



HAL
open science

Morpho3D - Utilisation d'un dispositif d'imagerie en 3D pour modéliser la forme complète de bovins laitiers et mesurer des paramètres morphologiques, le volume et la surface corporelle

Clément Allain, Anaïs Caillot, Laurence Depuille, J.M. M Delouard, L. Delattre, T. Luginbuhl, Jacques Lassalas, Philippe Faverdin, Yannick Le Cozler

► To cite this version:

Clément Allain, Anaïs Caillot, Laurence Depuille, J.M. M Delouard, L. Delattre, et al.. Morpho3D - Utilisation d'un dispositif d'imagerie en 3D pour modéliser la forme complète de bovins laitiers et mesurer des paramètres morphologiques, le volume et la surface corporelle. *Innovations Agronomiques*, 2021, 82, pp.215-228. 10.15454/21gn-kn32 . hal-03497859

HAL Id: hal-03497859

<https://hal.inrae.fr/hal-03497859>

Submitted on 20 Dec 2021

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Morpho3D - Utilisation d'un dispositif d'imagerie en 3D pour modéliser la forme complète de bovins laitiers et mesurer des paramètres morphologiques, le volume et la surface corporelle

Allain C.¹, Caillot A.², Depuille L.¹, Delouard J.M.³, Delattre L.³, Luginbuhl T.³, Lassalas J.², Faverdin P.², Le Cozler Y.²

¹ Institut de l'Élevage, Monvoisin, F-35652 Le Rheu

² PEGASE, Agrocampus Ouest, INRAE, F-35590 Saint-Gilles

³ 3DOUEST, F-22300 Lannion

Correspondance : clement.allain@idele.fr

Résumé

Le développement de l'imagerie 3D est une solution pour estimer des paramètres morphologiques et le développement de la croissance des vaches laitières, mais il offre également des opportunités pour estimer des indicateurs originaux tels que le volume, la surface corporelle et le poids vif. L'objectif du projet Morpho3D était de développer, tester et valider un dispositif offrant la possibilité d'enregistrer et d'analyser des formes 3D complètes de bovins laitiers. Pour évaluer les performances de cet outil, deux essais sur vaches de race Holstein ont été menés, l'un sur 30 vaches en 2017 et l'autre sur 64 animaux en 2018. La précision des mesures linéaires (hauteur au garrot (HG), tour de poitrine (TP), profondeur de poitrine (PP), largeur des hanches (LH), largeur des fesses (LF) et largeur des ischions (LI)), du volume et de la surface corporelle a d'abord été testée sur des formes inertes (vache en plastique et cylindre). Les différences observées entre les mesures de référence manuelles et les estimations sur images 3D étaient inférieures à 1 % pour la surface et le volume et allaient de 1,3 % à 11,2 % pour les mensurations linéaires. Pour la répétabilité et la reproductibilité de la méthode d'estimation du volume et de la surface sur des animaux vivants, les coefficients de variations (CV) étaient de 0,17 et 3,12 % respectivement. Pour les mensurations linéaires, les CV variaient de 0,26 à 9,81 % pour la répétabilité et de 0,94 à 7,34 % pour la reproductibilité. Quatre modèles d'estimation du poids vif des vaches ont été établis. Les coefficients de détermination variaient de 0,82 à 0,93 % avec des erreurs de prédiction du poids de l'ordre de 3 % (20 kg) en utilisant le volume dans le modèle et 4 % (29 kg) en utilisant la surface. Le dispositif et la méthode, évalués et validés dans la présente étude, offrent des possibilités d'utilisation de nouveaux indicateurs tels que le volume et la surface corporelle en élevage de précision.

Mots-clés : Tridimensionnel, scanner, vache, volume, surface, estimation du poids.

Abstract: Use of a 3D imaging device to model the complete shape of dairy cattle and measure new morphological phenotypes

The development of 3D imaging is a solution for estimating morphological parameters and growth development in dairy cattle but it also offers opportunities to estimate original indicators such as volume, body surface area and body weight. The objective of the Morpho3D project was to develop, test and validate a device offering the possibility to record and analyze complete 3D shapes of dairy cattle. To evaluate the performance of this tool, two trials were carried out on Holstein cows, one in 2017 on 30 cows and one in 2018 on 64 cows. The precision of linear measurements (height at the withers (HG), chest circumference (TP), chest depth (PP), hip width (LH), backside width (LF) and ischial width (LI)), volume and body surface area were first tested on inert forms (plastic cow and cylinder). The differences observed between manual reference measurements and estimates on the 3D image were

less than 1% for area and volume and ranged from 1.3% to 11.2 % for linear measurements. For the repeatability and reproducibility of the method for estimating volume and area in living animals, the coefficients of variation (CVs) were 0.17 and 3.12 % respectively. For linear measurements, the CVs ranged from 0.26 to 9.81 % for repeatability and from 0.94 to 7.34 % for reproducibility. Four models for estimating the liveweight of cows were established. The coefficients of determination ranged from 0.82 to 0.93 % with weight prediction errors around 3 % (20 kg) as function of the volume and 4 % (29 kg) using the area. The device and the method, evaluated and validated in the present study, offer possibilities of using new indicators such as volume and body surface in precision breeding.

Keywords: Three-dimensional, scanner, cow, volume, area, weight estimation.

Introduction

Le suivi de l'évolution de la morphologie des animaux laitiers, via la mesure de poids vif (PV), de changement morphologique (tour de poitrine, hauteur au garrot...) ou de note d'état corporel (NEC), permet d'adapter l'alimentation, la reproduction et la conduite générale pour un fonctionnement optimal de l'élevage. Actuellement, à l'exception du poids, la plupart des mesures sont effectuées manuellement (ruban, toise) ou visuellement (Heinrichs et Hardgrove, 1987). Ces mesures, chronophages, sont des sources de stress et d'accidents pour les éleveurs et les animaux. Par conséquence et malgré leur intérêt, ces informations sont peu disponibles en ferme. Développer des outils précis, automatiques et simples d'utilisation pour surmonter ces problèmes est donc d'intérêt.

Les techniques d'imagerie offrent des alternatives intéressantes aux mesures manuelles et/ou aux méthodes coûteuses (Pezzulo *et al.*, 2018). Les approches d'imagerie 2D, utilisées chez le porc avec un certain succès (Marchant *et al.*, 1993 ; Schofield *et al.*, 1998), ne permettent pas d'approcher la troisième dimension. De plus, les problèmes de distorsion, la procédure d'étalonnage, le besoin de caméras multiples et enfin, les modèles de reconstruction 3D, ont réduit leur utilisation. Le développement et la commercialisation de caméras 3D à un coût relativement faible a aussi entraîné une diminution de l'intérêt pour la technologie 2D au profit des caméras 3D.

Ces nouvelles technologies d'imagerie ont ainsi été utilisées avec succès pour analyser la NEC des bovins laitiers (Fischer *et al.*, 2015 ; Kuzuhara *et al.*, 2015). Negretti *et al.* (2008), Buranakarl *et al.* (2012), Guo *et al.* (2017) et Pezzuolo *et al.* (2018) ont également développé des technologies d'images 3D avec comme objectifs d'obtenir une image 3D de l'animal en entier, mais de nombreux problèmes demeurent. Pezzuolo *et al.* (2018), avec un équipement portable à faible coût basé sur le capteur Microsoft Kinect v1, concluent d'ailleurs que leur méthode nécessite encore beaucoup d'ingénierie pour permettre la collecte et l'extraction automatique des données de manière satisfaisante. Un dispositif (appelé "Morpho3D") a ainsi été développé pour capturer facilement la forme complète des vaches et mesurer leurs caractères morphologiques. Il a aussi été émis l'hypothèse qu'il pourrait être utilisé pour déterminer la surface corporelle et le volume des vaches laitières et donc, leur poids vif. Les mesures obtenues avec cet appareil ont été comparées aux valeurs recueillies directement sur les animaux vivants. Pour valider la méthode, répétabilité et reproductibilité ont aussi été analysées.

1. Matériels et méthodes

1.1 Dispositif

Le dispositif testé est installé au sein de l'installation expérimentale de production de lait INRAE-UMR PEGASE située à Le Rheu (35). Il comprend un total de 5 capteurs, chacun en combinaison avec un projecteur laser de 650 nm de longueur d'onde afin de limiter les risques de brûlures par le laser pour l'homme et les animaux. Les couples « capteurs-projecteurs » sont installés sur un portail mobile (L : 5,00 m ; l = 2,58 m ; h = 3,00 m ; Figure 1), fixés à 0,40 et 1,77 m au-dessus du sol des deux côtés

du portail et un cinquième au milieu du haut du portique. Celui-ci se déplace à une vitesse moyenne de $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ d'arrière en avant et retourne à sa position initiale à une vitesse moyenne de $0,3 \text{ m.s}^{-1}$. Les images sont enregistrées au cours de la phase 1 : 80 photos par seconde et par caméra. Pour sécuriser l'ensemble de l'appareil, quatre câbles en acier inoxydable limitent le mouvement des vaches. Les animaux peuvent également être bloqués grâce à une porte de tête autobloquante si nécessaire.

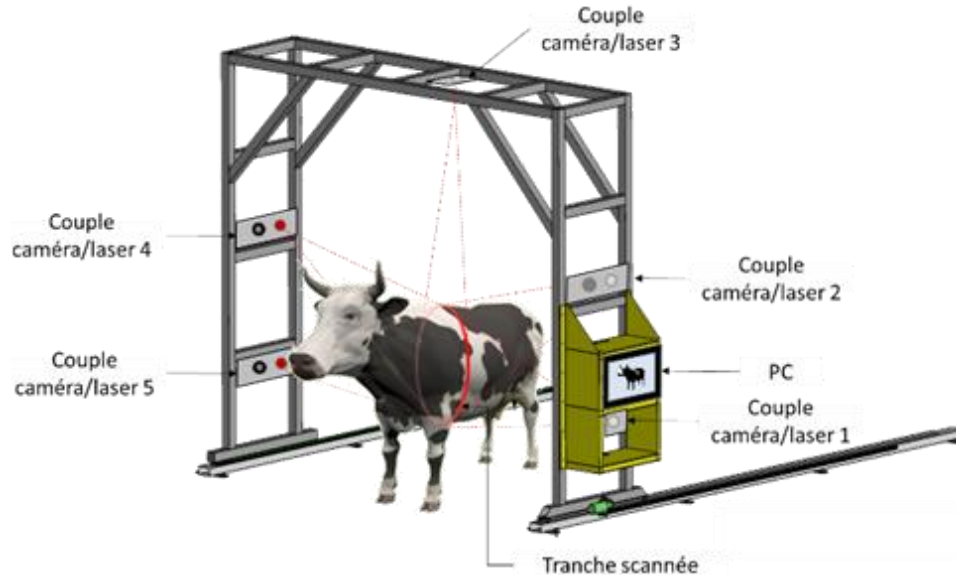


Figure 1 : Le scanner Morpho3D

Les images des bandes laser projetées sur l'animal sont capturées par leur caméra correspondante et envoyées à un ordinateur pour reconstruire l'information 3D. Les images de chaque caméra sont d'abord traitées pour construire des nuages de points et la reconstruction 3D complète de l'animal est réalisée en enregistrant et en fusionnant les multiples vues des données 3D des nuages de points des 5 couples caméra – laser (Figure 2). Un seuil de distance est défini pour ignorer les points trop éloignés de la caméra et n'appartenant pas à l'animal. Un exemple du processus sur un animal vivant est disponible à l'adresse suivante : <https://vimeo.com/219370900>.

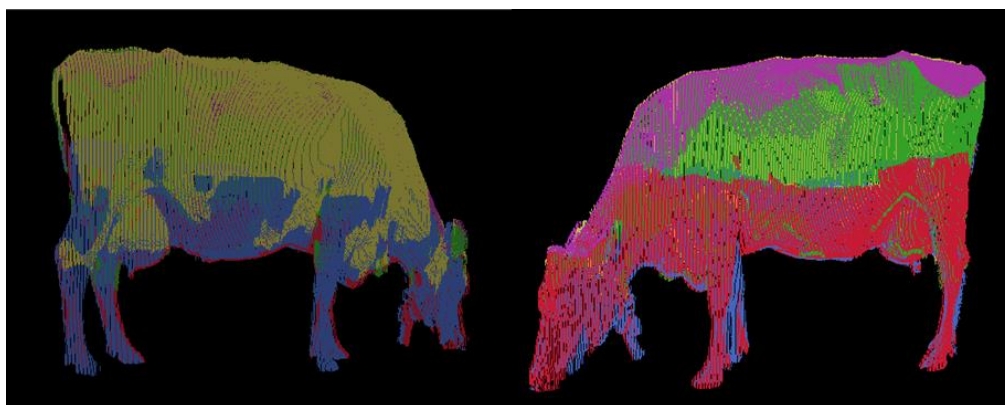


Figure 2 : Fusion des 5 nuages de points (Rouge : Caméra en bas à gauche, Bleu : Caméra en bas à droite, Vert : Caméra en haut à gauche, Jaune : Caméra en haut à droite, Violet : Caméra du dessus)

Un logiciel libre pour le traitement et l'édition de maillages triangulaires 3D, a ensuite été utilisé pour nettoyer les données (Meshlab ; Cignoni *et al.*, 2008). Un algorithme de reconstruction de surface de Poisson a été appliqué pour construire un maillage triangulé et un lissage de la forme (Kazhdan et Hoppe, 2013). Les différentes étapes du traitement sont présentées sur la Figure 3.

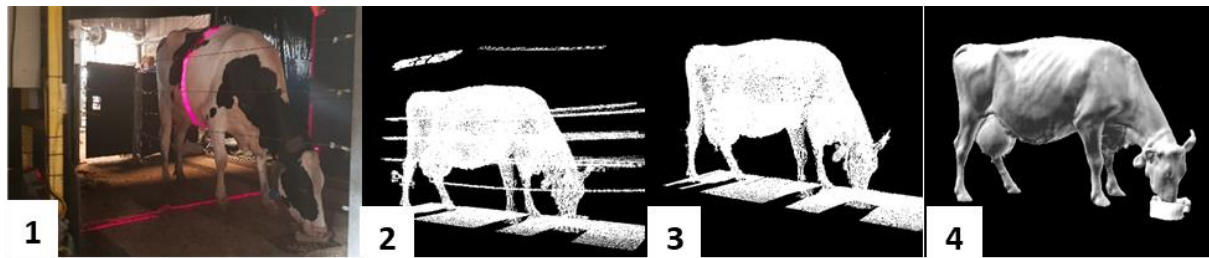


Figure 3 : De l'acquisition aux données finales. Image 1 : acquisition de données. Image 2 : Nuage brut. Image 3 : nuage après le nettoyage. Image 4 : image finale après normalisation et reconstruction de Poisson.

1.2 Animaux et mesures

1.2.1 Mensurations linéaires

Pour les travaux sur les mensurations, les données ont été recueillies entre mai et juin 2017, sur 30 vaches laitières de race Holstein, âgées de $3,0 (\pm 1,2)$ ans en moyenne et produisant $25,5 (\pm 3,6)$ kg de lait par jour. Ces 30 vaches ont été utilisées pour estimer la précision et les corrélations entre les mesures effectuées sur les images du nouvel appareil ("Morpho3D") et celles collectées directement sur les animaux ("Manuel"). Pour les deux méthodes ("Morpho3D" et "Manuel"), 6 de ces 30 vaches ont subi une série de mesures répétées des mêmes indicateurs (6 fois chacune), afin d'estimer la reproductibilité des méthodes. Pour l'estimation de la répétabilité, un modèle de vache en plastique a été utilisé. Les indicateurs mesurés sur animaux vivants et images concernaient le tour de poitrine (TP), la profondeur de poitrine (PP), la hauteur au garrot (HG), la largeur des hanches (LH), la largeur des hanches (LH), la largeur des fesses (LF) et la distance entre les ischions (LI). Pour les mesures manuelles, un mètre ruban et une toise ont été utilisés. Sur les images reconstituées, les mesures ont été réalisées grâce à un logiciel dédié (Metrux2 α [®] ; Société 3D Ouest).

1.2.2 Surface et volume

- *Surface et volume d'un cylindre*

Pour les travaux sur la surface et le volume, deux types de données ont été utilisés et recueillis entre mars et juin 2018. La première étape consistait à déterminer la surface et le volume d'un modèle statique, sur lequel des mesures pouvaient être effectuées facilement et précisément. Cela a été fait grâce à un cylindre introduit dans l'appareil Morpho3D (Figure 4). Après l'acquisition et le nettoyage, une représentation en nuage de points du cylindre a été obtenue et un algorithme de reconstruction de surface de Poisson tamisé a été appliqué pour construire un maillage triangulé. Par la suite, nous avons estimé la surface et le volume du cylindre sur 10 images différentes, issues du logiciel Metrux2 α [®].

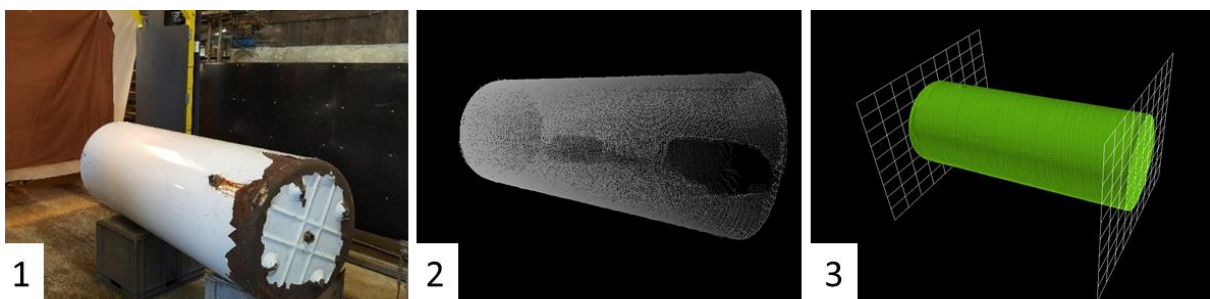


Figure 4 : Étapes de l'acquisition des données à l'image 3D finale. Image 1 : acquisition des données. Image 2 : nuage de points brut après nettoyage. Image 3 : image 3D finale après reconstruction de Poisson.

- Surface et volume des vaches

La seconde étape consistait à travailler sur des animaux vivants. Pour cela, les données ont été recueillies entre mars et juin 2018 sur 64 vaches laitières Holstein, avec un poids corporel moyen de 673 kg (écart-type de ± 65 kg ; ET) et une parité variant entre 1 et 5. Après chaque traite (deux fois par jour), les vaches étaient pesées individuellement et automatiquement sur une station de pesage (DeLaval France, Elancourt) à la sortie de la salle de traite. Les données représentaient un total de 289 images 3D. Cependant, en raison de comportements anormaux, d'une lumière excessive au mois de mai ou d'images de qualité jugée insuffisante, seules 177 images 3D ont été utilisées dans la présente étude pour estimer les caractères morphologiques, les volumes et les surfaces corporelles.

Dans certains cas, les acquisitions 3D n'étaient pas pleinement exploitables en raison des mouvements de l'animal. En effet, si le corps de la vache était correctement numérisé, dans de nombreux cas, la tête était souvent en mouvement et cela provoquait parfois des déformations du volume et de la surface du corps. De plus, sur des animaux plus jeunes et/ou nerveux, il était parfois nécessaire de bloquer la tête de l'animal dans une porte de tête autobloquante lors de l'acquisition 3D. En conséquence, l'image a été coupée au niveau de l'épaule (Figure 5).

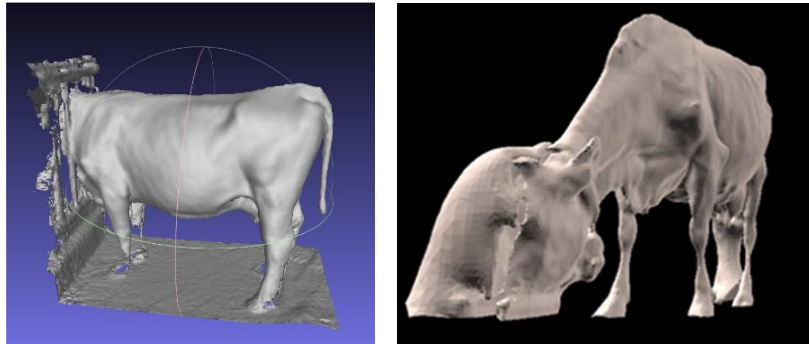


Figure 5 : Images partielles obtenues lorsque l'animal était bloqué dans une porte guillotine (à gauche) ou à cause d'une mauvaise qualité d'image de la tête (à droite)

Par conséquent, le volume et la surface corporelle tronqués du corps de l'animal ont été déterminés pour chaque animal. Celles-ci ont été mesurées en pointant deux plans sur les coupes souhaitées, par un plan choisi de la pointe des épaules à un autre à l'arrière des animaux (Figure 6). Le plan choisi au niveau épaules était très similaire à celui utilisé par Minagawa (1994). Le volume et la surface corporels complets ont ensuite été déterminés grâce à des modèles d'extrapolation basés sur des images tronquées. Cette étape ne sera pas présentée ici et est détaillée dans la publication de Le Cozler *et al.* (2019 a & b).

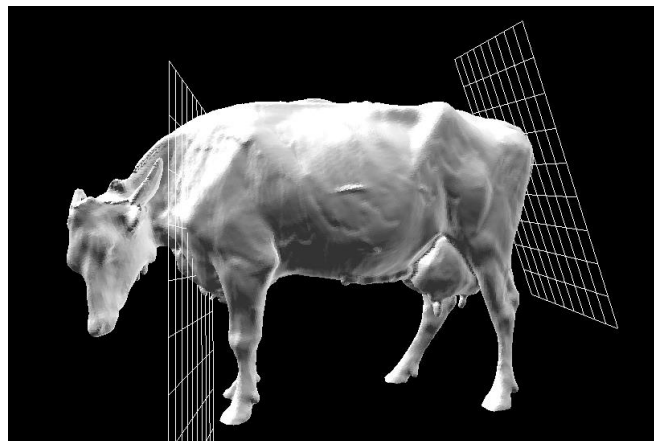


Figure 6 : Position du plan de coupe pour estimer la surface et le volume partiels en cas d'absence de tête

1.3 Analyses effectuées

1.3.1 Répétabilité et reproductibilité des mesures linéaires

Pour caractériser les propriétés du dispositif et le valider, les mesures recueillies à partir des images enregistrées ont été comparées à celles effectuées manuellement. La répétabilité et la reproductibilité des méthodes ont été évaluées. La répétabilité permet d'évaluer l'erreur générée lors de l'estimation d'un indicateur plusieurs fois sur le même échantillon avec la même méthodologie, dans le même environnement, sur une courte période de temps. Elle a été estimée en réalisant les mesures 6 fois le même jour, à partir du même scan 3D du même animal (vache modèle en plastique). La reproductibilité évalue la même erreur mais dans des conditions environnementales variables. Elle a été estimée avec 6 vaches scannées 6 fois chacune le même jour, avec une seule mesure par image 3D.

Les variations 3D ont été corrigées pour tenir compte de l'effet des animaux dans l'extraction des résidus du modèle d'ANOVA. Les coefficients de variation pour la répétabilité (CV_r) et la reproductibilité (CV_R) ont été évalués comme $CV_r = (\sigma_r / \mu_r) * 100$ et $CV_R = (\sigma_R / \mu_R) * 100$, où σ_r et σ_R sont respectivement les écarts-types de la mesure 3D corrigée pour les ensembles de données de répétabilité et de reproductibilité et μ_r et μ_R sont respectivement la mesure 3D moyenne des données de répétabilité et de reproductibilité.

De même, la répétabilité et la reproductibilité des mesures manuelles ont été estimées en corrigeant la variabilité des mesures pour l'effet des vaches et des experts (2 notateurs ont réalisé les mêmes mesures). Le modèle ANOVA 1 incluait alors « l'identité de la vache » comme facteur en cas de répétabilité et le modèle ANOVA 2 inclut « l'identité de la vache » et « l'identité de l'expert » comme facteurs d'explication de la mesure pour la reproductibilité. L'analyse de corrélation entre les mesures des images 3D et les valeurs de référence a été réalisée à l'aide du logiciel statistique R, version 3.0.2 (2013) et les analyses concernant la répétabilité et la reproductibilité ont été effectuées à l'aide du logiciel SAS (SAS Institute, 2016).

1.3.2 Répétabilité et reproductibilité de la surface et du volume

- *Répétabilité et reproductibilité de la procédure de pointage*

Les calculs du volume complet et de la surface corporelle complète sont automatisés et n'ont pas nécessité de notation (aucune variation due à l'opérateur entre deux mesures). Dans le cas particulier des images tronquées (voir précédemment), l'analyse de répétabilité est liée à la procédure de pointage. Cette procédure visait à déterminer si pour une même acquisition, la localisation des points utilisés pour les plans de coupe était fiable et donc, s'il était possible de prédire le même volume ou la même surface corporelle. Des images complètes de 5 vaches ont été utilisées, sur lesquelles le plan de coupe a été placé 5 fois par le même opérateur. Le volume tronqué et la surface corporelle ont ensuite été déterminés 5 fois sur 5 images différentes.

La reproductibilité a consisté à évaluer la capacité de différents opérateurs à identifier visuellement les points de coupe. Sur les images de 5 vaches numérisées une seule fois, deux opérateurs ont répété les mesures 5 fois chacun. Au total, cela représente 50 mesures (25 par opérateur) sur 5 images différentes. Le volume tronqué et la surface corporelle ont ensuite été calculés.

- *Reproductibilité de la surface et du volume du dispositif Mopho3D dans un environnement changeant*

L'analyse de reproductibilité visait à vérifier si la méthode est capable de prédire les mêmes valeurs sur différentes acquisitions, dans un environnement changeant, en raison de la position de l'animal, du processus de reconstruction de l'image et des mesures de l'opérateur. La reproductibilité a été étudiée sur des images de 9 vaches, chacune passant 5 fois toute la procédure, de l'acquisition initiale à la

détermination de la surface corporelle et du volume. Dans ce cas, le même opérateur a effectué les différentes mesures.

- *Calculs réalisés*

La variabilité de la surface corporelle et du volume extraits d'images 3D a été corrigée pour l'effet des animaux en extrayant les résidus d'un modèle ANOVA. La répétabilité et la reproductibilité ont été estimées par les écarts-types de répétabilité de pointage (σ_{rp}), de reproductibilité inter-opérateur (σ_{Ro}) et de reproductibilité en environnement changeant (σ_{Ri}). Les valeurs de σ_{rp} et σ_{Ri} ont été calculées à partir des résidus de l'analyse à facteur unique du modèle de variance (ANOVA) à un effet, l'effet vache. L'écart type σ_{Ro} a été calculé à partir de la moyenne des écarts-types de reproductibilité du modèle d'analyse de variance (ANOVA) à un facteur, l'effet opérateur. Les variations existantes entre les vaches ont ensuite été supprimées au cours de l'analyse. Les coefficients de variation de répétabilité (CV_{rp}) et les coefficients de reproductibilité inter-opérateur et de reproductibilité de l'environnement général (CV_{Ro} et CV_{Ri} , respectivement), ont ensuite été estimés à partir de leurs moyennes respectives (μ_{rp} , μ_{Ro} et μ_{Ri} , respectivement) et des écarts-types σ_{rp} , σ_{Ro} et σ_{Ri} , respectivement. Plus la mesure 3D était répétable (ou reproductible), plus son CV_{rp} (CV_{Ro} ou CV_{Ri}) était petit.

1.3.3 Estimation du poids

Le poids vif des vaches est systématiquement mesuré deux fois par jour sur la ferme. En complément, un poids a été estimé grâce à différents modèles basés sur les caractères morphologiques linéaires, le volume et la surface corporels mesurés à partir du dispositif Morpho3D. Les estimations de ces différents modèles ont ensuite été comparées aux valeurs enregistrées par le système de pesage.

Plusieurs modèles linéaires ont été testés pour établir une équation de prédiction du poids vif basée sur différents paramètres mesurés sur des images 3D. Les modèles ont été établis par la méthode de sélection des variables AIC (critère d'information d'Akaike). Il s'agit d'une méthode de sélection de variables, étape par étape, à partir de l'ensemble des variables initiales. À chaque itération, une ou plusieurs variables sont supprimées ou ajoutées pour obtenir la valeur minimale de l'AIC définie par la formule suivante : $AIC = 2 \times (n-2) \times \log(L)$, où n est le nombre de paramètres inclus dans le modèle, et L la probabilité maximale de la fonction de vraisemblance. Une validation croisée est effectuée à la fin de chaque modèle pour estimer l'erreur de prédiction. La validation croisée a été préférée en raison de la taille du jeu de données total, qui ne permettait pas de le séparer des jeux de données d'étalonnage et de validation suffisants. L'ensemble de données a donc été divisé en 10 parties du même nombre de lignes tirées au hasard. Chaque partie a ensuite été supprimée du jeu de données, utilisé pour créer le modèle, de sorte qu'à partir du modèle basé sur les 9 autres parties, les poids de la 10^{ème} ont été prédits. Cette validation croisée de 10 itérations a été réalisée 100 fois avec différents tirages au sort, à chaque fois afin d'avoir un grand nombre de variations et de calculer une erreur de prédiction moyenne.

2. Résultats et discussion

2.1 Mensurations linéaires

2.1.1 Estimation des mensurations

La comparaison des mesures effectuées manuellement sur les 30 vaches laitières ou réalisées à partir d'images 3D montre que la plupart des mesures manuelles présentent des valeurs inférieures à celles obtenues à partir des images 3D (Tableau 1). La différence la plus élevée est observée pour la largeur entre les ischions (différence de 11,2 %), tandis que la plus faible a été notée pour la hauteur au garrot (1,3 %).

Tableau 1 : Comparaison des mesures effectuées manuellement (« Manuelle ») ou sur images 3D (« Morpho3D ») sur 30 vaches Holstein en lactation

Mesure (cm)	Manuelle	Morpho3D	P value
Tour de poitrine (TP)	207,5	221,5	< 0,0001
Profondeur de poitrine (PP)	79,4	83,8	< 0,0001
Hauteur au garrot (HG)	146,9	148,8	< 0,003
Largeur des hanches (LH)	55,5	54,4	< 0,02
Largeur aux fesses (LF)	51,9	54,4	< 0,008
Largeurs aux ischions (LI)	17,4	19,6	< 0,02

La corrélation entre les deux types de mesures effectuées est également très bonne (Tableau 2). Les valeurs les plus élevées sont observées pour la profondeur de la poitrine (0,89) et les plus faibles pour la largeur des ischions (0,63). Les os proéminents au niveau des hanches expliquent certainement les faibles différences observées entre les mesures manuelles et Morpho3D, comme noté par Pezzuolo *et al.* (2018). Au contraire, les os proéminents sont moins visibles pour la largeur des ischions, ce qui peut expliquer les maigres performances de chaque dispositif à ce niveau. Pour certaines mesures (tour de poitrine ou profondeur de poitrine), une surestimation existe car dans certains cas, la position de la patte avant sur l'image ne permettait pas un accès satisfaisant. Les valeurs de corrélation entre les deux approches sont généralement inférieures à celles rapportées par Buranarkal *et al.* (2012) et Pezzuolo *et al.* (2018). Buranarkal *et al.* (2012) ont effectué leurs mesures dans des conditions de laboratoire et ont utilisé des marques visuelles collées sur les animaux, inutilisables dans des conditions commerciales. Pezzuolo *et al.* (2018) ont effectué leurs analyses sur les valeurs moyennes.

Tableau 2 : Coefficient de corrélation et valeur de P, entre mesures manuelles et celles obtenues sur images 3D

Mesure (cm)	Coefficient de corrélation	P value*
Tour de poitrine (HG)	0,78	< 0,001
Profondeur de poitrine (PP)	0,89	< 0,001
Hauteur au garrot (HG)	0,62	< 0,001
Largeur des hanches (LH)	0,80	< 0,001
Largeur aux fesses (LF)	0,76	< 0,01
Largeurs aux ischions (LI)	0,63	< 0,01

* test de Student

2.1.2 Répétabilité et reproductibilité des mensurations

Les valeurs de répétabilité et de reproductibilité sont assez similaires entre méthodes (Tableau 3). Pour les données issues des images 3D, le σ_r variait de 0,34 à 1,89 (CV_r de 0,26 à 9,81 %) et σ_R de 0,55 à 5,87 (CV_R de 0,94 à 7,34 %). En utilisant des mesures manuelles, le σ_r variait de 0,21 à 1,32 (CV_r de 0,11 à 10,30 %) et σ_R de 0,49 à 1,19 (CV_R de 0,42 à 4,46 %). Selon Fischer *et al.* (2015), les méthodes de mesure dont la répétabilité et la reproductibilité présentent des CV inférieurs à 4 % peuvent être considérées comme des méthodes intéressantes, ce qui est le cas dans la présente étude. De nombreux auteurs soulignent l'effet important de la position de l'animal sur les fluctuations des mesures effectuées et l'importance de sélectionner, souvent manuellement, les meilleures images pour limiter les variations indésirables (Kmet *et al.*, 2000 ; Stajniko *et al.*, 2008). Fischer *et al.* (2015) ont également montré que parmi les travaux réalisés sur l'estimation de la NEC par imagerie, seuls quelques auteurs sont allés jusqu'à une qualification (répétabilité, reproductibilité) de la méthode testée. Ces valeurs ne sont généralement pas disponibles dans la plupart des études publiées.

Un autre point important pouvant faire varier la qualité des images et donc au final, la répétabilité et la reproductibilité des mesures, est l'environnement (Tschärke et Banhazi, 2013). En effet, la plupart des technologies sont sensibles à la lumière du jour et sont conduites dans des conditions de lumière

contrôlée. De même, le contrôle des mouvements d'animaux pour obtenir des images exploitables est un point crucial. Des travaux sont encore nécessaires pour que les dispositifs mis au point dans des conditions contrôlées puissent être utilisés dans l'environnement "agressif" d'une ferme commerciale, ou du moins, d'une ferme expérimentale.

Une estimation du temps passé par méthode pour obtenir toutes les valeurs des indicateurs utilisés a été effectuée et correspondait à 2,5 et 15 minutes pour les systèmes manuels et automatiques. Dans ce dernier cas, l'acquisition est rapide (6 secondes en moyenne) mais le temps nécessaire pour analyser et obtenir les résultats finaux était d'environ 14 min. Il est clairement possible de réduire ce temps à l'avenir, via l'optimisation des modèles et des équations.

Tableau 3 : Répétabilité et reproductibilité des mesures corporelles obtenues directement sur animaux (Manuelle) ou sur images 3D (Morpho3D). Un modèle de vache en plastique a été utilisé pour l'étude de répétabilité et 6 vaches ont servi aux études de reproductibilité.

Mesure		Répétabilité			Reproductibilité		
		μ_r (cm)	σ_r	CV_r (%)	μ_R (cm)	σ_R	CV_R (%)
Tour de poitrine (TP)	Manuelle	194,2	0,21	0,11	204,2	0,86	0,42
	Morpho3D	195,8	1,89	0,97	221,1	5,87	2,63
Profondeur de poitrine (PP)	Manuelle	75,1	0,42	0,56	79,1	0,49	0,62
	Morpho3D	76,5	0,44	0,58	84,4	0,92	1,09
Hauteur au Garrot (HG)	Manuelle	129,1	1,04	0,80	148,9	1,07	0,72
	Morpho3D	131,1	0,34	0,26	148,6	2,12	1,42
Largeur des hanches (LH)	Manuelle	39,8	0,35	0,88	55,5	1,01	1,82
	Morpho3D	39,9	0,67	1,68	58,6	0,55	0,94
Largeur des fesses (LF)	Manuelle	50,9	0,36	0,71	50,8	1,19	1,82
	Morpho3D	52,6	0,34	0,64	55,5	1,82	3,28
Largeur aux ischions (LI)	Manuelle	12,8	1,32	10,30	17,3	0,77	4,46
	Morpho3D	17,5	1,78	9,81	15,4	1,13	7,34

CV_r et CV_R sont respectivement les coefficients de variation pour la répétabilité (CV_r) et la reproductibilité (CV_R), σ_r et σ_R les écarts types de la mesure 3D corrigée pour les ensembles de données de répétabilité et de reproductibilité et μ_r et μ_R la mesure 3D moyenne des données de répétabilité et de reproductibilité.

2.2 Surface et volume corporels

2.2.1 Volume et surface d'un cylindre

La différence d'estimation du volume et de la surface entre l'image 3D avec le logiciel Metrux2a® et les mesures manuelles était inférieure à 1% (Tableau 4).

Tableau 4 : Moyennes et écarts types des mensurations du cylindre estimées par le dispositif Morpho3D (10 images) et différences avec les mesures manuelles

	Moyenne ⁽¹⁾	Ecart type	Différence absolue ⁽²⁾	Différence relative
Longueur (m)	1,552	0,010	-0,010	0,62 %
Circonférence (m)	1,880	0,005	-0,008	0,24 %
Surface (m ²)	3,490	0,015	-0,028	0,44 %
Volume (m ³)	0,440	0,003	-0,003	0,72 %

(1) : correspond à la valeur moyenne obtenue sur 10 images de l'appareil Morpho3D

(2) : différence entre les mesures Morpho3D et les mesures manuelles

2.2.2 Volume et surface des vaches

Les mensurations, le volume et la surface corporels ont été déterminés sur les 64 vaches laitières Holstein, de mars à juin (Tableau 5). Le volume et la surface moyens des vaches étaient de 0,76 ($\pm 0,07$) m³ et de 6,84 ($\pm 0,45$) m², respectivement. Le volume et la surface corporels tronqués représentaient respectivement 90,1 et 80,8 % du volume total et de la surface totale. Grâce au poids corporel mesuré, la masse volumique moyenne, c'est-à-dire le poids corporel moyen divisé par le volume total moyen, a été calculée. Elle était de 0,886 kg.m⁻³, mais variait de 0,79 à 0,95 kg.m⁻³.

Tableau 5 : Poids corporel moyen, note d'état corporel (NEC), mensurations, volume et surface de 64 vaches laitières Holstein utilisées dans l'essai mené en 2018.

Mesure	Moyenne	Ecart type	Min	Max
Poids vif (kg)	673	65	539	871
NEC	2,05	0,25	1,50	1,88
Tour de poitrine (cm)	228	10	210	256
Profondeur de poitrine (cm)	85,9	3,2	78,8	95,3
Hauteur au garrot (cm)	146	5	135	160
Largeur des hanches (cm)	58,8	3,4	50,7	66,7
Largeur de fesses (cm)	53,8	2,7	44,3	63,5
Volume total (m ³)	0,76	0,07	0,61	0,96
Volume tronqué (m ³)	0,69	0,07	0,56	0,84
Surface totale (m ²)	6,84	0,45	5,80	8,32
Surface tronquée (m ²)	5,53	0,39	4,60	7,17
Masse volumique (kg.m ⁻³)	0,89	0,03	0,79	0,95

Valeurs correspondant à 177 enregistrements seulement.

Note d'état corporel basée sur l'échelle de notation française de 0-5 (Bazin et al., 1984).

Surface et volume tronqués : volume et la surface du corps de l'animal tels que décrits dans la Figure 6.

Le modèle généralement utilisé pour estimer la surface corporelle est basé sur l'article de Mitchell (1928), qui a publié l'équation suivante : S (surface) = $0,14 \times PV^{0,67}$. D'autres modèles sont également disponibles (Elting, 1926 : $S = 0,147 \times PV^{0,56}$; Brody, 1945 : $S = 0,14 \times PV^{0,57}$; Johnson *et al.*, 1961 : $S = 0,235 \times PV^{0,46}$). Nous avons appliqué ces équations sur le poids vif (PV) mesuré de nos données et la comparaison a indiqué que certains modèles présentaient des valeurs plus faibles (Johnson *et al.*, 1961), des valeurs similaires (Elting *et al.*, 1926a ; Brody, 1945) ou des valeurs plus élevées (Elting, 1926b ; Mitchell, 1928 ; Meeh, 1879) (Figure 7).

Une erreur possible due à des images de mauvaise qualité peut exister dans l'appareil Morpho3D. Cependant, d'autres méthodes utilisées pour déterminer la surface ont également des limites et ne sont pas faciles à utiliser. Des travaux supplémentaires sur la détermination précise de la surface sont nécessaires, mais la possibilité d'avoir accès à un grand nombre d'animaux ouvre des perspectives intéressantes.

En ce qui concerne le volume corporel, très peu d'informations sont disponibles. Dans l'étude de Minagawa (1994) sur les vaches à viande, l'auteur a estimé le volume du cou et de la tête, ce qui signifie que le reste du volume était très similaire à notre volume tronqué. En appliquant notre modèle sur ce volume tronqué, nous avons trouvé une différence inférieure à 1,5 % pour le volume complet pour 4 vaches sur 5. La différence était inférieure à 6 % pour la surface.

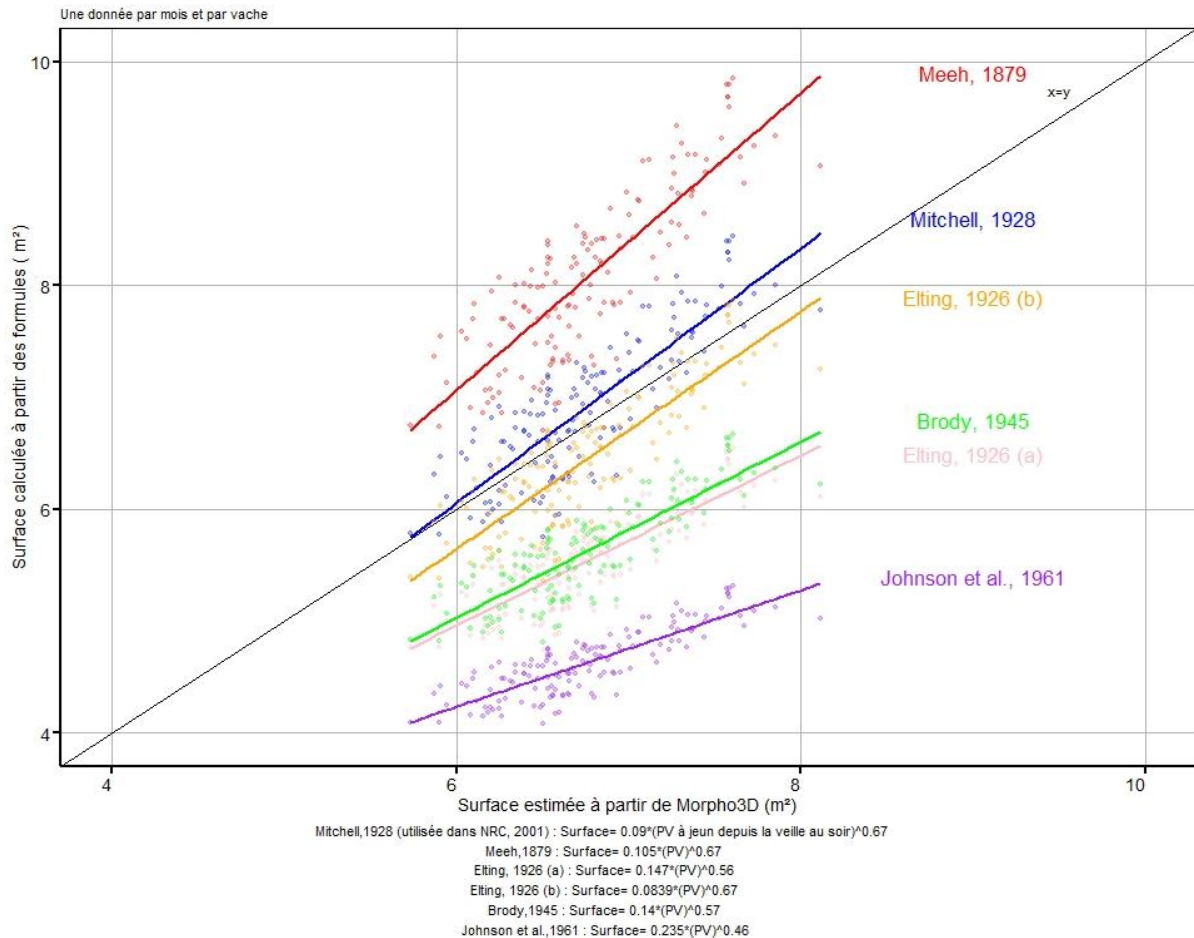


Figure 7 : Surface des vaches prédites à partir des formules par rapport à celles calculées à l'aide du dispositif Morpho3D (d'après Le Cozler *et al.*, 2019b)

2.2.3 Répétabilité et reproductibilité du volume et de la surface

La répétabilité permet d'estimer l'erreur liée au placement des plans par un opérateur sur des images tronquées. Le placement des plans variait peu (σ_{rp} pour le volume et la surface = 0,17 % et 0,32 %, respectivement). La reproductibilité inter-opérateur avait une erreur plus grande, σ_{Ro} pour le volume et la surface de 1,00 % et 1,80 %, respectivement. La reproductibilité des valeurs totales et tronquées dans un environnement changeant (σ_{Ri}) présentait des erreurs encore plus élevées (CV pour les deux = environ 2 à 3 %) (Tableau 6). Dans les calculs du volume total et de la surface, les CV exprimaient une erreur de mesure liée à l'acquisition et au traitement des images.

Dans les calculs de volume et de surface tronqués, les CV combinaient une erreur d'acquisition et de traitement d'image avec une erreur de placement dans le plan.

Tableau 6 : Reproductibilité du volume et de la surface totaux et tronqués dans un environnement changeant évalué par l'écart type (ET) et le coefficient de variation (CV)

	Moyenne	ET	CV
Volume total (m ³)	0,78	0,02	2,24
Volume tronqué (m ³)	0,72	0,02	2,43
Surface totale (m ²)	6,94	0,02	2,85
Surface tronquée (m ²)	5,59	0,1	3,12

Surface et volume tronqués : volume et la surface du corps de l'animal, tels que décrits dans la Figure 6.

Cette méthode peut calculer le volume et la surface avec une reproductibilité élevée. Sur les animaux vivants, les coefficients de reproductibilité pour le calcul du volume et de la surface étaient légèrement plus élevés en raison de la manipulation manuelle (placement des plans de coupe) et ont été quantifiés par la répétabilité du placement des plans. Une étude future pourrait calculer la répétabilité et la reproductibilité de chaque étape de la méthode pour identifier quand la méthode devient moins précise.

Les tests de répétabilité et de reproductibilité ne sont pas largement disponibles dans la littérature, même s'ils sont essentiels pour déterminer la pertinence des outils et des méthodes (Marinello *et al.*, 2015). Il est donc difficile de comparer la méthode que nous avons développée à d'autres outils.

2.2.4 Estimation du poids à partir d'images 3D

Des modèles linéaires par AIC ont été testés pour estimer le poids vif des vaches laitières (Tableau 7). Les modèles ont été caractérisés par un coefficient de détermination R^2 et une erreur de prédiction (RMSEP). R^2 a été utilisé pour juger de la qualité de la régression linéaire et RMSEP a été utilisé pour quantifier l'erreur de prédiction moyenne faite par le modèle lors de la validation croisée.

Tableau 7 : Estimation du poids vif (PV) des vaches à partir de paramètres morphologiques issus des images 3D

Equations		PV		
		R^2	RMSEP*	
(1)	$PV = \alpha * Volume + \beta * Surface + \gamma * LF + \delta * LH + \varepsilon * TP + \zeta * HG - \eta$	0,93	18,2 kg	2,72 %
(2)	$PV = \alpha * Surface + \beta * LH + \gamma * LF + \delta * HG + \varepsilon * TP - \zeta$	0,82	29,3 kg	4,38 %
(3)	$PV = \alpha * Volume + \beta * LF + \gamma * LH - \delta$	0,88	22,5 kg	3,36 %
(4)	$PV = \alpha * Volume + \beta$	0,85	24,9 kg	3,72 %

* RMSEP : Root Mean Square Error Prediction

Le modèle le plus précis a été défini par l'équation (1) et a pris en compte 6 variables sur 9, qui étaient le volume total, la surface totale, la largeur des hanches et des fesses, la hauteur du garrot et la profondeur de la poitrine. Le RMSEP était alors de 2,72 % et la valeur R^2 était de 0,93. D'autres modèles ont été testés, incluant soit la surface corporelle mais pas le volume (2), soit le volume mais pas la surface corporelle (3). Ces modèles sont moins précis, avec un RMSEP de 3,36 et 4,38 % pour les modèles (3) et (2), respectivement. Un modèle final (4), prenant uniquement en considération le volume, indiquait un RMSEP de 3,72 % et un R^2 de 0,85, avec une erreur de 25 à 26 kg pour la prédiction du poids vif.

L'estimation du poids corporel, en particulier pendant la période d'élevage, est généralement basée sur des indicateurs de croissance et est publiée depuis des décennies (Heinrichs, Rogers, Cooper, 1992). L'estimation du poids de l'animal à partir de mesures effectuées sur une image 3D est plus récente (Anglart, 2010 ; Buranakarl *et al.*, 2012 ; Kuzuhara *et al.*, 2015). Anglart (2010) a réalisé cette approche à partir de la capture 3D du dos de vaches laitières Prim'Holstein par une caméra Time-Of-Flight et a observé un coefficient de corrélation R^2 de 0,87. Mais sur 6 224 mesures réalisées, 30 % des mesures du PV estimé par la caméra présentaient une erreur de plus de 30 kg. Buranakarl *et al.* (2012) ont travaillé sur des images 3D de buffles entiers et établi 12 équations de prédiction de PV (4 pour tous les buffles, 4 pour les femelles et 4 pour les mâles) en modifiant le nombre de paramètres utilisés. Pour les femelles, ils ont obtenu un $R^2 = 0,89$, en utilisant 4 paramètres (hauteur au garrot, largeur des épaules, largeur des ischions, longueur entre les ischions et les épaules). Quant à Kuzuhara *et al.* (2015), ils ont estimé le poids corporel de vaches laitières à partir de 7 mesures différentes et l'erreur de prédiction moyenne était de 42 kg. Les modèles réalisés dans cette étude présentent donc des résultats satisfaisants par rapport aux données déjà publiées, avec un R^2 allant de 0,82 à 0,93, selon les équations choisies et des erreurs de prédiction moyennes de 2,72 % (18,2 kg) à 4,38 % (29,3 kg).

Contrairement aux travaux précédents utilisant uniquement des paramètres linéaires, l'imagerie 3D offre la possibilité de créer de nouveaux modèles à partir de données de volume et de surface. L'imagerie 3D permet finalement une estimation correcte et simplifiée du poids vif grâce aux mesures mesurées, mais surtout grâce au calcul du volume qui, fortement corrélé au poids, rend la prédiction très précise. Néanmoins, pour profiter pleinement des capacités de cet outil, davantage d'automatisation sera nécessaire (préparation d'images et calculs).

Conclusion et perspectives

La technologie de numérisation présentée dans cet article offre non seulement de nouvelles perspectives pour évaluer la morphologie animale, mais permet également de déterminer les volumes et les surfaces corporelles des vaches laitières. Malgré un temps d'obtention du résultat final plus long, la partie « manipulation de l'animal », très courte, permet de limiter les risques d'accident pour l'homme et l'animal, ce qui est intéressant pour d'autres productions où la manipulation des animaux est plus délicate (bovins allaitants par exemple). L'automatisation des différentes phases du processus d'acquisition (nettoyage, reconstruction et mesure automatique) permettra d'envisager à terme une utilisation à plus grande échelle, ainsi que pour le développement d'une nouvelle technologie basée sur une prise unique (« one shot »), où le déplacement des animaux n'est plus un problème. En complément des informations précédentes, il est également possible de déterminer le poids vif, une information utile, sans investissement dans un système de pesage, qui nécessite un ré-étalonnage et une vérification régulière. Des images partielles du corps, comme l'abdomen par exemple, provenant d'un appareil moins compliqué ou d'un appareil portable, pourraient aussi être envisagée. Des résultats préliminaires indiquent également que le dispositif permet d'estimer les variations de volume à court terme (évolution du contenu du rumen), à moyen terme (développement des embryons) ou à long terme (croissance).

Remerciements

Les auteurs remercient toutes les personnes impliquées dans le projet, en particulier les techniciens de la station expérimentale qui ont pris grand soin des animaux. Le projet Morpho3D est soutenu par le Fonds National CASDAR, un crédit Incitatif du département Phase de l'INRA et le Programme ANR DEFFILAIT.

Références bibliographiques

- Anglart D., 2010. Automatic estimation of body weight and body condition score in dairy cows using 3D imaging technique. Swedish University of Agricultural Sciences, Master thesis.
- Bazin S., Augéard P., Carteau M., Champion H., Chilliard Y., Cuyllé G., Disenhaus C., Durand G., Espinasse R., Gascoin A., Godineau M., Jouanne D., Ollivier O., Remond B., 1984. Grille de notation de l'état d'engraissement des vaches pie-noires. Institut Technique de l'Élevage Bovin, Paris, France.
- Buranakarl C., Indramangala J., Koobkaew K., Sanghuayphrai N., Sanpote J., Tanprasert C., Phatrapornnant T., Sukhumavasi W., Nampimoon P., 2012. Estimation of body weight and body surface area in swamp buffaloes using visual image analysis. *Journal of Buffalo Science*, 1, 13-20.
- Cignoni P., Callieri M., Corsini M., Dellepiane M., Ganovelli F., Ranzuglia G., 2008. MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool. Sixth Eurographics Italian Chapter Conference, 129-136.
- Elting E.C., 1926. A formula for estimating surface area of dairy cattle. *Journal of Agriculture Research* 33, 3, 269-279.
- Fischer A., Luginbuhl T., Delattre L., Delouard J. M., Faverdin P., 2015. Rear shape in 3 dimensions summarized by principal component analysis is a good predictor of body condition score in Holstein dairy cows. *Journal of Dairy Science* 98, 4465-4476.

Guo H., Ma X., Ma Q., Wang K., Su W., Zhu D., 2017. LSSA_CAU: an interactive 3D point clouds analysis software for body measurement of livestock with similar forms of cows and pigs. *Computers and Electronics in Agriculture*, 138, 60-68.

Heinrichs A.J., Rogers G.W., Cooper J.B., 1992. Predicting Body Weight and Wither Height in Holstein Heifers Using Body Measurements. *Journal of Dairy Science* 75 (12), 3576-3581.

Kmet J., Sakowski T., Huba J., Peskovicova D., Chrenek J., Polak P., 2000. Application of video Image analysis in the slaughter value estimation of live Simmental bulls. *Archiv Tierzucht Dummerstorf*, 43, 411-416.

Kuzuhara Y., Kawamura K., Yoshitoshi R., Tamaki T., Sugai S., Ikegami M., Kurokawa Y., Obitsu T., Okita M., Sugino T., Yasuda T., 2015. A preliminary study for predicting body weight and milk properties in lactating Holstein cows using a three-dimensional camera system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 111, 186-193.

Heinrichs A.J., Hargrove G.L., 1987. Standards of weight and height for Holstein heifers. *Journal of Dairy Science*, 70, 653-660.

Le Cozler Y., Allain A., Caillot A., Delouard J.M., Delattre L., Luginbuhl T., Faverdin P., 2019. High precision scanning system for complete 3D cow body shape imaging and analyzing morphological traits. *Computers and electronics in Agriculture* 157,447-453.

Le Cozler Y., Allain C., Xavier C., Depuille L., Caillot A., Delouard J.M., Delattre L., Luginbuhl T., Faverdin P., 2019. Volume and surface area of Holstein dairy cows calculated from complete 3D shapes acquired using a high-precision scanning system: Interest for body weight estimation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 165, 104977.

Marchant J.A., Schofield C.P., 1993. Extending the snake image-processing algorithm for outlining pigs in scenes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 8, 261-275.

Minagawa H., 1994. Surface Area, Volume, and Projected Area of Japanese-Shorthorn Cattle Measured by Stereo Photogrammetry Using Non-metric Cameras. *Journal of Agriculture Met* 50(1), 17-22.

Negretti P., Bianconi G., Bartocci S., Terramoccia S., Verna M., 2008. Determination of live weight and body condition score in lactating Mediterranean buffalo by Visual Image Analysis. *Livestock Science*, 113, 1-7.

Pezzuolo A., Guarino M., Sartori L., Marinello F., 2018. A feasibility study on the use of a structured light depth-camera for three-dimensional body measurements of dairy cows in free-stall barns. *Sensors*, 18, 673.

R Core Team 2013. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

SAS institute, 2016.

Schofield C.P., Marchant J. A., White R.P., Brandl N., Wilson M., 1999. Monitoring of pig growth using prototype-imaging system. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72, 3, 205-210.

Stajanko D., Brus M., Hocevar M., 2008. Estimation of bull live weight through thermographically measured body dimensions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61, 223-240.

Tscharke M., Banhazi T.M., 2013. Review of methods to determine weight and size of livestock from images. *Australian Journal of Multi-Disciplinary Engineering*, 10, 1-17.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL)