

COMPARAISON DES IMAGES PLEIADES ET DRONE POUR LA VITICULTURE DE PRECISION DANS LE CADRE DU PROGRAMME EARHLAB

Christelle Barbey¹, Jérôme Helbert², Arnaud Jaën², Élodie Pagot², Jean-Charles Samalens², Lilian Valette², Christian Germain³, Dominique Guyon⁴, Jean-Pierre Wigneron⁴

1: Telespazio France, Toulouse, France.

christelle.barbey@telespazio.com

2: Telespazio France, Latresne, France.

3: Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système, Talence, France.

4: Institut National de la Recherche Agronomique, UMR 1391 ISPA, Villenave d'Ornon, France.

Résumé

Une étude comparative entre des acquisitions Pléiades et par drone a été menée pour des applications de viticulture de précision dans la région Aquitaine, sur le vignoble de Buzet et deux domaines du Bordelais. Cette étude montre une bonne cohérence entre les résultats obtenus à partir de différents capteurs, à la fois pour la caractérisation des paramètres parcellaires et pour l'estimation de la vigueur de la vigne. En particulier, Pléiades met en évidence les variabilités et hétérogénéités intra-parcellaires. Pléiades est donc pertinent pour caractériser des domaines viticoles à l'échelle de l'appellation. Cependant, la résolution du satellite Pléiades limite la détection des plus petites structures à l'intérieur des rangs et empêche la caractérisation des parcelles pour lesquelles les rangs sont plus resserrés (écarts inférieurs à deux mètres). Le recours à des technologies de meilleure résolution (notamment le drone) est alors essentiel pour des caractérisations plus précises à l'échelle d'un domaine.

Mots-clés : Viticulture de précision, Pléiades, Drone

Abstract

A comparative study between Pléiades and UAV images has been conducted for precision viticulture applications in the Aquitaine region over Buzet vineyard and two Bordeaux domains. This study has shown a good agreement between the results obtained from the different sensors, both for the characterisation of the vine plots and for the vineyard vigour assessment. Especially local vineyard heterogeneities and variabilities can be demonstrated on Pléiades imagery, which is consequently of interest for the characterisation of vineyards at regional scale. However detection of small structures is limited by Pléiades spatial resolution especially where the vine row distance is narrow (less than 2 metres). Use of alternate technologies with better spatial resolution such as Unmanned Aerial Vehicles (UAV) is relevant for more accurate plot parameter characterisations.

Keywords: Precision viticulture, Pléiades, UAV

1. Introduction

Bien que gérés en grande majorité de manière globale, les domaines viticoles présentent intrinsèquement de nombreux paramètres environnementaux – nature du sol, réserve en eau, pente et ensoleillement, orientation des rangs, foyers infectieux... – dont la variabilité spatiale contribue pour l'essentiel à la différence de qualité des grains récoltés lors des vendanges et par conséquent à la qualité des vins élaborés. La connaissance de ces variabilités spatiales est donc très importante dans le cadre d'une gestion des domaines visant une homogénéisation de la récolte et une augmentation qualitative du vin. Toutefois la gestion des parcelles est généralement effectuée sur la base d'échantillonnages réalisés sur le terrain qui ne peuvent pas rendre compte de toute la variabilité de la vigueur des vignes. En utilisant des techniques de télédétection, il est possible de s'affranchir de ces mesures de terrain fastidieuses et de caractériser les cultures en mettant en évidence de manière plus exhaustive leur variabilité spatiale. Depuis une vingtaine d'années, des méthodes spécifiques pour caractériser les cultures à des échelles spatiales fines ont été développées afin d'être proposées sous forme de services aux agriculteurs (Stafford, 1997, Tisseyre

2007, Rousseau 2008, Vaudour 2010). Ces données, généralement sous forme de cartographie d'indice de végétation comme le NDVI (Tucker, 1979), permettent ainsi de pratiquer une agriculture de précision (ou raisonnée) dont les objectifs sont d'ajuster les techniques culturales dans le but d'homogénéiser les rendements en modulant spatialement les intrants. Les images satellitaires utilisées jusqu'à récemment, dont la résolution spatiale est de quelques mètres (par ex. les satellites de la famille SPOT), sont tout à fait adaptées aux cultures dont le couvert est fermé et continu (grandes cultures telles que le blé). Toutefois elles le sont moins pour les cultures présentant de fortes discontinuités géométriques à l'échelle du mètre, notamment les cultures pérennes en rangs telles que la vigne. L'avènement de capteurs à très haute résolution spatiale, c'est à dire submétriques comme Pléiades (résolution native de 70 cm en mode panchromatique) permet maintenant d'accéder à ce type d'application (Johnson *et al.*, 2003) grâce à des méthodes développées spécifiquement (Robbez-Masson *et al.*, 2001; Hall *et al.*, 2003; Delenne *et al.*, 2010). Parallèlement, l'émergence des technologies basées sur l'utilisation des drones donne également accès à des images d'une résolution qui ne peut pas encore être atteinte depuis les plateformes spatiales (résolution

spatiale de l'ordre de quelques centimètres) (Berni *et al.*, 2009 ; Hunt *et al.*, 2010 ; Turner *et al.*, 2011).

L'objectif de cet article est d'analyser le potentiel de deux techniques d'acquisition à très haute résolution spatiale disponibles à l'heure actuelle (notamment le satellite Pléiades et le drone) et de les intercomparer à des acquisitions réalisées sur le terrain à l'aide d'un Greenseeker

(www.trimble.com/agriculture/greenseeker.aspx). Les méthodologies mises en place visent à estimer les paramètres de gestion des parcelles (nombre de rangs, orientation des rangs, écartement inter-rang), identifier des déficits de végétation associés à des pieds morts, manquants ou peu vigoureux et à établir des cartes de vigueur de la vigne. Une comparaison avec des images drones acquises sur les mêmes domaines étudiés permet de valider les résultats obtenus à partir des images Pléiades et par ailleurs de mettre en évidence les limites de détection liées à la résolution spatiale du capteur.

Cette étude a été menée par Telespazio France et ses partenaires dans le cadre du programme EarthLab Vigne, qui vise à proposer aux viticulteurs et utilisateurs de la filière viti-vinicole différents produits et services à valeur ajoutée permettant un suivi précis et régulier des vignes dans le but d'adapter les itinéraires techniques aux besoins des cultures et de valoriser au mieux les productions.

2. Méthodologie

Trois sites tests ont été considérés dans cette étude conduite en 2013 :

- Domaine de Gueyze, sur la Cave Coopérative des Vignerons de Buzet (47) ;
- Château Luchey-Halde (appellation Pessac Léognan, 33), propriété de Bordeaux Sciences Agro ;
- Château Couhins (appellation Pessac Léognan, 33), propriété de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA).

Ces trois sites présentent des caractéristiques culturelles différentes, notamment l'écart inter-rang qui est un facteur déterminant pour l'utilisation des images Pléiades. L'inter-rang est relativement serré pour les deux sites du Bordelais (environ 1 m) alors qu'il est d'une valeur moyenne pour le domaine de Gueyze (environ 2 m).

2.1. Acquisitions

Chaque site a été caractérisé par différents moyens : imagerie satellitale (Pléiades), acquisitions par drone et mesures *in situ*.

Les images Pléiades ont été acquises en août 2013 en modes panchromatique et multispectral, et fournies dans le cadre de la Recette Thématique Utilisateur sous formes de produits images orthorectifiés et ré-échantillonnés respectivement à 50 cm et 2 m de résolution. La Figure 1 montre l'image multispectrale Pléiades acquise sur le domaine de Gueyze le 14/08/2013. Les domaines de Luchey-Halde et Couhins sont couverts par une image Pléiades acquise le 20/08/2013.

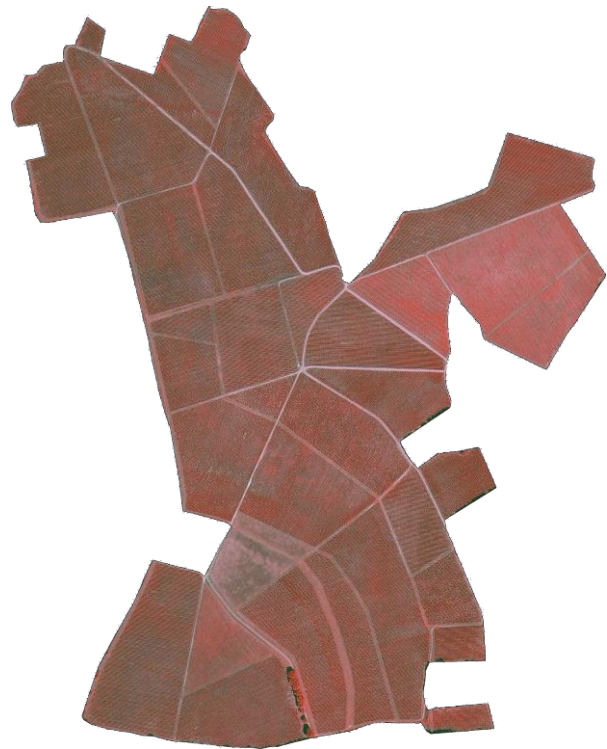


Figure 1 : Domaine de Gueyze, image Pléiades multispectrale, composition colorée infrarouge-rouge-vert.

Les courbes de réponse spectrale du capteur Pléiades sont représentées sur la Figure 2.

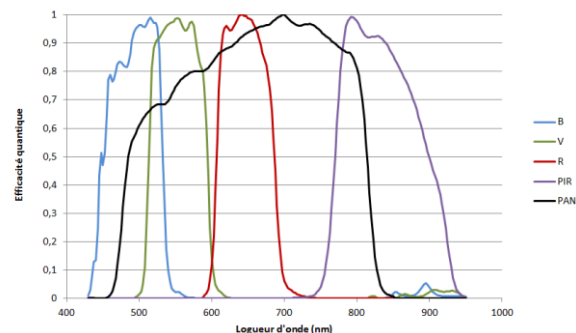


Figure 2 : Courbes de réponse des 4 canaux (RVB + PIR) du capteur multispectral et panchromatique (PAN) du satellite Pléiades.

Les acquisitions par drone ont été effectuées une semaine après les acquisitions Pléiades par la société Delair-Tech (www.delair-tech.com) au-dessus des différents sites d'étude. Le drone utilisé embarque deux caméras CMOS d'un mégapixel chacune (1280×1024 pixels) permettant d'enregistrer quasi-simultanément les images dans le visible (RVB, matrice de Bayer classique) et le proche infrarouge (bande passante entre 650 nm et 900 nm) à une résolution au sol de 7 cm (Figure 2). Dans le proche infrarouge, la bande passante du capteur Delair-Tech est donc plus large que celle du capteur Pléiades et intègre une partie du red edge (autour de 700 nm) ; toutefois ceci n'a pas d'effet important car la bande intègre en majorité le signal de la végétation sur le plateau du proche infrarouge (750 à 900 nm). L'ensemble du domaine de Gueyze (80 ha) a ainsi été couvert par environ 1600

images individuelles par capteur. Les autres sites, moins étendus, ont nécessité moins d'images (environ 500 images par capteur). L'utilisation d'une cible de réflectance et d'un capteur d'éclairage permet de calibrer les caméras et de corriger les variations d'éclairage observées lors des acquisitions. Sans ce traitement, les images individuelles présentent des luminosités différentes qu'il est difficile de compenser (voir notamment la figure 9 pour une illustration des variations d'éclairage). Le traitement géométrique des images à l'aide d'un logiciel de photogrammétrie dédié (Pix4D, www.pix4d.com) permet ensuite de générer une orthoimage du site étudié à la même résolution spatiale que les images originales (Figure 3). Une étape de coregistration est finalement nécessaire afin de recalibrer précisément les bandes visible et proche infrarouge du fait de l'utilisation de deux capteurs non strictement parallèles et présentant potentiellement un écart de synchronisation.

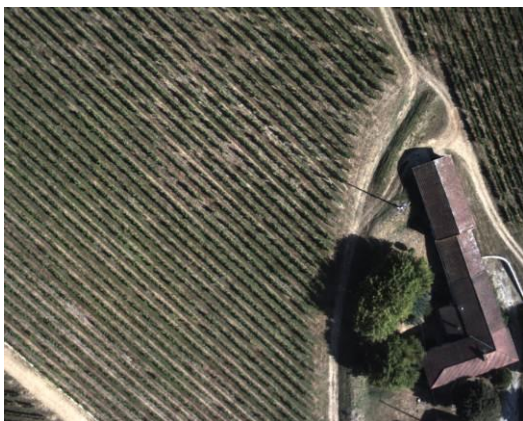


Figure 2 : Exemple d'image drone acquise par la caméra RGB lors du survol du domaine de Gueyze.



Figure 3 : Orthoimage générée à partir des acquisitions drone (parcelles nord-ouest du domaine de Gueyze).

Enfin, des mesures *in situ* d'indice de végétation ont également été enregistrées parallèlement à ces acquisitions satellitaires et aériennes. Ces mesures ont été effectuées à l'aide du Greenseeker permettant de

mesurer l'indice de végétation NDVI le long des rangs de vigne à un pas d'échantillonnage de l'ordre du centimètre. Ces mesures, faites sur le domaine de Gueyze uniquement, ont été utilisées afin d'intercomparer les résultats obtenus avec les différents capteurs employés et de valider les hétérogénéités mises en évidence sur les cartes d'indice de végétation générées à partir de ces capteurs. La Figure 4 montre les variations de NDVI (du rouge au vert) le long des rangs; noter que les mesures réalisées au Greenseeker ne sont faites qu'un rang sur deux.

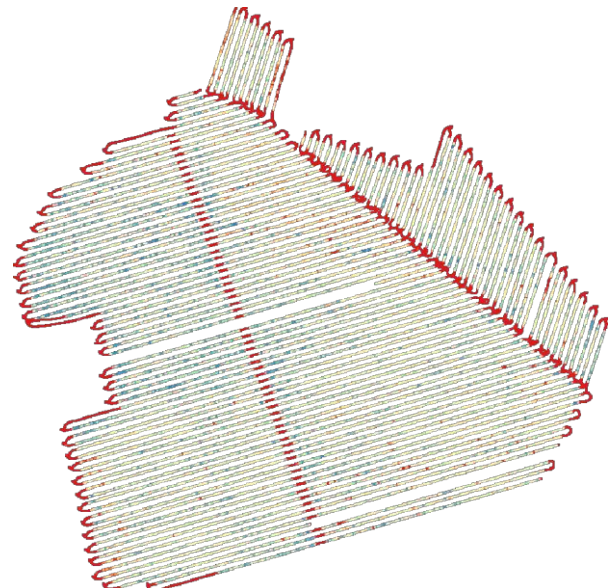


Figure 4 : Visualisation des mesures réalisées à l'aide du Greenseeker (parcelles nord-ouest du domaine de Gueyze).

2.2. Génération des produits

Les produits générés pour cette étude sont de deux types :

- une caractérisation des paramètres de gestion des parcelles à partir des images satellitaires et drones (détection des rangs de vigne, estimation de l'écartement des rangs) ainsi qu'une détection des déficits de végétation ;
- une cartographie de l'indice de végétation (NDVI), rendant compte de la vigueur de la vigne.

2.2.1. Caractérisation des paramètres de gestion des parcelles

L'extraction des structures linéaires sur l'image Pléiades s'appuie, dans ce cas précis, sur la détection des ombres des rangs qui sont plus contrastées dans l'image que la végétation sur le rang. La méthode comporte les étapes suivantes :

- La fusion des caractéristiques spectrales et spatiales des images Pléiades multispectrale et panchromatique à l'aide de l'algorithme de Gram-Schmidt (Amro *et al.*, 2011).
- Le calcul de l'image minimum I_m (image des valeurs minimales de chaque pixel dans les 4 bandes de l'image fusionnée), qui sert de variable unique pour la détection des ombres.
- La détection des minima locaux de l'image I_m sur la parcelle, réalisée à l'aide de l'opérateur

« chapeau bas de forme » par reconstruction morphologique (Matheron, 1975 ; Serra, 1982 ; Vincent, 1992).

- Le calcul de l'orientation des structures linéaires. Celui-ci est donné par la transformée de Fourier, calculée sur un extrait de la parcelle.
- La génération du masque de l'inter-rang par dilatation des minima locaux avec un élément structurant linéaire orienté à θ (angle d'orientation des structures linéaires obtenu à l'étape précédente), suivie d'un amincissement morphologique.

Le masque des rangs est donné par le complémentaire de l'image de l'inter-rang sur la parcelle (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Les déficits de végétation directement liés à des absences d'ombres dans l'inter-rang sont estimés de la manière suivante : un seuillage est appliqué à l'image à I_m pour extraire un masque des ombres. L'absence d'ombre potentiellement associée à des pieds manquants est donnée par le complémentaire de ce masque appliqué sur l'inter-rang (Figure 6).

Dans le cas du drone, la meilleure résolution spatiale permet de travailler directement à partir de la présence de végétation sur le rang plutôt que sur la détection des ombres dans l'inter-rang.

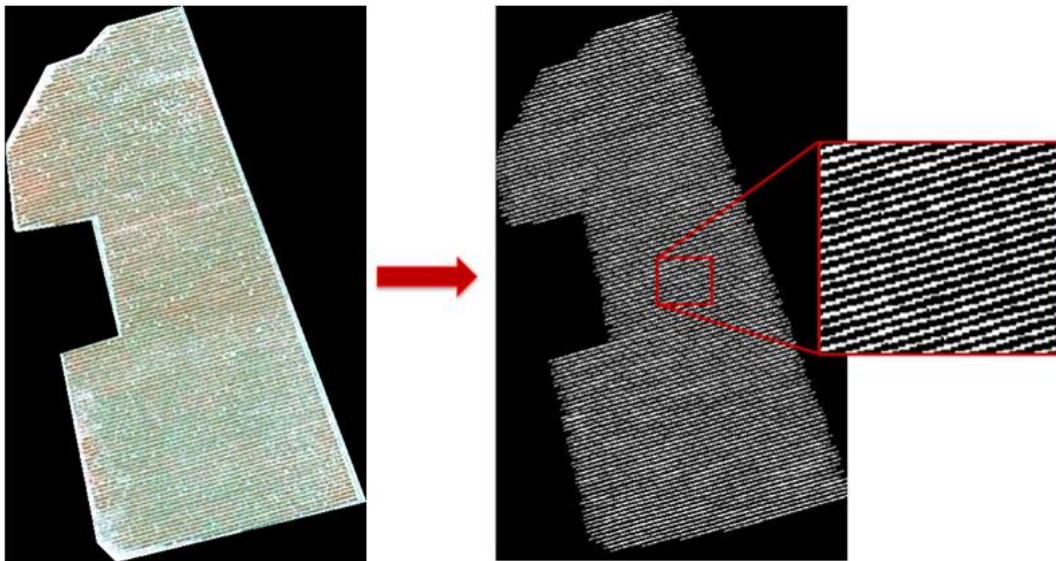


Figure 5 : Extraction automatique des rangs de vigne à partir de l'image Pléiades fusionnée.



Figure 6 : Identification des déficits de végétation sur l'image Pléiades (points rouges).

2.2.2. Cartographie d'indices de végétation

Les cartes d'indice de végétation ont été générées pour les images Pléiades et drones en ne considérant que les rangs de vigne (à l'aide du masque des rangs présenté en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), ceci afin de ne caractériser que la vigueur de la vigne en s'affranchissant du signal renvoyé par l'inter-rang. Ce point est très important car il existe de nombreuses conduites culturales d'inter-rang : sans enherbement, avec enherbement (avec conduite particulière), avec enherbement un rang sur deux... Il est donc primordial de supprimer la contribution de l'inter-rang afin de ne garder que le signal utile sur la vigne. L'indice de végétation utilisé pour cette étude est le NDVI dont l'expression est :

$$NDVI = \frac{\rho_{IR} - \rho_R}{\rho_{IR} + \rho_R}$$

Avec ρ les valeurs de réflectance dans les bandes rouge (indice R) et proche infrarouge (indice IR) respectivement. Les réflectances sont calculées à partir des gains et offsets fournis (cas Pléiades) ou bien à partir de mesures sur cible de réflectance (cas drone) permettant ainsi de convertir les comptes numériques des caméras.

Les valeurs d'indice, calculées sur les rangs, sont ensuite interpolées sur l'inter-rang afin d'obtenir une cartographie homogène continue sur l'ensemble de la parcelle.

Les mesures effectuées par le Greenseeker étant réalisées le long des rangs, l'interpolation bidimensionnelle est également nécessaire pour réaliser la carte d'indice de végétation continue sur la parcelle. Dans les deux cas, l'interpolation est réalisée par la méthode IDW (« Inverse Distance Weighting »).

3. Résultats

3.1. Caractérisation parcellaire

Les paramètres de caractérisation parcellaire (nombre de rangs, orientation des rangs, espacement inter-rang, longueur totale des rangs et déficit de végétation) ont été extraits à la fois sur l'image satellitale et sur l'image drone et illustrés dans cette étude sur une des parcelles du domaine de Gueyze. Si on considère l'image la mieux résolue comme image de référence, en l'occurrence l'image drone, la comparaison des résultats obtenus avec l'image Pléiades indique une bonne cohérence avec les paramètres de l'image drone, notamment pour l'orientation des rangs (16.5° par rapport à l'axe est-ouest), l'écart inter-rang (2.2 m) ou bien encore la longueur totale des rangs de la parcelle (12.9 km avec Pléiades, 12.7 km avec l'orthoimage drone) (Tableau 1). En revanche, on compte 4 fois plus de déficits de végétation sur l'image Pléiades que sur l'image drone (14.4% contre 3.35% respectivement). Cette surestimation s'explique par la résolution plus grossière de l'image Pléiades ne permettant pas de détecter les plus petites structures (comme l'ombre projetée au sol par des ceps isolés dans le rang par exemple) et par les effets de pixellisation sur le masque du rang plus importants dans l'image Pléiades, et qui faussent la précision des mesures.

	Valeur sur image Pléiades	Valeur sur image drone
Nombre de rangs	128	128
Orientation	16.5° O-E	16.5° O-E
Écart inter-rang	2.2 m	2.2 m
Longueur totale des rangs	12 918 m	12 735 m
Déficit de végétation	14.4%	3.35%

Tableau 1 : Paramètres de caractérisation des parcelles calculées sur les images Pléiades et drone.

3.2 Cartes d'indices de végétation

La Figure 7 montre les différentes cartes produites sur une parcelle du domaine de Gueyze à partir des trois types d'acquisition : image Pléiades, mesures Greenseeker, orthoimage drone. On peut voir sur cette figure une bonne cohérence entre les trois cartes produites notamment sur les zones de faibles et de fortes vigueurs. L'image Pléiades rend bien compte de

l'hétérogénéité intra-parcellaire. Toutefois, du fait de sa plus faible résolution spatiale, la carte obtenue à l'aide de Pléiades présente moins de variabilité que celle générée à partir de l'ortho-image drone. En effet, la résolution de 50 cm de l'image Pléiades a pour effet de présenter des pixels mixtes (vigne + inter-rang), ce qui moyenne les valeurs de NDVI sur les rangs.

Ces résultats obtenus sur le domaine de Gueyze montrent le potentiel des images Pléiades pour la viticulture de précision. Cependant, certaines dispositions géométriques des parcelles sont moins favorables à l'utilisation des images Pléiades, notamment lorsque l'écart inter-rang diminue, ou dans le cas où l'orientation des rangs est proche de l'azimut solaire. Dans le cas du domaine de Gueyze, l'inter-rang de l'ordre de 2 mètres permet une bonne analyse des images mais dans le cas des sites de Luchey-Halde ou Couhins, l'inter-rang est d'un mètre et devient trop faible pour être distingué sur les images Pléiades (Figure 9). Dans ce cas, il est impossible d'extraire l'inter-rang et de caractériser les paramètres de gestion de la parcelle. Il serait toutefois possible de créer une carte d'indice de végétation mais des précautions devraient être prises quant à l'interprétation des valeurs du fait de la présence de la végétation sur l'inter-rang, dont la conduite culturale est indépendante de celle de la vigne.

4. Conclusion

Cette étude démontre le potentiel des images satellites à très haute résolution spatiale, notamment Pléiades, pour des applications de viticulture de précision pour lesquelles il est nécessaire de pouvoir distinguer les différents éléments présents (rangs et inter-rangs). Trois sites tests présentant des pratiques culturales différentes ont été considérés dans cette étude : Buzet, Luchey-Halde, Couhins.

L'extraction des paramètres de gestion des parcelles (identification des rangs, mesure de l'écart inter-rang, détection des déficits de végétation...) est relativement aisée pour le site de Buzet, sur lequel l'écart entre les rangs (représentatif d'un écartement moyen) est compatible avec la résolution spatiale native de Pléiades (2,4 m et 70 cm respectivement en multispectral et panchromatique). Les résultats sont en accord avec les valeurs obtenues à partir d'imagerie drone à une résolution spatiale plus fine (7 cm).

Par ailleurs, une comparaison entre des cartes d'indice de végétation générées à partir des produits Pléiades, drone et de mesures réalisées in situ montre une bonne cohérence. Pléiades permet ainsi d'accéder aux hétérogénéités intra-parcellaires et de caractériser le développement de la vigne.

Néanmoins on note que pour les sites où l'écart entre les rangs de vigne est plus faible (autour de 1 mètre), il est impossible de mettre en évidence la structure des parcelles du fait de la résolution spatiale trop faible de Pléiades. La prochaine génération de plateforme satellite, grâce à des résolutions spatiales de l'ordre de 20 à 30 cm, pourrait permettre de caractériser également ces configurations de plantation et d'accéder à l'ensemble des cas présents en viticulture, tout en réduisant les étapes de traitements radiométriques et géométriques nécessaires pour la création d'ortho-images à partir d'acquisitions drones.

Remerciements

Les auteurs remercient le CNES et Airbus Defence & Space pour la mise à disposition des images Pléiades (© CNES (2013), distribution Airbus DS / Spot Image) dans le cadre de la Recette Thématique Utilisateurs Pléiades.

Les auteurs souhaitent également remercier la Cave des Vignerons de Buzet, Bordeaux Sciences Agro et l'Institut National de la Recherche Agronomique pour l'accès à leurs domaines respectifs.

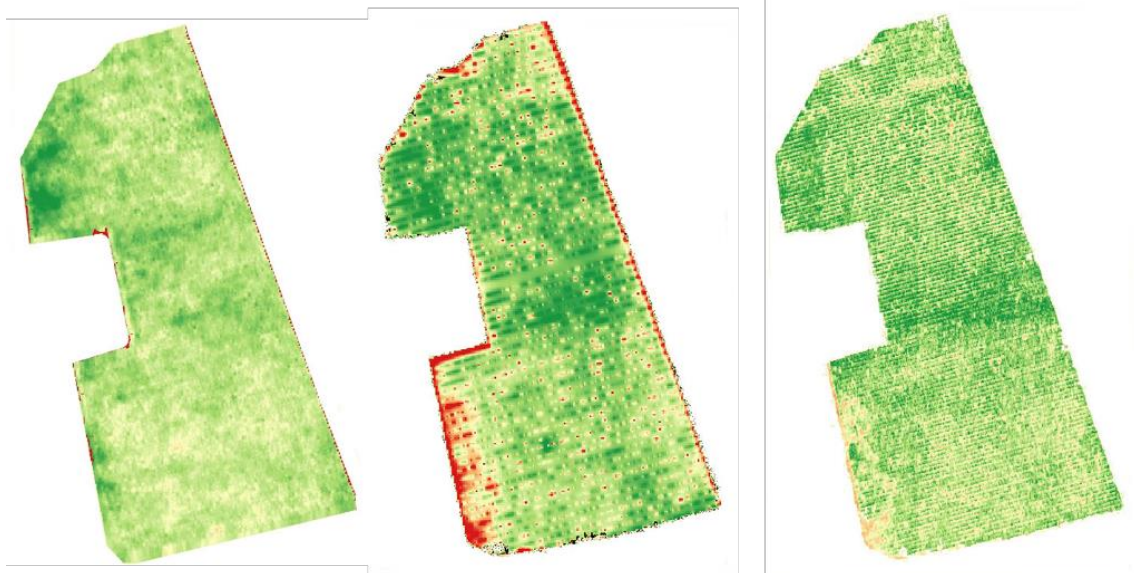


Figure 7 : Comparaison des cartes d'indice de végétation (valeurs relatives, du rouge au vert) obtenues à partir de l'image Pléiades (à gauche), des mesures réalisées au Greenseeker (au milieu) et de l'orthoimage drone (à droite).

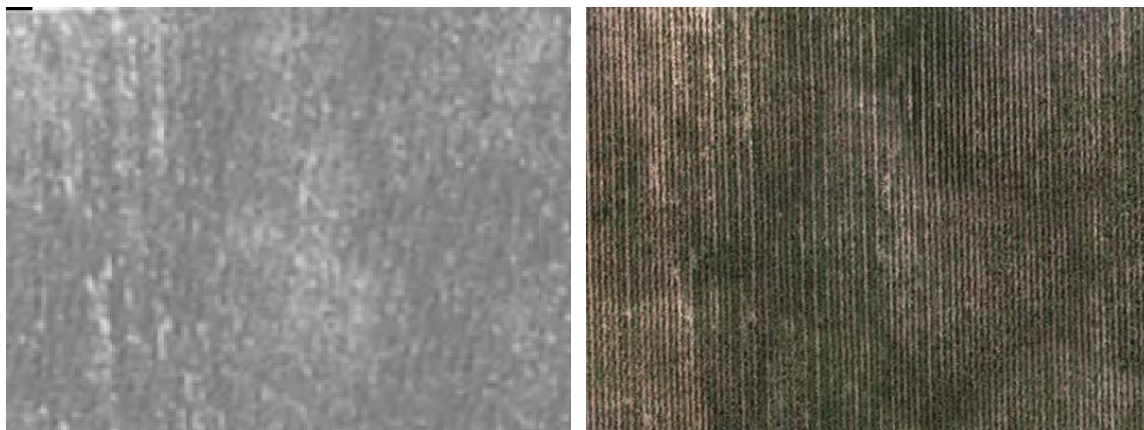


Figure 9 : Comparaison entre un extrait de l'image panchromatique Pléiades sur une parcelle de Luchey-Halde (image de gauche) et la même zone acquise par drone à la résolution spatiale de 5 cm (image de droite). On voit ici que la résolution native de Pléiades (70 cm) est insuffisante pour distinguer les rangs de cette parcelle dont l'inter-rang est de 1 m. Noter également que les différences d'illumination n'ont pas été corrigées sur l'image drone.

Références

Amro I., Mateos J., Vega M., Molina R., Katsaggelos A. K. 2011. A survey of classical methods and new trends in pansharpening of multispectral images. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. Vol. 79.

Berni, J., Zarco-Tejada, P. J., Suarez, L., & Fereres, E. 2009. *Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned*

aerial vehicle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, 722–738.

Delenne, C., Durrieu, S., Rabatel, G., Deshayes, M., 2010. *From pixel to vine parcel: A complete methodology for vineyard delineation and characterization using remote-sensing data*. *Computers and Electronics in Agriculture*. 70(1): 78–83.

Hall, A., Louis, J., Lamb, D.W. Characterising and mapping vineyard canopy using high-spatial-resolution

aerial multispectral images. *Comput. Geosci.* 2003, 23, 813–822.

Hunt E. R., Hively W. D., Fujikawa S. J., Linden D. S., Daughtry C. S. T., McCarty G. W. 2010. *Acquisition of NIR-Green-Blue Digital Photographs from Unmanned Aircraft for Crop Monitoring*. *Remote Sensing*, 2, 290-305.

Johnson L. F., Roczen D. E., Youkhana S. K., Nemani R. R., Bosch D. F. 2003. *Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery*. *Computers and Electronics in Agriculture* 38:33-44.

Matheron G., 1975, *Random sets and integral geometry*, *Bulletin of the American Mathematical Society*, 81 (5), 844-847.

Robbez-Masson J., Wassenaar T., Andrieux P., Baret F., 2001, *Reconnaissance par télédétection rapprochée des vignes et analyse de leur structure spatiale à l'aide d'une analyse fréquentielle intra-parcellaire. Application au suivi des effets des pratiques culturales*. *Ingénieries*, 27, 59-67.

Rousseau J., Dupin S., Acevedo-Opazo C., Tisseyre B., Ojeda H., 2008. *L'imagerie aérienne : application à la caractérisation des potentiels viticoles et œnologiques*. *Bulletin de l'Organisation Internationale de la Vigne et du Vin* 81, 507-517.

Serra J. 1982 *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, London, Vol.1, 600

Stafford, J. V. 1997. *Precision Agriculture '97: Proceedings of the First European Conference on Precision Agriculture*. Taylor & Francis, Inc. 1200 p.

Tisseyre B., Ojeda H., Taylor J., 2007. *New technologies and methodologies for site-specific viticulture*. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 41 (2), 63-76.

Tucker, C. J., 1979. *Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation*. *Remote Sensing of Environment*, 8: 127–150.

Turner D., Lucieer A., Watson C. 2011. *Development of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for hyper resolution vineyard mapping based on visible, multispectral, and thermal imagery*. *Proceedings of the 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Sydney, Australia.

Vaudour E., Carey V.A., Gilliot J.M., 2010, *Digital zoning of South African viticultural terroirs using bootstrapped decision trees on morphometric data and multitemporal SPOT images*, *Remote Sensing of Environment*, 114: 2940-2950.

Vincent L., 1992 *Morphological grayscale reconstruction: Definition, efficient algorithms and applications in image analysis*, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition* 92, 633-635.