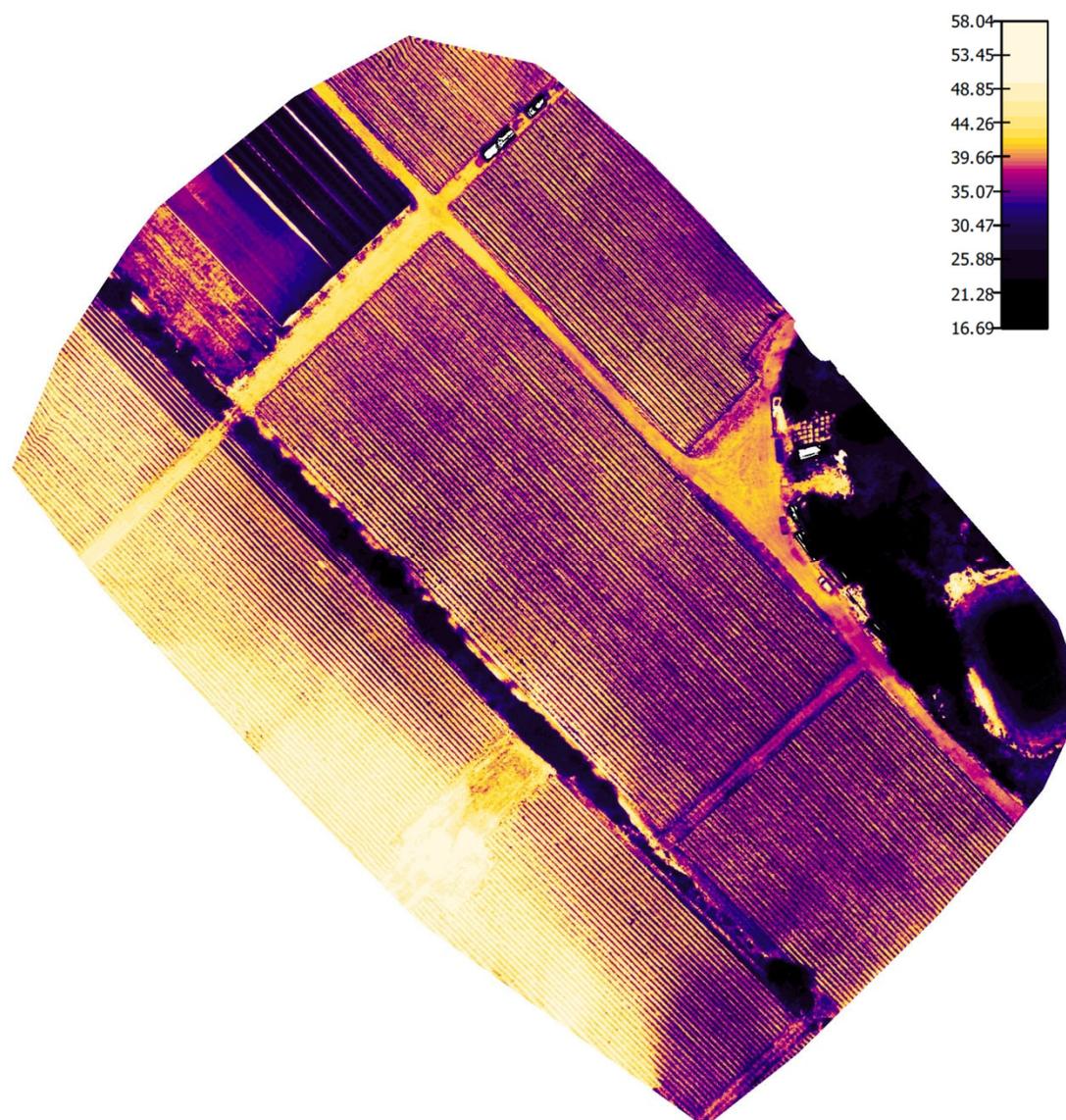


Figure 8. Image thermique (orthomosaïque), vol du 11 juillet 2018.

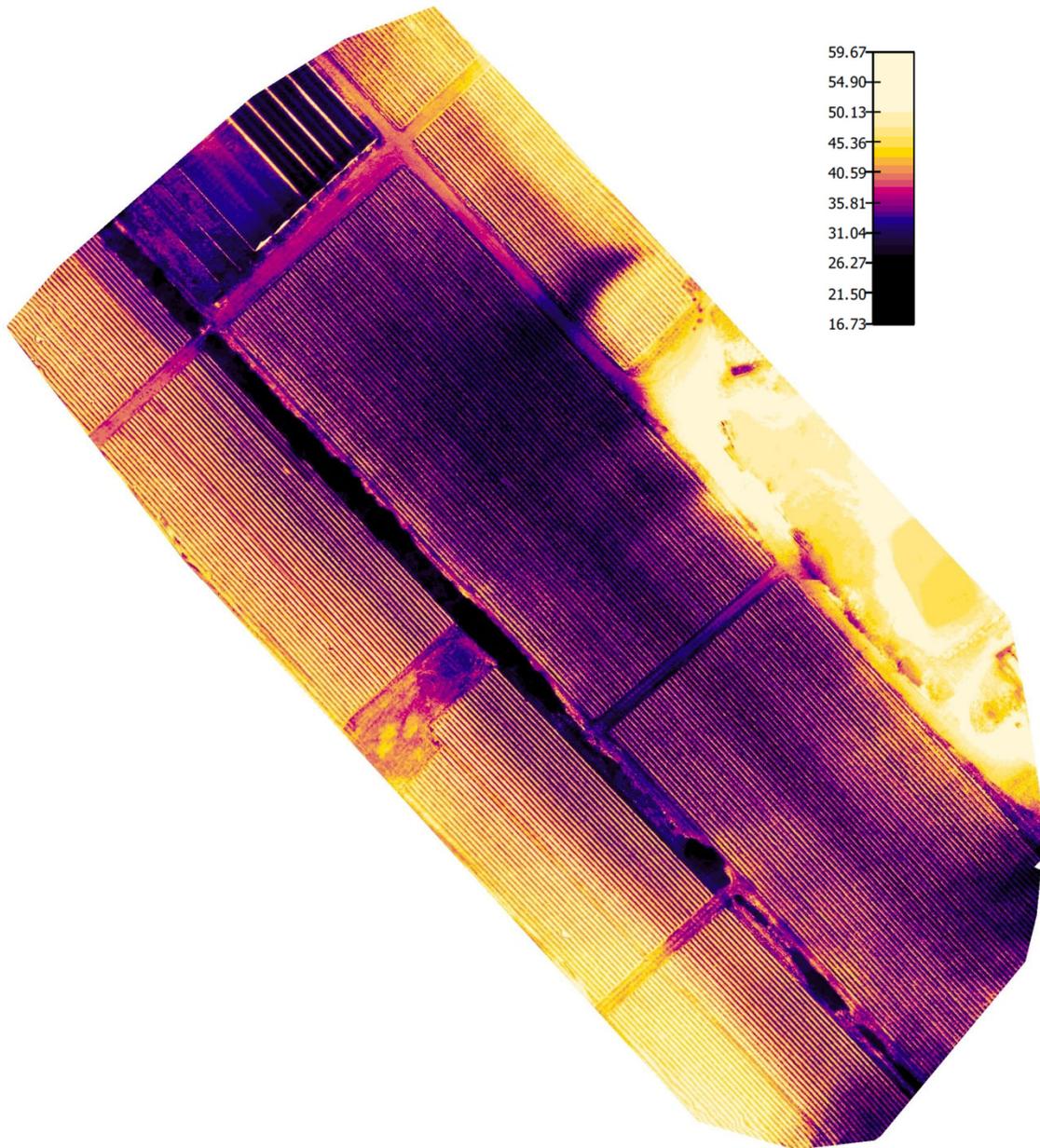


Figure 9. Image thermique (orthomosaïque), vol du 19 juillet 2018.

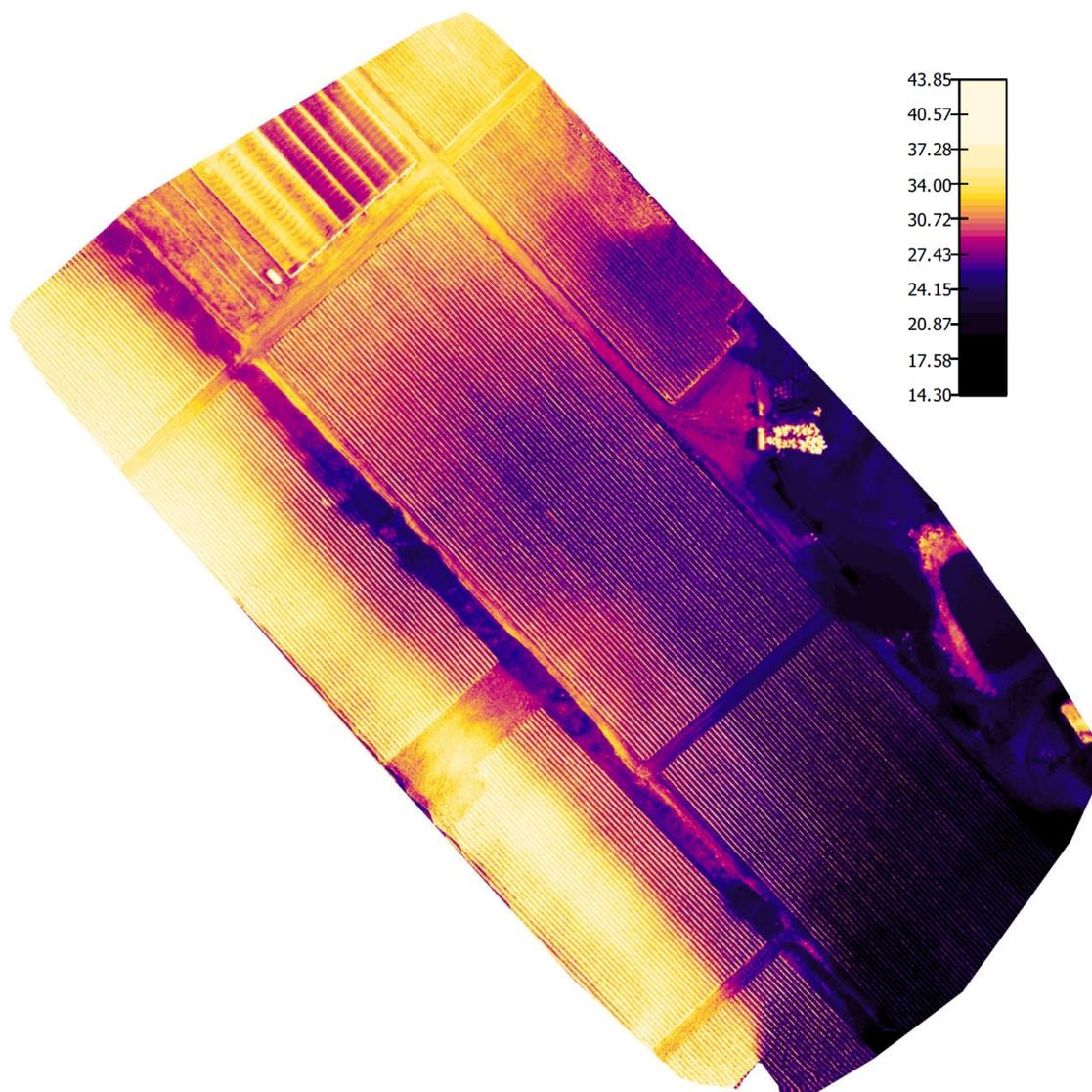


Figure 10. Image thermique (orthomosaïque), vol du 27 juillet 2018.

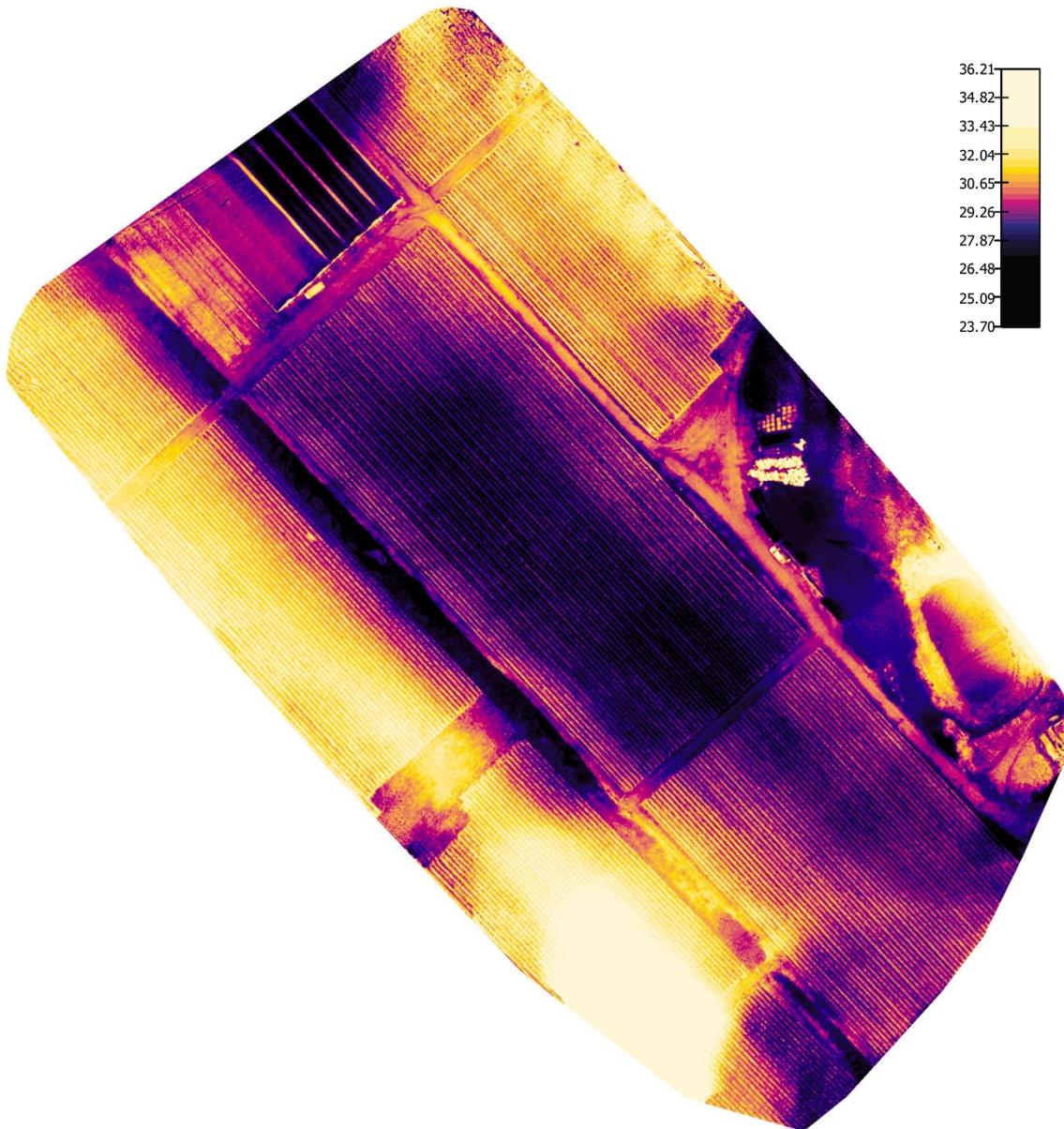


Figure 11. Image thermique (orthomosaique), vol du 3 août 2018.

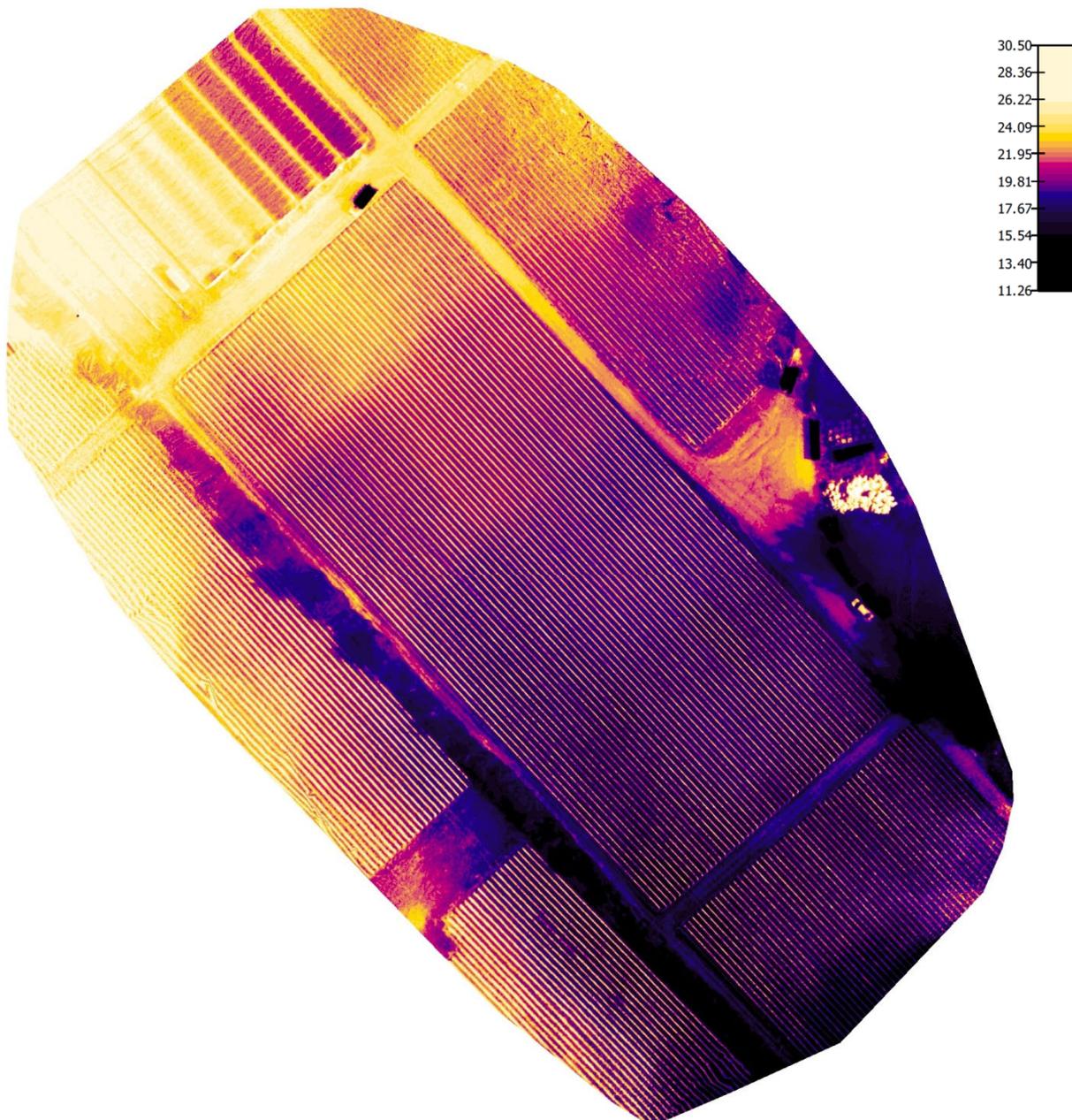


Figure 12. Image thermique (orthomosaique), vol du 21 août 2018.

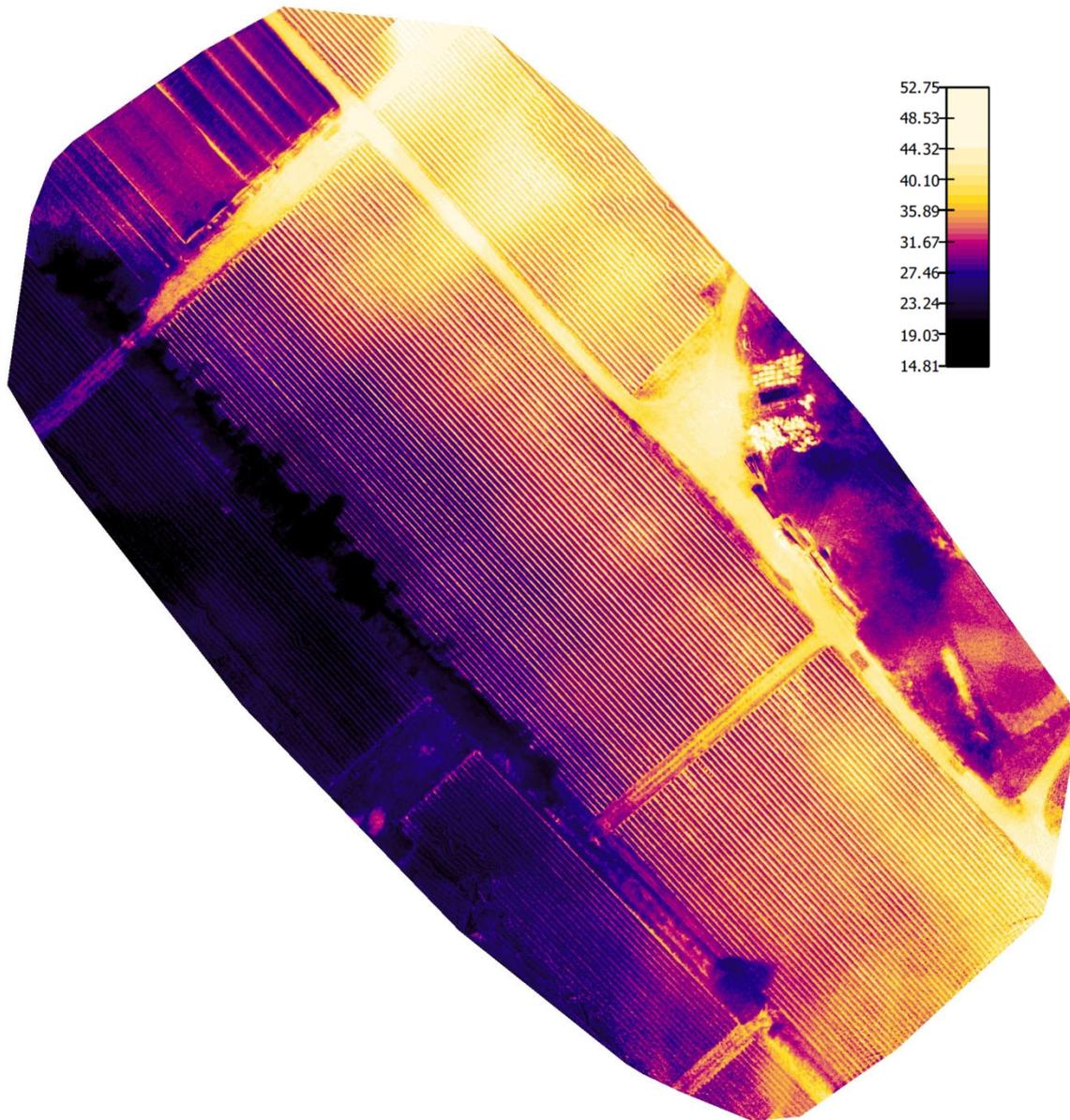


Figure 13. Image thermique (orthomosaïque), vol du 31 août 2018.

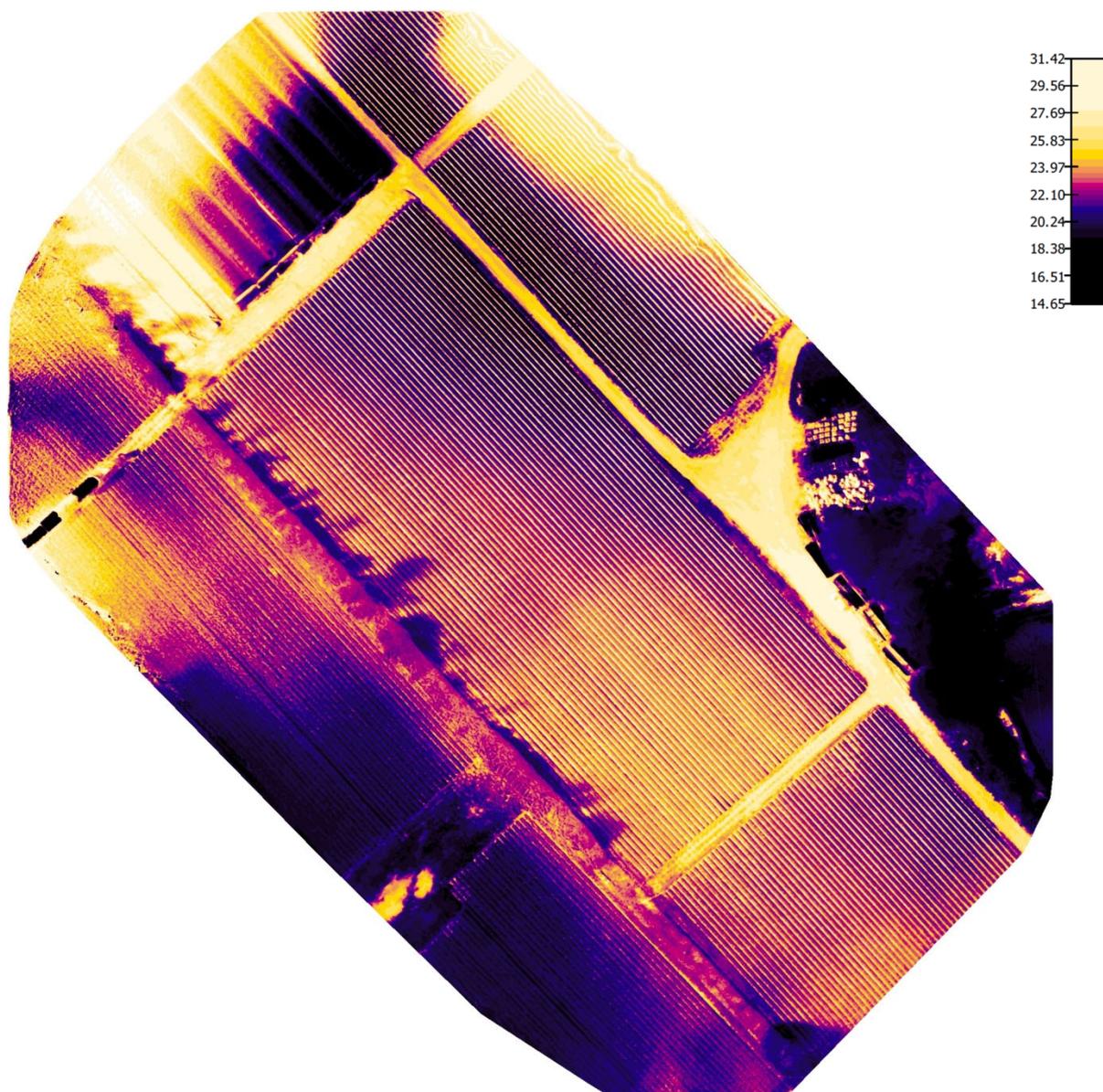


Figure 14. Image thermique (orthomosaique), vol du 7 septembre 2018.

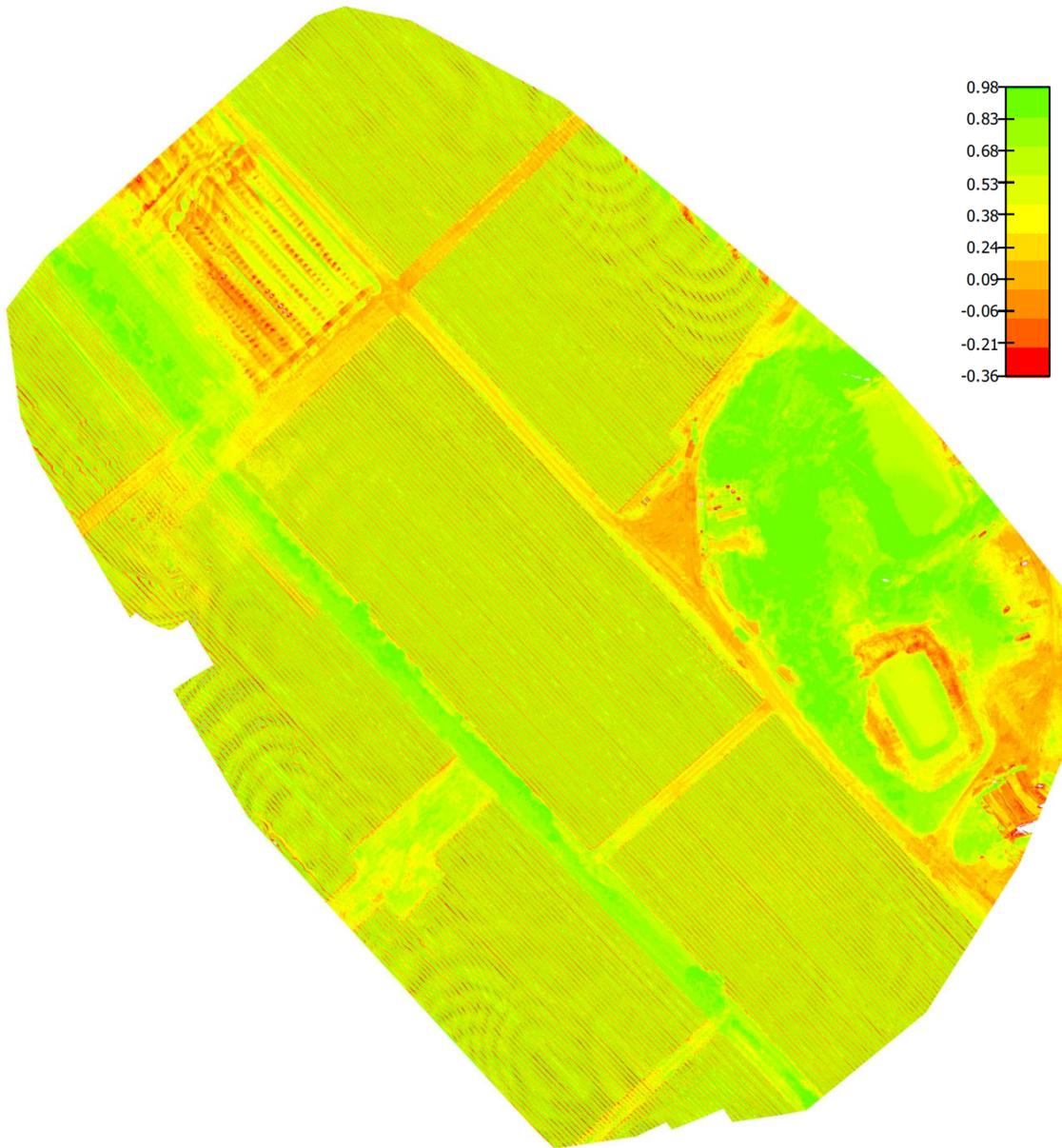


Figure 15. Orthomosaïque Indice NDVI, vol du 11 juillet 2018.

Tableau 2. Analyses physiques des sols.

| Tensiomètre | % Détritrus | M.O. | Sable très gros | Sable gros | Sable moyen | Sable fin | Sable très fin | Limon gros | Limon moyen | Limon fin | Sable | Limon | Argile | Texture |
|-------------|-------------|------|-----------------|------------|-------------|-----------|----------------|------------|-------------|-----------|-------|-------|--------|---------------------|
| | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | |
| 1 | 40,8 | 3,55 | 22 | 14 | 5 | 2 | 3 | 8 | 11 | 10 | 46 | 29 | 25 | LOAM |
| 2 | 56,0 | 3,93 | 27 | 15 | 5 | 2 | 3 | 2 | 13 | 9 | 51 | 24 | 25 | LOAM SABLO-ARGILEUX |
| 3 | 53,7 | 3,00 | 32 | 19 | 5 | 1 | 2 | 1 | 9 | 8 | 60 | 18 | 22 | LOAM SABLO-ARGILEUX |
| 4 | 55,8 | 4,03 | 23 | 15 | 6 | 4 | 4 | 3 | 12 | 9 | 52 | 24 | 24 | LOAM SABLO-ARGILEUX |
| 5 | 45,2 | 3,39 | 23 | 17 | 4 | 2 | 3 | 4 | 11 | 11 | 50 | 26 | 24 | LOAM SABLO-ARGILEUX |
| 6 | 35,6 | 3,70 | 20 | 15 | 5 | 3 | 5 | 3 | 13 | 10 | 47 | 26 | 27 | LOAM SABLO-ARGILEUX |
| 7 | 44,8 | 3,55 | 27 | 21 | 5 | 2 | 3 | 2 | 9 | 9 | 58 | 20 | 22 | LOAM SABLO-ARGILEUX |
| 8 | 37,0 | 3,57 | 24 | 19 | 4 | 1 | 3 | 4 | 10 | 10 | 52 | 24 | 24 | LOAM SABLO-ARGILEUX |
| 9 | 34,0 | 4,13 | 21 | 13 | 5 | 2 | 4 | 7 | 12 | 9 | 44 | 28 | 28 | LOAM ARGILEUX |
| 10 | 40,2 | 3,67 | 20 | 14 | 6 | 2 | 3 | 5 | 14 | 8 | 45 | 27 | 28 | LOAM SABLO-ARGILEUX |
| 11 | 38,6 | 2,79 | 29 | 20 | 5 | 1 | 2 | 3 | 11 | 7 | 57 | 21 | 22 | LOAM SABLO-ARGILEUX |
| 12 | 41,2 | 3,47 | 33 | 17 | 3 | 1 | 2 | 1 | 10 | 9 | 56 | 20 | 24 | LOAM SABLO-ARGILEUX |
| 13 | 29,2 | 3,81 | 22 | 20 | 5 | 2 | 4 | 2 | 13 | 10 | 52 | 25 | 23 | LOAM SABLO-ARGILEUX |
| 14 | 35,4 | 3,75 | 22 | 16 | 5 | 2 | 4 | 3 | 15 | 9 | 49 | 27 | 24 | LOAM SABLO-ARGILEUX |
| 15 | 38,0 | 3,11 | 25 | 20 | 3 | 1 | 3 | 1 | 14 | 10 | 52 | 25 | 23 | LOAM SABLO-ARGILEUX |
| 16 | 39,8 | 3,40 | 22 | 16 | 5 | 3 | 4 | 5 | 14 | 9 | 50 | 28 | 22 | LOAM |
| 17 | 39,7 | 4,28 | 21 | 11 | 5 | 4 | 6 | 4 | 14 | 9 | 48 | 27 | 25 | LOAM SABLO-ARGILEUX |
| 18 | 38,6 | 3,77 | 22 | 14 | 5 | 2 | 2 | 6 | 14 | 9 | 46 | 29 | 25 | LOAM |
| 19 | 43,8 | 3,89 | 20 | 14 | 6 | 3 | 5 | 3 | 16 | 8 | 47 | 27 | 26 | LOAM SABLO-ARGILEUX |
| 20 | 55,9 | 3,42 | 27 | 13 | 5 | 2 | 4 | 3 | 14 | 8 | 51 | 25 | 24 | LOAM SABLO-ARGILEUX |
| 21 | 43,3 | 3,79 | 27 | 15 | 6 | 3 | 5 | 3 | 11 | 8 | 56 | 22 | 22 | LOAM SABLO-ARGILEUX |

7 BIBLIOGRAPHIE

Agili, H., P. Chatelle, K. Chokmani, D. Bergeron et C. Boivin. 2017. Étude du potentiel de l'imagerie infrarouge thermique acquise par drone pour la détection du stress hydrique dans la culture de pommes de terre, Conférence, Sommet 2017 Observation de la Terre, 20 juin 2017.

Gee, G.W. et J.W. Bauder, 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. In A. Klute (ed) Methods of soil analysis, Part 1. ASA, Monograph No 9, 2nd edition, Madison, WI.