



HAL
open science

Suivi du pâturage avec un appareil photo grand public et des logiciels libres : méthode et validation

Maurice Mahieu, Rémy Arquet, Alexandre Tricheur, Stéfan Jurjanz, Claire
Collas

► To cite this version:

Maurice Mahieu, Rémy Arquet, Alexandre Tricheur, Stéfan Jurjanz, Claire Collas. Suivi du pâturage avec un appareil photo grand public et des logiciels libres : méthode et validation. Fourrages, 2019, 240, pp.335-340. hal-02620613

HAL Id: hal-02620613

<https://hal.inrae.fr/hal-02620613>

Submitted on 25 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Française pour la Production Fourragère

Pour toute recherche dans la base de données
et pour vous abonner :

www.afpf-asso.org

Suivi du pâturage avec un appareil photo grand public et des logiciels libres : méthode et validation

M. Mahieu¹, R. Arquet², A. Tricheur³, C. Collas⁴, S. Jurjanz⁴

Lors du pâturage, l'adaptation du chargement aux ressources disponibles exige un suivi régulier et la connaissance de l'évolution (en qualité et quantité) de la végétation. Les outils numériques récents ouvrent des perspectives pour suivre la défoliation au cours d'une séquence de pâturage et ajuster chargement ou temps d'utilisation des parcelles.

RÉSUMÉ

Une méthode simple et peu coûteuse a été mise au point pour évaluer objectivement les changements visuels de matière verte pendant le pâturage par les herbivores. Elle s'appuie sur un simple appareil photo numérique et sur des logiciels libres. Un indice de végétation peu sensible aux conditions d'éclairage a été calculé à partir des valeurs des canaux rouge, vert et bleu des photos. À partir de la distribution des pixels selon cet indice, trois classes ont été définies : la classe A représente le sol, les feuilles souillées de boue ou les matériaux morts, la classe B, les tiges et des organes sénescents à faible teneur en chlorophylle et la classe C, les parties vertes. La corrélation est forte entre les classes A ou C et l'intensité du pâturage. Cet outil devrait faciliter la gestion du pâturage.

SUMMARY

A method for monitoring grazing patterns using a non-professional digital camera and free software

We developed a simple and inexpensive method for objectively quantifying visual changes in green matter during grazing by livestock. It employs a non-professional digital camera (RGB; hand held or attached to a drone) and free software programs. For each pixel, we calculated the visible atmospherically resistant index for green matter (VARIgreen) using the equation $(G-R)/(G+R-B)$, where R, G, and B were the values from the red, green, and blue channels, respectively. Based on the distribution of the pixel index values, three categories were defined: category CI-A contained pixels associated with bare soil, mud, and/or soil litter, category CI-B contained pixels associated with stems and other senescent plant parts with low chlorophyll levels, and category CI-C contained pixels associated with green matter. Grazing intensity had a strong negative correlation with the percentage of pixels in CI-C; the correlation was strongly positive for CI-A. This method should be able to reveal defoliation patterns during the grazing sequence and allow the stocking rate and/or plot grazing time to be adjusted to prevent overgrazing or undergrazing.

La gestion des pâturages est toujours un défi pour les éleveurs de ruminants, et le surpâturage comme le sous-pâturage réduisent la productivité (JONES et SANDLAND, 1974) et la rentabilité. L'adaptation du chargement aux ressources disponibles exige une bonne connaissance des changements dans la qualité et la quantité de la végétation pendant le pâturage.

Les parties vertes, chlorophylliennes (feuilles de légumineuses, gaines et limbes de graminées...), sont les

éléments les plus nutritifs des plantes des pâturages. Les ruminants commencent à consommer les parties vertes et ne mangent les tiges et autres composants fibreux que si les organes verts deviennent trop rares. Le dispositif le plus courant pour estimer la masse fourragère d'un pâturage est l'herbomètre à plateau (STOCKDALE et KELLY, 1984). Les appareils les plus simples sont bon marché et fournissent des informations sur la hauteur d'herbe recommandée avant et après la séquence de pâturage, au

AUTEURS

1 : INRA, UR143 Unité de Recherches Zootechniques, Domaine Duclos, F-97170 Petit-Bourg, Guadeloupe (France) ; maurice.mahieu@inra.fr

2 : INRA, UE1294 PTEA, Gardel, F-97160 Le Moule, Guadeloupe (France)

3 : INRA, UE0057 DSLP Domaine du Bois Maché, F-17450 Saint-Laurent-de-la-Prée (France)

4 : Université de Lorraine-ENSAIA, UR AFPA, F-54505 Vandoeuvre-lès-Nancy (France)

MOTS CLÉS : Antilles, diagnostic, méthode d'estimation, parcours, pâturage, prairie, zone tropicale.

KEY-WORDS : Antilles, diagnosis, estimation method, grassland, grazing, rangelands, tropical region.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Mahieu M., Arquet R., Tricheur A., Collas C., Jurjanz S. (2019) : "Suivi du pâturage avec un appareil photo grand public et des logiciels libres : méthode et validation", *Fourrages*, 240, 335-340.

moins pour les pâturages de zones tempérées au stade feuillu et présentant une hétérogénéité limitée. Pour d'autres situations, il faut faire un calibrage spécifique qui prend du temps et nécessite des appareils supplémentaires (balance de précision, four ventilé...) rarement disponibles dans les exploitations d'élevage. De plus, la relation entre la hauteur mesurée à l'herbomètre et la biomasse varie selon l'espèce d'herbe et le stade phénologique et, sous les tropiques, de nombreuses espèces fourragères, telles que *Panicum* ou *Brachiaria* sp., dépassent les capacités de mesure de l'appareil, tandis que d'autres forment un tapis de tiges qui ne permet pas la mesure à partir du sol. Même s'il est possible de calibrer l'appareil pour les graminées avant le pâturage, ce calibrage n'est pas approprié pendant ou après, les tiges étant plus rigides que les feuilles, et il n'est pas possible d'avoir une bonne estimation des feuilles résiduelles. Par conséquent, **l'herbomètre n'est pas adapté à la plupart des pâturages tropicaux, ou à des prairies permanentes avec un mélange d'espèces de ports différents.**

Les méthodes de télédétection fournissent une mine d'informations sur la végétation à petite et à grande échelle et sont maintenant couramment utilisées par les autorités publiques, les organismes de recherche et les grandes entreprises. Ces dernières années, la technologie des drones a rendu ces méthodes de plus en plus accessibles aux plus grandes exploitations, principalement spécialisées dans les céréales et les oléagineux. Cependant, ces méthodes reposent sur l'imagerie infrarouge (STARK *et al.*, 2000) ou sur l'imagerie multispectrale (PULLANAGARI *et al.*, 2012) et demeurent trop coûteuses pour la plupart des éleveurs (de l'ordre de 10 000 à 20 000 € pour l'acquisition d'un drone équipé d'une caméra multispectrale avec les logiciels de traitement des images, ou quelques centaines d'euros pour une prestation unique, dans les régions les mieux pourvues en sociétés proposant ce type de service).

La grande majorité des éleveurs d'herbivores, des techniciens de développement comme de nombreux chercheurs pastoralistes ne disposent donc souvent que de critères visuels très subjectifs pour évaluer les pâturages, leur hétérogénéité et les changements au cours du temps.

C'est pourquoi nous avons adapté **une méthode simple et peu coûteuse pour objectiver l'estimation visuelle du matériel vert disponible sur les pâturages** et de ses variations au cours du temps. **Cette méthode ne nécessite qu'un appareil photo numérique ou un smartphone**, ou un drone avec une caméra RVB (300 à 1 000 €), **un ordinateur personnel** avec suffisamment de RAM pour faire fonctionner un logiciel de retouche d'image **et un logiciel statistique gratuit.**

1. Matériels et méthodes

Tous les travaux expérimentaux ont été réalisés en Guadeloupe, à l'INRA-PTEA (Plate-forme tropicale d'expérimentation animale, 16°18'N, 61°19'W).

■ Traitement des images

Un drone *Dji Phantom 3™* avec un appareil photo RVB 12 Mpx a été utilisé pour les images aériennes, et un appareil photo 12 Mpx (*Olympus μ8000™*) pour les vues rapprochées. Chaque photo couleur est composée de pixels, chacun codé par une combinaison de canaux rouge (R), vert (V) et bleu (B). Les fichiers images (.jpg) ont été téléchargés sur un ordinateur personnel (processeur Intel core i7™, 4 Go RAM). Si nécessaire, les images ont été éditées à l'aide du logiciel GIMP® 2.10 (GNU Image Manipulation Program, librement disponible sur <http://www.gimp.org>). Les pixels correspondant aux routes, aux bâtiments, aux plans d'eau ont été supprimés et remplacés par des pixels noirs (R=V=B=0), de sorte que seuls les pixels correspondant à la zone d'intérêt soient conservés avec les valeurs RVB originales. L'image modifiée a été stockée sous la forme d'un fichier jpg dans un dossier dédié, le nom de ce fichier jpg étant codé pour un traitement automatique ultérieur.

Les fichiers jpg ont ensuite été traités à l'aide du logiciel statistique R avec les packages "jpeg" et "cluster" (R-CORE-TEAM, 2017 ; MAECHLER *et al.*, 2017 ; URBANEK, 2014). RStudio (disponible gratuitement sur <https://www.rstudio.com>) a été utilisé comme éditeur de script R et interface graphique.

Dans une **première étape** (script R, en annexe 1¹), on a utilisé comme référence une image aérienne comprenant des zones de sol dénudé, des parcelles hétérogènes avant, pendant et après une séquence de pâturage, avec une grande variété d'espèces herbagères dont la couleur varie du vert jaunâtre au vert bleuâtre, et un couvert d'arbres vert foncé. Le fichier image jpg a été importé dans R (package jpeg) et la matrice correspondante a été transformée en tableau de données, chaque pixel représenté par ses coordonnées x et y, et ses valeurs R, V et B.

Un indice de végétation peu sensible aux conditions d'éclairage, VARIGreen (pour Vegetation Atmospherically Resistant Index) a été calculé selon GITELSON *et al.* (2002) :

$$\text{VARIGreen} = (V - R) / (V + R - B)$$

où R, V et B correspondent aux valeurs rouge, verte et bleue de chaque pixel. Ce calcul n'étant pas possible pour les pixels noirs (R=0, V=0, B=0), toutes les lignes correspondant à ces pixels noirs ont alors été supprimées et seules les lignes décrivant les pixels correspondant à la zone de pâturage ont été conservés. Sur l'image de référence, 99,99 % des pixels présentent une valeur de VARIGreen comprise entre -0,23076923 et 0,53201470. Dans quelques rares cas (de l'ordre d'un pixel sur un million), $V + R - B$ peut être égal à 0, ce qui fait que $\text{VARIGreen} = +\infty$ ou $\text{VARIGreen} = -\infty$, produisant une erreur pour d'autres calculs, donc toutes les valeurs inférieures à -10 ont été arbitrairement remplacées par -10 et toutes les valeurs supérieures à 10 par 10. Les pixels ont ensuite été classés selon les valeurs de VARIGreen à

1 : Les annexes sont disponibles en accès libre à la page de l'article sur <https://afpf-asso.fr/>

l'aide d'une méthode de classification à k-médoïdes (fonction "clara" du package "cluster") et le pourcentage de pixels pour chaque classe de VARIGreen calculé. Dans cette première étape, une méthode de **regroupement à 15 classes** a été utilisée et les 15 valeurs des médoïdes ont été conservées comme standard pour les autres images. Ce choix de 15 classes, adopté après quelques tâtonnements, est un compromis entre un souci de précision et la facilité d'interprétation des images générées (en moyenne, chaque classe regroupe 6,66 % des pixels, avec des valeurs comprises entre 0,9 et 13 % pour l'image de référence). Chaque pixel a été codé avec son nom de classe et une image en fausses couleurs a été générée (figure de l'annexe 2).

Dans la **deuxième étape** (script en annexe 3), **des images en gros plan avec des organes végétaux clairement identifiables ont été prises afin d'interpréter les différentes classes de VARIGreen**, en comparant la couleur naturelle aux images en fausses couleurs, imprimées classe par classe. Les pixels ont été classés à l'aide de la fonction "cut" avec un vecteur de limites de classes dérivé des 15 valeurs des médoïdes calculées ci-dessus, pour permettre l'interprétation et la comparaison d'images différentes sur une même base de classification. Les classes 1 à 3 (VARIGreen de -10 à -0,00673), notées **Cl-A, représentent les zones de sol nu, les plantes souillées de boue et les organes végétaux brunâtres, sénescents ou morts**. Les classes 4 à 7 (VARIGreen de -0,00673 à 0,0616), notées **Cl-B, représentent principalement des inflorescences et des tiges matures, et des feuilles sénescents jaunâtres** à faible teneur en chlorophylle. Les classes 8 à 15 (VARIGreen de 0,0616 à 10), notées **Cl-C, représentent les gaines et les limbes des feuilles**, dont on suppose qu'elles ont une teneur en chlorophylle croissante. Ces trois groupes ont été utilisés pour une analyse statistique plus poussée. Des exemples d'images RVB originales et d'images en fausses couleurs correspondantes sont présentés en annexe (annexes 4 et 5).

Il est maintenant possible d'estimer les changements dans la proportion visuelle de matériaux verts à partir de l'analyse des images prises à intervalles réguliers depuis le début de la séquence de pâturage.

■ Validation

Douze taurillons Créole de Guadeloupe sevrés ont été attachés et mis à paître chaque jour sur une nouvelle zone circulaire. **Trois chargements** correspondant à trois niveaux d'offre d'herbe (100, 150 et 300 g MS/kg PV^{0,75}/j) ont été testés. La densité herbagère avant le pâturage a été évaluée à l'aide d'un herbomètre à plateau préalablement étalonné et la longueur de chaque chaîne individuelle (donc la surface) a été ajustée quotidiennement pour obtenir la quantité fixée de matière sèche (MS) d'herbe offerte. Les animaux ont été affectés à l'un des trois niveaux d'offre pour une séquence de deux semaines. Après chaque séquence, les animaux sont passés d'un traitement à un autre, de sorte que chacun

d'entre eux a finalement été soumis aux trois taux de chargement, mais pas dans le même ordre que les autres animaux, selon un dispositif en "crossover". Chaque séquence de deux semaines comprenait une période d'ajustement de neuf jours (du samedi au dimanche de la semaine suivante) suivie d'une période de mesure de cinq jours (du lundi au vendredi). Pour chaque période de mesure, **l'ingestion d'herbe a été estimée à partir de la moyenne de la quantité quotidienne de fèces et de la digestibilité de la matière organique (DMO)**, estimée selon BOVAL *et al.* (1996) :

$$DMO = 0,983 - (4,002/MATf)$$

où MATf représente la teneur en protéines brutes de la matière organique fécale (MOF). L'ingestion de matière sèche (MSI, g MS/kg PV^{0,75}/j) a été calculée en fonction de la teneur en MO de l'herbe, puis le rapport ingestion sur offre a été estimé.

Une image en couleur de chaque zone de pâturage a été prise avec un appareil photo numérique (Olympus™ modèle µT8000, 12Mpx), entre 8 h 00 et 9 h 00 (c'est-à-dire 2 à 3 heures après le lever du soleil) pendant 4 à 7 jours de chaque période de mesure. La limite de la zone pâturée a été mise en évidence par 6 à 10 repères jaunes pour faciliter le cadrage de l'image pendant la prise de vue et la sélection des pixels correspondants. La distance moyenne entre l'opérateur et le centre de la zone photographiée était d'environ 10 à 15 m. La zone de pâturage circulaire apparaissait sous la forme d'un ellipsoïde sur l'image ; elle était donc facilement délimitée et sélectionnée en utilisant l'outil "chemins" du logiciel GIMP© 2.10. Tous les pixels jaunes correspondant aux repères et tous les pixels hors de la zone broutée ont été supprimés et remplacés par des pixels d'arrière-plan noirs. Entre 18 et 30 images ont également été prises avant pâturage, pendant chaque période de mesure. Les images étaient ensuite stockées sous forme de fichier jpg dans un dossier dédié, avec un nom de fichier standardisé comprenant l'identification de l'animal, le code de traitement et la date. Un total de **339 images** a été utilisé **au cours de cette étude de validation** : 111 images du pâturage avant le pâturage et 228 après la sortie d'une parcelle donnée, de sorte qu'il y avait entre 4 et 7 images pour chaque combinaison animal x offre, avec une image pour chaque animal chaque jour qu'un groupe donné était suivi. Un exemple d'images brutes et traitées est présenté en annexe 6.

Un script R (annexe 7) a été écrit pour le traitement automatisé des fichiers image jpg. Chaque fichier a été importé dans le logiciel R (package "jpeg") et le VARIGreen a été calculé pour chaque pixel comme décrit ci-dessus. Chaque pixel a été classé à l'aide de la fonction "cut" avec le vecteur de "bornes" calculé à partir des valeurs des médoïdes de l'image décrite à l'étape 1 ci-dessus (valeurs des bornes = [-10 ; -0,0877 ; -0,0335 ; -0,00673 ; -0,0128 ; 0,0303 ; 0,0479 ; 0,0616 ; 0,0732 ; 0,0881 ; 0,108 ; 0,126 ; 0,145 ; 0,173 ; 0,228 ; 10]). Le tableau de données décrivant chaque image a été stocké dans un fichier .Rdata séparé dans un dossier dédié, permettant une utilisation ultérieure (construction d'images en fausses couleurs, par exemple). Pour chaque image, le

nombre de pixels appartenant à chacune des 15 classes de VARI_{green} a été stocké dans un tableau de données avec l'identification de l'animal, l'offre, le groupe, la date de la prise de vue et la date de pâturage correspondante. Les pourcentages de pixels (pcpx) ont été calculés pour chaque classe et transformés par la fonction "arcsin(sqrt(pcp))", pour normaliser les valeurs avant de les soumettre aux analyses statistiques. Les moyennes et les erreurs types ont été rapportées après avoir subi la transformation inverse. L'effet de l'offre a été analysé pour chacune des trois classes transformées définies ci-dessus (Cl-A, B et C) à l'aide d'une analyse de variance (aov), suivie d'un test de Tukey pour comparer les différences moyennes, du package "agricolae" (MENDIBURU, 2016). La fonction "cor" (package "stats") a été utilisée pour les analyses de corrélation entre les images et les estimations du rapport de l'ingéré à l'offre.

2. Résultats et discussion

En moyenne, la préparation des images (suppression des pixels hors zone d'intérêt) a pris environ 2 minutes par image ; le traitement automatisé des 339 images a pris environ 90 minutes (peut varier en fonction de la taille de l'image et de la puissance du processeur, ici, un processeur Intel CORE i7™).

■ Estimation visuelle de l'évolution du couvert

Les profils des valeurs VARI_{green} des parcelles pâturées en fonction de l'offre sont présentés à la figure 1, en référence aux images avant pâturage.

La structure du couvert avant le pâturage était telle que les feuilles cachaient la plupart des tiges, des matériaux morts et de la surface du sol, ce qui fait que plus de

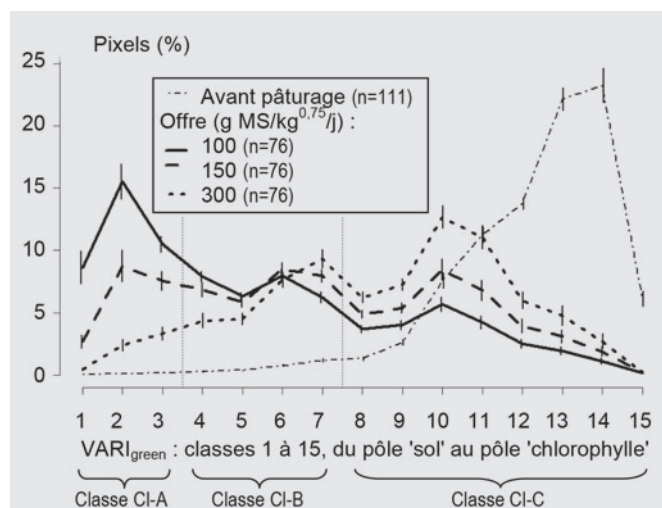


FIGURE 1 : Pourcentage de chaque classe VARIgreen avant pâturage et des zones pâturées en fonction de l'offre fourragère (erreurs-standard des moyennes ; transformation inverse).

FIGURE 1 : Percentage of pixels in each VARIgreen category for ungrazed pastures and for grazed areas according to the forage on offer (standard errors ; back-transformed means).

95 % des pixels appartiennent à la classe "Cl-C". Le pâturage a entraîné le prélèvement des organes verts, rendant ainsi de plus en plus visibles les tiges, les matériaux morts et la surface du sol (Cl-A), selon l'offre fourragère ; de plus, le piétinement s'est traduit par de l'herbe boueuse (pixels appartenant également à la classe Cl-A). Le pourcentage de pixels correspondant aux organes verts a diminué au cours de la séquence de pâturage, en fonction de la quantité d'herbe offerte : plus le chargement est élevé, plus le prélèvement relatif des parties vertes est important. Après le pâturage, le pourcentage de pixels appartenant à la classe Cl-A a augmenté de manière significative lorsque l'offre a diminué, comme le

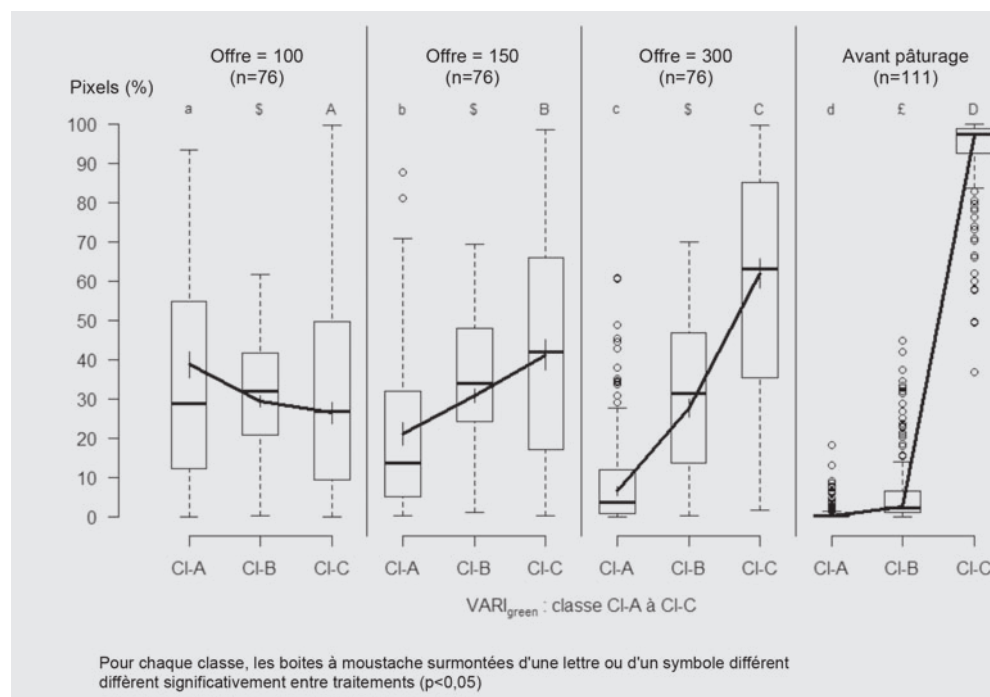
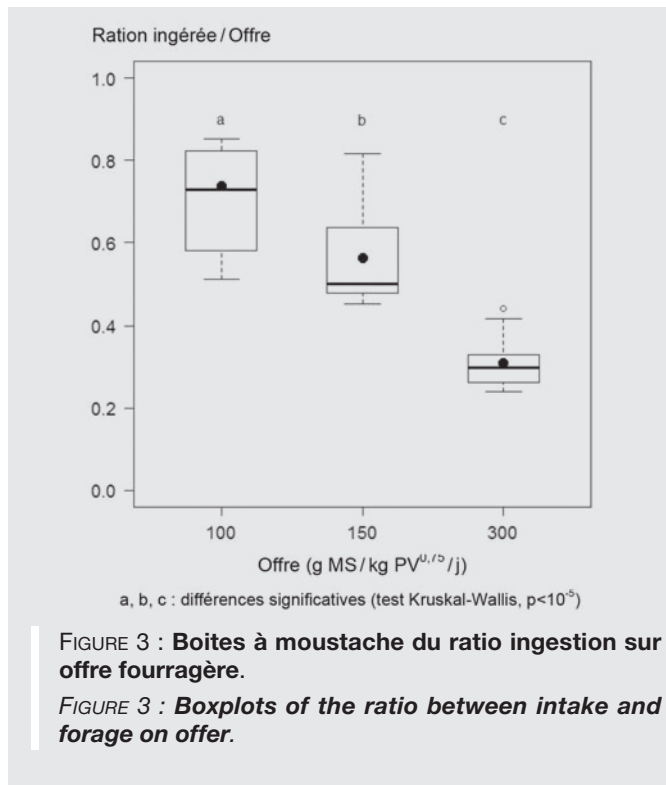


FIGURE 2 : Boîtes à moustache du pourcentage de pixels selon les trois classes de VARIgreen : Cl-A (sol nu, parties souillées de boue, organes végétaux morts), Cl-B (tiges et organes sénescents), Cl-C (parties vertes : limbes et gaines).

FIGURE 2 : Boxplots of the percentage of pixels in each VARIgreen category: Cl-A (bare soil, mud, and/or soil litter), Cl-B (stems and senescent plant parts), and Cl-C (green matter: leaves and sheaths).

Pour chaque classe, les boîtes à moustache surmontées d'une lettre ou d'un symbole différent significativement entre traitements (p<0,05)



résume la figure 2. **L'analyse de la variance a révélé que la classification (Cl-A à Cl-C) et le traitement** (pré-pâturage et post-pâturage avec offre à trois niveaux) **expliquent environ 74 % de la variance** du pourcentage de pixels.

■ Ingestion de fourrage et évaluation visuelle du couvert

Les valeurs individuelles d'ingestion de matière sèche, exprimées sous forme de rapport ingestion/offre, sont résumées à la figure 3. Ce rapport peut être compris comme une estimation de la pression de pâturage ou du taux de chargement.

Il y a une **corrélation positive entre le ratio de pixels de Cl-A** ($VARI_{green}$ inférieur à $-0,00673$) **et le rapport estimé de l'ingestion à l'offre** ($\sigma = 0,61$, $p = 0,0001$) et une corrélation négative entre le ratio de pixels de Cl-C ($VARI_{green}$ supérieur à $0,0616$) et le rapport estimé de l'ingestion à l'offre ($\sigma = -0,51$, $p = 0,002$). Il n'y a pas de corrélation significative pour le ratio de pixels de Cl-B (principalement les tiges) dans la fourchette du rapport estimé de l'ingestion à l'offre ($p = 0,36$). **Plus le chargement est élevé, plus la proportion de fourrage consommé augmente, plus la proportion de pixels correspondant aux parties vertes diminue au profit des pixels représentant le sol et les végétaux souillés de boue ou morts.**

Conclusions

L'utilisation de pourcentages au lieu de nombres de pixels permet de comparer facilement des images de

tailles différentes : dans l'étude de validation, la taille de l'image se situait entre 0,35 et 5,5 Mpx (zone d'intérêt) environ. La caméra RVB 12Mpx a été utilisée parce qu'elle était disponible au début de l'étude. N'importe quel appareil photo numérique devrait convenir, à condition que sa balance des blancs soit correcte. Des images de moindre définition (1 Mpx ou moins) devraient cependant contenir suffisamment de données pour fournir des informations utiles, avec l'avantage d'un traitement plus rapide. Dans la plupart des cas (pâturages intensifs clôturés ou pâturages extensifs), cadrer les images seulement sur des zones d'intérêt devrait rendre l'utilisation du logiciel GIMP inutile et pourrait faire gagner beaucoup de temps.

La méthode proposée ne permet pas de mesurer la quantité du fourrage disponible, mais constitue plutôt une méthode de suivi répétable et facile du prélèvement des organes végétaux verts pendant le pâturage. Elle peut ainsi aider à ajuster le chargement animal au disponible fourrager. Supposons qu'une parcelle soit prévue pour nourrir le troupeau pendant 10 j ; si, au bout de 8 jours, l'analyse des images montre que la majorité des feuilles vertes a déjà été consommée, cela suggère de diminuer le chargement de l'ordre de 20 % ou d'apporter un complément alimentaire équivalent. Dans des paysages hétérogènes (prairies naturelles, pâturages alpins, parcours), cette méthode non destructive peut aussi aider à mieux comprendre comment les herbivores utilisent les ressources disponibles, celles qu'ils préfèrent ou refusent, à l'échelle du paysage, des micro-parcelles ou des plantes. Cette méthode peut également être utile pour évaluer les dommages causés par la faune (mammifères herbivores, insectes...), les inondations ou le piétinement dans les prairies humides. Elle ne repose pas sur une notation visuelle, qui dépend de la perception et de l'interprétation individuelle qui peuvent être peu précises et non reproductibles. Elle permet de stocker les images, puis de comparer facilement les caractéristiques des pâturages dans le temps et dans l'espace, sans limitation, à condition que les caractéristiques du matériel photographique et les conditions de prise de vue soient équivalentes. Elle devrait être utile dans les régions tropicales humides et les zones tempérées, avec des pâturages feuillus.

Dans des conditions plus sèches, sans végétaux verts, la méthode ne serait probablement pas utilisable sans l'utilisation d'un nouvel étalonnage et peut-être d'un autre indice que $VARI_{green}$, afin de distinguer le fourrage grossier sec des autres composantes environnementales comme le sol, les pierres, le sable ou l'écorce des arbres et buissons.

Accepté pour publication,
le 4 octobre 2019

Remerciements : Les auteurs remercient chaleureusement Ludovic Arthein, Alain Farant, Xavier Godard et toute l'équipe de la "Plateforme Tropicale d'Expérimentation sur l'Animal", INRA UE1294, pour leur travail sur les pâtures et les animaux. Ce travail a été en partie financé par le projet INSSICCA (ANR-16-CE21-0008-02).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BOVAL M., PEYRAUD J., XANDE A., AUMONT G., COPPRY O., SAMINADIN G. (1996) : "Évaluation d'indicateurs fécaux pour prédire la digestibilité et les quantités ingérées de *Dichanthium* sp par des bovins créoles", *Ann. Zootech.*, 45 (2), 121-134.
- GITELSON A.A., KAUFMAN Y.J., STARK R., RUNDQUIST D. (2002) : "Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction", *Remote Sensing of Environment*, 80 (1), 76-87.
- JONES R.J., SANDLAND R.L. (1974) : "The relation between animal gain and stocking rate. Derivation of the relation from the results of grazing trials", *J. Agric. Sci.*, 83 (2), 335-342.
- MAECHLER M., ROUSSEEUW P., STRUYF A., HUBERT M., HORNIK K. (2017) : *Cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions*, R package version 2.0.6. ; <https://CRAN.R-project.org/package=cluster>
- MENDIBURU F.D. (2016) : *Agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research*, R package version 1.2-4 ; <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>
- PULLANAGARI R.R., YULE I.J., HEDLEY M.J., TUOHY M.P., DYNES R.A., KING W.M. (2012) : "Multi-spectral radiometry to estimate pasture quality components", *Precision Agriculture*, 13 (4), 442-456.
- R-CORE-TEAM (2017) : *R: A language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna (Austria) ; <https://www.R-project.org/>
- STARK R., GITELSON A.A., GRITS U., RUNDQUIST D., KAUFMAN Y. (2000) : "New technique for remote estimation of vegetation fraction: principles, algorithms and validation", *Aspects of Applied Biology*, 60, 241-246.
- STOCKDALE C.R., KELLY K.B. (1984) : "A comparison of a rising-plate meter and an electronic capacitance meter for estimating the yield of pastures grazed by dairy cows", *Grass and Forage Sci.*, 39 (4), 391-394.
- URBANEK S. (2014) : *jpeg: Read and write JPEG images*, R package version 0.1-8 ; <https://CRAN.R-project.org/package=jpeg>