

Spécialité Agronomie
Dominante Ingénierie de l'élevage

Mémoire de fin d'études
Formation Ingénieur Institut Agro Dijon
Formation initiale

**Influence de la posture des vaches laitières sur les variations des mesures
morphologiques dans un système de captation de données basé sur
l'imagerie 3D**

(Stage réalisé du 20/03/2023 au 15/09/2023)

Audrey TIERCIN

Mohammed Ben Aouda
Enseignant référent

Yannick Le Cozler
Maître de stage
INRAE Centre Bretagne-
Normandie
16 Le Clos,
35590 Saint Gilles

Année universitaire 2022-2023

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence ANR-16-CONV-0004.



Remerciements

Je remercie tout d'abord l'Institut de Convergence #DigitAg pour son soutien financier qui a permis la réalisation de ce stage, leur accueil chaleureux lors du séminaire DigitAgora.

Je remercie Ludovic Brossard, le directeur de l'UMR PEGASE, ainsi que l'ensemble de l'équipe Systell, et notamment Nadège Edouard, sa responsable, pour leur accueil au sein de leur équipe.

Je remercie tout particulièrement Yannick Le Cozler pour m'avoir accueillie et accompagnée tout au long de ce stage. Un grand merci pour sa disponibilité malgré son emploi du temps chargé, ainsi que pour sa bonne humeur, et toutes ces discussions enrichissantes.

Je remercie l'équipe de l'IEPL de Méjusseume pour leur accueil, et leur précieuse aide pour l'acquisition des images 3D nécessaires à la réalisation de cette étude.

Merci également à Anne-Cécile pour ces quelques semaines de partage de bureau riches en discussions et en partage d'idées, des plus prometteuses aux moins fructueuses.

Je remercie les membres de l'Institut Agro Rennes pour leur accueil chaleureux au sein de leurs locaux, leur bonne humeur, et les quelques heures passées à résoudre des mots croisés.

Je remercie également Mohammed Ben Aouda, pour le suivi de ce stage et les conseils apportés.

Résumé

Le suivi phénotypique des bovins laitiers est indispensable pour la sélection génétique et la conduite du troupeau en élevage. Néanmoins, ceci nécessite du temps et présente des risques de stress et d'accidents, pour les animaux comme pour les hommes. L'utilisation de dispositifs basés sur l'imagerie en trois dimensions (3D) s'est largement développée ces dernières années, mais beaucoup nécessitent d'immobiliser l'animal lors de l'acquisition des images. En effet, un dispositif sans contrainte de posture et/ou de mouvement entraîne une grande variabilité de positions et de postures, se traduisant par des erreurs de mesures importantes. Utilisant un dispositif sans contraintes appelé Deffilait3D, la présente étude visait à déterminer l'influence de la position de la tête sur les mesures morphologiques, et la possibilité de corriger ces mesures en fonction de la posture des vaches. Deux jeux de données comprenant des images 3D de quatre et dix vaches avec différentes hauteurs de tête ont été utilisés, représentant un total de respectivement 24 et 106 images 3D. Sur celles-ci, une mesure morphologique a été prise à l'avant de l'animal, la hauteur au garrot (HG), et deux mesures à l'arrière de l'animal, la hauteur au sacrum (HS), et la hauteur moyenne aux hanches (HH). Les résultats confirment que la position de la tête a une influence significative sur la mesure HG, les mesures à l'arrière de l'animal restant stables, indépendamment de la position de la tête. Ainsi, lorsque les vaches baissent la tête, la hauteur au garrot diminue, augmentant l'erreur de cette mesure morphologique en moyenne d'environ 3% lorsque la tête arrive au niveau du sol, avec une erreur maximum de 4,8%. Trois approches ont été testées pour corriger la hauteur au garrot en fonction de la position de la tête : la prédiction de la hauteur au garrot à partir de la mesure de la hauteur aux hanches ; l'application d'un correctif fixe en pourcentage en fonction de la position de la tête ; et la correction à partir de la prédiction de l'erreur de mesure en fonction de la position de la tête. Les deux dernières approches ont montré des résultats similaires pour corriger la mesure de la hauteur au garrot, permettant d'obtenir une erreur de mesure respectivement inférieure à 0,80% et 0,10%. Ces résultats montrent que la posture des bovins dans un système de phénotypage par acquisition d'images 3D entraîne des variations des mesures morphologiques, qu'il est possible de déterminer et corriger.

Mots clés : imagerie 3D, vache laitière, mesures morphologiques, posture, correction

Abstract

The phenotypic monitoring of dairy cattle is essential for both genetic selection and herd management in livestock farming. This practice is time-consuming and presents risks of stress and accident for animals, and humans. Phenotyping devices based on three-dimensional (3D) imaging are thus of interest and has been developed in recent years. However, many of them require immobilization of the animal during image acquisition, since a device used without constraint usually results in variations of the animal's posture on 3D images. Using a constraint-free system called Deffilait3D, the present study aims to determine the influence of head position on morphological measurements, and the possibility of correcting these measurements according to cow's position. Two datasets including 3D images of four and ten cows with different head position were used, for a total of 24 and 106 3D images respectively. From these images, the height at the withers (HG), the height at the sacrum (HS), and the average height at the hips (HH) were determined. The results confirm the position of the head has a significant influence on the measurement of height at the withers, while the measurements at the back of the animal remain stable, regardless of the position of the head. Thus, when cows lower their head, the height at the withers decreases, increasing the error of this morphological measurement on average by about 3% when the head reaches ground level, with a maximum error of 4.8%. Three approaches were tested to correct shoulder height for head position: prediction of height at the withers from hip height measurement; application of a fixed percentage correction for head position; and correction based on predicting the measurement error based on head position. The last two approaches showed similar results to correct the measurement of height at the withers, with measurement error lower than 0.80% and 0.10% respectively. These results indicate that the posture of cattle in a phenotyping system based on 3D images may lead to variations in morphological measurements, which can be determined and corrected.

Key words: 3D imaging, dairy cattle, morphological measurements, posture, correction

Table des matières

Introduction.....	1
1. Contexte de l'étude.....	2
1.1. Les enjeux de l'élevage en France.....	2
1.2. Le phénotypage des animaux d'élevage pour améliorer la durabilité des systèmes	3
1.2.1. Notions de phénotype et phénotypage	3
1.2.2. Le phénotypage pour la sélection génétique d'animaux efficients et robustes	3
1.2.3. Le phénotypage pour améliorer la conduite du troupeau.....	4
1.2.4. Phénotypage traditionnel de la morphologie des bovins.....	5
1.2.5. Avantages et limites de ces méthodes	6
1.3. L'élevage de précision pour améliorer le suivi phénotypique des animaux.....	7
1.3.1. Principe de l'élevage de précision	7
1.3.2. Des outils permettant le phénotypage à haut débit	7
1.4. L'imagerie 3D : un outil de phénotypage non-invasif	8
1.4.1. Principe de l'imagerie 3D.....	8
1.4.2. Validation des systèmes d'imagerie 3D.....	10
1.4.3. Divers systèmes développés pour le phénotypage des bovins.....	11
1.4.4. Les systèmes développés à l'INRAE de Bretagne-Normandie	11
1.4.5. Problématique	12
2. Matériels et méthodes.....	14
2.1. Le système d'imagerie en trois dimensions Deffilait3D.....	14
2.2. Essai 1 : utilisation d'un jeu de données déjà existant.....	15
2.2.1. Données sélectionnées.....	15
2.2.2. Positions testées	15
2.3. Essai 2 : acquisition de nouvelles images	16
2.3.1. Définition des positions testées.....	16
2.3.2. Acquisition des images.....	16
2.3.3. Sélection des images 3D utilisées pour les mesures morphologiques	17
2.4. Mesures réalisées sur les images 3D issues des deux essais	17
2.4.1. Placement de plans et points fixes	17
2.4.2. Calcul de l'angle formé par la tête selon les positions testées.....	18

2.4.3. Mesures morphologiques.....	18
2.5. Correction de la hauteur au garrot	19
2.6. Démarche statistique.....	19
2.6.1. Répétabilité des mesures morphologiques	20
2.6.2. Influence de la position sur les mesures morphologiques.....	20
2.6.3. Choix des paramètres pour chacune des méthodes de correction de la hauteur au garrot et comparaison des méthodes.....	21
3. Résultats.....	22
3.1. Répétabilité et reproductibilité des indicateurs morphologiques	22
3.2. Evaluation de l'effet de la position de la tête sur les mesures morphologiques.....	22
3.2.1. Effet de la position de la tête sur la hauteur au garrot.....	22
3.2.2. Effet de la position sur l'arrière de l'animal (HH et HS).....	24
3.3. Effet de la hauteur au garrot sur la variation individuelle de HG.....	24
3.4. Correction de la hauteur au garrot : choix des méthodes de correction.....	24
3.4.1. Méthode 1 : Correction de la hauteur au garrot à partir de mesures de l'arrière de l'animal	24
3.4.2. Méthode 2 : Application d'une correction fixe selon la position.....	25
3.4.3. Méthode 3 : modèle de régression linéaire pour prédire la variation de la hauteur au garrot à partir de l'angle de la tête	26
3.5. Application et comparaison des méthodes de correction	26
4. Discussion	27
4.1. Influence de la posture des animaux sur les mesures morphologiques	27
4.1.1. Position de la tête.....	27
4.1.2. D'autres sources de variation possibles.....	28
4.2. Correction des mesures morphologiques	30
4.2.1. Importance de corriger la hauteur au garrot	30
4.2.2. Deux méthodes de correction possibles	31
4.2.3. Combinaison de corrections en fonction des positions des pattes et de la tête.....	32
4.3. Perspectives	32
Conclusion	33

Références bibliographiques

Annexes

Liste des abréviations

2D : Deux dimensions

3D : Trois dimensions

ANOVA : Analyse de variance

CLD : Comparative Letter Display

CV : Coefficient de variation

HG : Hauteur au garrot

HH : Hauteur aux hanches moyenne

HHD : Hauteur à la hanche droite

HHG : Hauteur à la hanche gauche

IA : Intelligence artificielle

IoT : Internet des objets (Internet of Things)

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

LH : largeur des hanches

NEC : Note d'état corporel

PP : Profondeur de poitrine

RFID : Radio-Frequency IDentification

TP : Tour de poitrine

UMR : Unité Mixte de Recherche

Δ HG : Variation de la hauteur au garrot par rapport à la position de référence

Δ HH : Variation de la hauteur aux hanches moyenne par rapport à la position de référence

Δ HS : Variation de la hauteur au sacrum par rapport à la position de référence

RMSE : Racine de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error)

MAE : Erreur absolue moyenne (Mean Absolute Error)

R^2 : Coefficient de détermination

R : Coefficient de corrélation de Pearson

RVB : Rouge-Vert-Bleu

Liste des figures

Figure 1 : Le triangle de la performance (Adapté de Rastoin et Ghersi, 2010).

Figure 2 : Quelques mesures morphologiques réalisables à l'aide d'une toise (en bleu) ou d'un barymètre (en rouge).

Figure 3 : Exemple de mesures permises par l'élevage de précision (Allain *et al.*, 2012).

Figure 4 : Principe de stéréovision (Valerga *et al.*, 2020).

Figure 5 : Principe de triangulation avec une émission laser (a) ou une émission de lumière structurée (b) (3Dnatives, 2019).

Figure 6 : Principe de temps de vol (Bamji *et al.*, 2015).

Figure 7 : Etapes de reconstruction d'une image 3D : exemple du dispositif Morpho3D (adapté de Le Cozler *et al.*, 2019a).

Figure 8 : Comparaison des dispositifs Morpho3D et Deffilait3D.

Figure 9 : Le dispositif Deffilait3D.

Figure 10 : Carte de profondeur.

Figure 11 : Vache en position de référence P1 vue de profil (a) et de face (b).

Figure 12 : Les positions sélectionnées pour le premier essai : P1 (a), P2 (b) et P3 (c).

Figure 13 : Acquisition des données pour chacune des positions à tester : (a) la position de référence P1, (b) la position P2, (c) la position P3, (d) la position P4 et (e) la position P5.

Figure 14 : Grille de notation de la qualité des images 3D adaptée pour l'essai 2 (de 1 à 4).

Figure 15 : Exemple de positions retenues (a) et écartées pour problème de pattes (b) ou de dos (c).

Figure 16 : Localisation des points fixes par vache : le garrot G vu de profil (a) et du dessus (b) et l'œil O (c).

Figure 17 : Mesures effectuées pour déterminer l'angle de la tête.

Figure 18 : Les mesures morphologiques réalisées sur les images 3D : HG (a), HS (b), HHG (c) et HHD (d).

Figure 19 : Schéma récapitulatif des différentes démarches statistiques pour déterminer l'influence de la position sur les mesures morphologiques.

Figure 20 : Evolution de l'écart entre la hauteur au garrot selon l'angle de la tête pour chaque vaches des essais 1 (a) et 2 (b).

Figure 21 : Comparaison des écarts de hauteur au garrot (ΔHG) entre les différentes positions de tête pour l'essai 1 (a) et l'essai 2 (b).

Figure 22 : Comparaison des écarts de hauteur au sacrum pour l'essai 1 (a) et l'essai 2 (b), et des écarts de hauteur aux hanches pour l'essai 1 (c) et l'essai 2 (d) selon les différentes positions de tête.

Figure 23 : Corrélation entre les mesures HH et HG pour les essais 1 (a) et 2 (b), en position de référence P1.

Figure 24 : Corrélation entre les mesures HS et HG pour les essais 1 (a) et 2 (b), en position de référence P1.

Figure 25 : Comparaison des écarts de hauteur au garrot par rapport à la position de référence P1 pour chaque méthode de correction appliquées aux données de l'essai 1(a) et de l'essai 2(b).

Figure 26 : Position latérale des pattes en position de référence (a) et avec écartement des pattes (b).

Figure 27 : Position longitudinale des pattes en position de référence (a) et avec écartement des pattes (b).

Figure 28 : Variation de hauteur au garrot par rapport à la mesure en position de référence en fonction de l'écartement latéral (a) et longitudinal (b) des pattes avant.

Figure 29 : Hauteur au garrot de génisses de race Holstein américaines, en fonction de l'âge (Jones et Heinrichs, 2022).

Liste des tableaux

Tableau 1 : Méthodes de phénotypage utilisées pour le suivi morphologique des animaux, leurs avantages et inconvénients.

Tableau 2 : Avantages et inconvénients des dispositifs d'acquisition des données nécessaires à la construction d'une image 3D d'un animal.

Tableau 3 : Les principaux systèmes d'imagerie 3D développés en élevage bovin .

Tableau 4 : Coefficients de variation et erreurs de répétabilité et de reproductibilité des mesures morphologiques issues du dispositif Deffilait3D (adapté de Dumesny, 2021).

Tableau 5 : Comparaison des mesures morphologiques issues des dispositifs Morpho3D et Deffilait3D (adapté de Dumesny, 2021) .

Tableau 6 : Les classes d'angles permettant de caractériser les différentes positions de la tête.

Tableau 7 : Coefficients de variation et erreurs de répétabilité et de reproductibilité des indicateurs morphologiques.

Tableau 8 : Comparaison des écarts de hauteur selon la position par rapport à la position 1 pour les essais 1 et 2.

Tableau 9 : Influence de l'angle α sur les écarts de mesure à l'arrière de l'animal par rapport à la position de référence P1.

Tableau 10 : Analyse de la covariance entre HG et Δ HG.

Tableau 11 : Méthodes de correction par application d'un pourcentage à la mesure de la hauteur au garrot en fonction de la position de la tête.

Tableau 12 : Comparaison de deux méthodes de correction de la hauteur au garrot par application d'un correctif en % en fonction de la position de la tête.

Tableau 13 : Paramètres d'évaluation du modèle de régression linéaire établi à partir des données de l'essai 2.

Tableau 14 : Comparaison des écarts de hauteur par rapport à la position de référence P1 pour chaque méthode de correction.

Tableau 15 : Correction de la hauteur au garrot en fonction de la position de la tête et de la position longitudinale des pattes pour deux vaches.

Liste des annexes

Annexe 1 : Description des vaches utilisées dans les essais 1 (Tableau a) et 2 (Tableau b)

Annexe 2 : Défaut de reconstruction sur les images 3D issues de l'essai 2

Annexe 3 : Coefficients de variation et erreurs de répétabilité et de reproductibilité détaillés.

Annexe 4 : Comparaison des méthodes de correction pour la hauteur au garrot brute (valeur absolue)

Annexe 5 : Equation de prédiction du poids vif des vaches Holstein (Le Cozler *et al.*, 2019)

Annexe 6 : Script R de correction des mesures et comparaison des méthodes de correction

Introduction

L'élevage fait face à de nombreux enjeux économiques, environnementaux et sociaux : crises des vocations, prix du lait en agriculture biologique, émissions de gaz à effet de serre etc... en France (Chatellier *et al.*, 2013), mais aussi dans le monde (Mottet, 2022). Pour y répondre des animaux robustes et efficaces, c'est-à-dire qui valorisent davantage leur ration alimentaire et nécessitent moins d'aliment pour leur production, sont aujourd'hui recherchés (Cantalapiedra-Hijar *et al.*, 2020).

Cependant, les effets du milieu de vie sur l'expression des gènes sont importants, et la génomique seule ne peut permettre une sélection optimale, en raison notamment des variations de l'environnement des animaux. C'est pourquoi le phénotypage ciblé sur des caractères contribuant à l'efficacité peut apporter des connaissances complémentaires sur les bénéfices et la durabilité des stratégies de sélection génétique (Phocas *et al.*, 2014). De plus, la prise en compte des variations phénotypiques individuelles au sein du troupeau peut permettre d'optimiser l'utilisation des intrants au niveau alimentaire, de la reproduction, et du suivi sanitaire. Toutefois, le suivi dynamique, c'est-à-dire en continu, des caractéristiques phénotypiques nécessite une manipulation régulière des animaux, ce qui peut augmenter leur stress, et occasionner des accidents auprès des éleveurs.

L'agriculture de précision vise à analyser et contrôler les processus de production dans les exploitations agricoles grâce à un suivi individuel et/ou dynamique, tout en minimisant les interventions sur les animaux (Eastwood *et al.*, 2004, cités par Bewley, 2010). Parmi les technologies utilisables, l'imagerie en trois dimensions (3D) s'est développée ces dernières années, basée sur des dispositifs non-invasifs qui utilisent des capteurs optiques pour créer des images précises et détaillées des animaux en 3D, afin de mesurer des caractéristiques phénotypiques des animaux et leur évolution au cours du temps. Ainsi, chez les vaches laitières, il est possible de mesurer de nombreux indicateurs morphologiques tels que la hauteur au garrot ou la longueur du corps, des mesures de volume et surface, mais aussi la note d'état corporel et la composition chimique (Anglart, 2010 ; Fisher *et al.*, 2015 ; Le Cozler *et al.*, 2019a ; Le Cozler *et al.*, 2019b ; Xavier *et al.*, 2022). Couplée à des méthodes d'extraction et d'analyses des indicateurs, l'imagerie 3D rend ainsi possible le phénotypage à haut débit des animaux, qui peut se définir comme « une méthode de détermination de phénotypes mesurables de façon répétable, automatisable et rapide » (Hocquette *et al.*, 2011), de façon à obtenir un nombre important de données, tout en limitant les risques d'accidents et le stress lié à la manipulation des animaux.

C'est en ce sens que les chercheurs de l'Unité Mixte de Recherche (UMR) 1380 INRAE - Institut Agro – Rennes – Angers, Physiologie, Environnement et Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Élevage (PEGASE), située à Saint-Gilles (35), en collaboration avec l'entreprise 3D Ouest, située à Lannion (22), ont élaboré un dispositif d'acquisition d'images 3D « Deffilait3D » destiné au phénotypage à haut débit des vaches laitières.

Le dispositif présente une répétabilité et une reproductibilité des mesures satisfaisantes, avec un pourcentage de variation inférieur à 3% (Dumesny, 2021). Cependant, certaines mesures, comme la hauteur au garrot, présentent de fortes variations pour un même animal en fonction des images. L'hypothèse est que la position de l'animal dans le dispositif influence les mesures, or positionner l'animal correctement impliquerait une intervention humaine, ce qui irait à l'encontre des objectifs du phénotypage à haut débit. Ainsi, ce stage a été mené dans l'optique de déterminer une position de référence permettant de corriger les variations des mesures imputées à la position des animaux dans le dispositif d'imagerie 3D « Deffilait3D » sans manipuler les animaux.

C'est ainsi se pose la question : **Comment la posture d'un animal influence les mesures morphologiques dans un système de captation de données basé sur de l'imagerie 3D ?**

Ce rapport débutera par une étude bibliographique des systèmes d'imagerie 3D existants et des différentes méthodes de mesures morphologiques. S'en suivra la méthodologie et le matériel utilisés pour répondre à la question posée. Enfin, les résultats obtenus seront présentés puis discutés.

1. Contexte de l'étude

1.1. Les enjeux de l'élevage en France

L'élevage joue un rôle important dans le paysage agricole et économique français. Avec une longue tradition d'élevage, et un cheptel bovin de près de 18 millions de têtes en 2021 (dont 7,3 millions de vaches), la France est le premier producteur européen de viande bovine et le deuxième producteur de lait et produits laitiers (Agreste, 2022). L'élevage représente ainsi environ 40% de la valeur de la production agricole totale en France et fournit des emplois directs et indirects avec 703 000 équivalents temps plein (ETP) (soit environ 882 000 personnes), contribuant ainsi à la vitalité économique et sociale des territoires (Lang *et al.*, 2015)

Cependant, l'élevage en France est confronté à différents défis et enjeux tels que la nécessité de concilier production animale et protection de l'environnement, préservation de la biodiversité et respect du bien-être animal. Depuis le rapport de l'Organisation des Nations Unies pour l'agriculture et l'alimentation (FAO) *Livestock's Long Shadow* (Steinfeld *et al.*, 2006), les critiques portées à l'élevage et son impact sur l'environnement sont croissantes. Elles concernent notamment les dommages causés au sol par le surpâturage, une consommation en eau importante, et l'émission de 18% des gaz à effet de serre totaux (en équivalent CO₂), dont plus de la moitié provient des élevages de bovins (FAO, 2015). A cela s'ajoutent la pression croissante sur l'utilisation des ressources naturelles, les effets du réchauffement climatique entraînant une diminution des rendements de fourrages et de cultures (Moreau *et al.*, 2010) et les contraintes économiques liées aux coûts de production, menaçant la rentabilité des exploitations (Idele, 2019). Enfin, des « contraintes physiques intenses » relevées par les actifs du secteur agricole ainsi que des contraintes horaires indiquent des conditions de travail contraignantes (Agreste, 2023a).

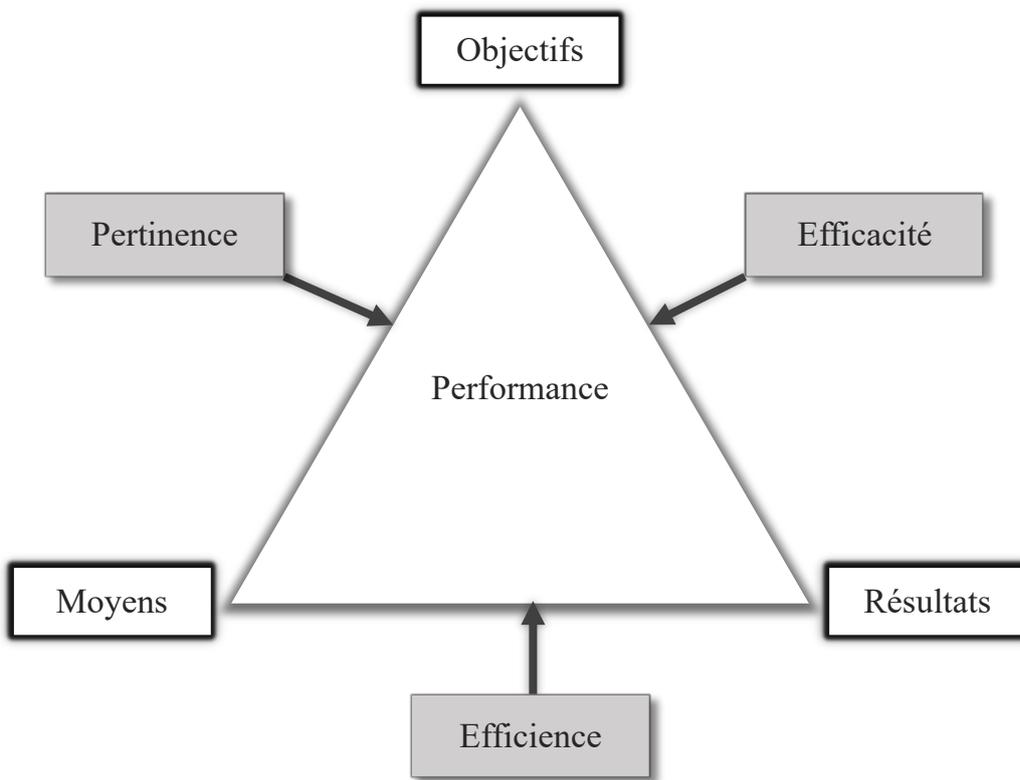


Figure 1 : Le triangle de la performance (Adapté de Rastoin et Ghersi, 2010)

L'ensemble de ces enjeux a entraîné des difficultés de renouvellement des chefs d'exploitation et une diminution des élevages (Agreste, 2023b). C'est ainsi qu'entre 2010 et 2020, le nombre d'exploitations spécialisées en élevage a diminué de 36%, dont 23,8% et 27,1% pour les élevages bovins allaitants et laitiers sur cette période.

Face à ces enjeux, les élevages bovins doivent s'adapter pour perdurer. La durabilité des systèmes agricoles s'appuie sur trois piliers : l'économie, l'environnement et le social (World Commission on Environment and Development, 1987). Ainsi, les systèmes d'élevage de bovins doivent trouver des solutions techniques et économiques afin de se maintenir sur la durée sur le plan économique, environnemental et social pour répondre aux demandes du citoyen-consommateur et faire face aux nombreux aléas.

1.2. Le phénotypage des animaux d'élevage pour améliorer la durabilité des systèmes

1.2.1. Notions de phénotype et phénotypage

Le phénotype correspond à l'ensemble des caractères observables d'un organisme, qui résultent de l'interaction entre son génotype et son environnement (Wiener et Rouvier, 2009). Il englobe toutes les caractéristiques physiques, morphologiques, physiologiques et comportementales d'un organisme. Il est essentiel pour comprendre la diversité biologique, l'adaptation des organismes à leur environnement et l'héritabilité des traits au sein d'une population.

Le phénotypage est le processus par lequel les caractéristiques phénotypiques sont mesurées, quantifiées et/ou décrites (Wiener et Rouvier, 2009). Il implique des méthodes d'observation, de mesure et d'analyse des caractéristiques anatomiques, fonctionnelles, métaboliques ou encore comportementales d'un individu (Monget et Le Bail, 2009).

1.2.2. Le phénotypage pour la sélection génétique d'animaux efficaces et robustes

L'efficacité alimentaire se définit comme la quantité de production animale (viande, lait ...) pour 1 kg d'aliment (Rastoin et Ghersi, 2010). Ce critère exprime la capacité d'un animal à atteindre les objectifs fixés (Figure 1), indépendamment des moyens utilisés.

L'efficacité alimentaire consiste quant à elle à évaluer la quantité d'aliment nécessaire pour obtenir une unité de production animale (viande, lait...) (Rastoin et Ghersi, 2010). Il s'agit donc des moyens utilisés pour atteindre un résultat (Figure 1). L'efficacité intègre une notion de coût (économique, environnemental ou social) au travers des moyens utilisés. Ainsi des animaux efficaces nécessiteront moins d'aliments pour leur production, ce qui permet d'optimiser les ressources disponibles. L'efficacité alimentaire se mesure classiquement à l'aide d'indicateurs tels que l'ingéré résiduel. Cependant ce critère est actuellement difficile à déterminer en élevage où un grand nombre de fermes ne disposent pas d'équipements permettant une mesure individuelle (Idele, 2015).

La robustesse des animaux correspond à la capacité des animaux à s'adapter à une variabilité de l'environnement, sans compromettre leur production. Elle prend en compte les interactions du milieu sur l'expression génétique des caractères de production (Friggens *et al.*, 2017). La robustesse est ainsi liée à l'efficacité des animaux. Bien que ce paramètre complexe prenne en compte différents composants qui peuvent évoluer dans le temps, la robustesse peut être déterminée par un suivi régulier de la production (production laitière, gain de poids...).

La sélection génétique vise à améliorer les caractères souhaités chez les animaux (France Génétique Elevage, 2011a). Traditionnellement, la sélection des reproducteurs se faisait au travers de leur phénotype et celui d'individus apparentés. L'arrivée de la génomique, qui fait référence à l'étude de l'ADN d'un organisme, a ouvert de nouvelles perspectives pour l'amélioration génétique en élevage (France Génétique Elevage, 2011b). La génomique consiste à identifier rapidement et précisément des marqueurs génétiques associés à des caractères d'intérêt, ce qui facilite la sélection de reproducteurs de manière plus précoce et plus précise, et offre la possibilité de sélectionner sur des caractères complexes qui sont difficiles à mesurer directement. Son utilisation a aussi permis de réduire l'intervalle entre deux générations de reproducteurs et d'accélérer le progrès génétique (Lagarrigue et Tixier-Boichard, 2011). Cependant la génomique ne fournit qu'une information sur la potentialité génétique d'un animal, sans prendre en compte les facteurs environnementaux qui peuvent influencer l'expression des gènes et donc la production.

L'efficacité alimentaire et la robustesse des animaux sont régies par un nombre important de caractères et les interactions du milieu sur l'expression du génotype sont grandes, ce que la génomique seule ne permet pas de déterminer (Friggens *et al.*, 2017). Le phénotypage demeure donc essentiel pour évaluer les performances réelles des bovins, et comprendre les relations entre le génotype et le milieu (Lagarrigue et Tixier-Boichard, 2011 ; Peyraud et Phocas, 2014). En intégrant des données phénotypiques précises et fiables, la sélection génétique peut être orientée de manière plus efficace et ciblée pour la sélection d'animaux efficaces et robustes (Cantalapiedra-Hijar *et al.*, 2020).

1.2.3. Le phénotypage pour améliorer la conduite du troupeau

Le phénotypage individuel consiste à mesurer et à évaluer les caractéristiques spécifiques à chaque animal. En mesurant régulièrement des caractères tels que le poids vif, la production laitière ou encore l'ingestion, il est possible d'identifier les animaux les plus performants et d'ajuster la conduite d'élevage en conséquence (Leudet *et al.*, 2005). Cela permet d'optimiser la conduite d'élevage et limiter les rejets en adaptant les intrants tels que l'alimentation et les traitements pharmaceutiques aux besoins réels de chaque individu, et d'orienter une sélection vers de caractères visant à améliorer l'efficacité et la robustesse des animaux (Peyraud et Phocas, 2014).

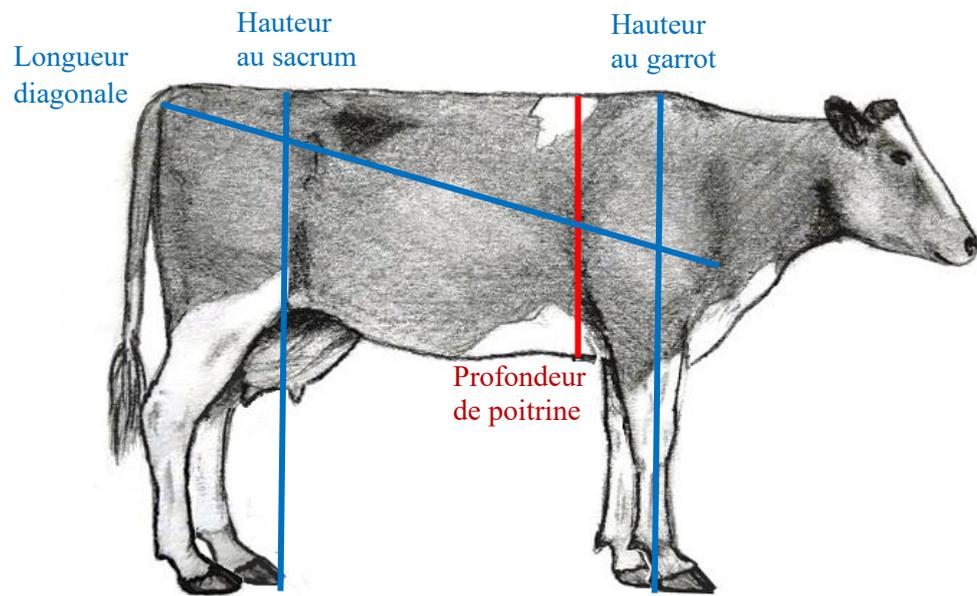


Figure 2 : Quelques mesures morphologiques réalisables à l'aide d'une toise (en bleu) ou d'un barymètre (en rouge) (©Tiercin A.)

1.2.4. Phénotypage traditionnel de la morphologie des bovins

Les mesures morphologiques se concentrent sur la forme, la taille et la structure corporelle des animaux. Il s'agit de mesures facilement observables et réalisables en exploitation, du fait de la facilité d'observation des caractères et de leur intérêt pour les éleveurs (Lagarrigue et Tixier-Boichard, 2011). Ces mesures sont distinguées en deux catégories : la conformation, ou développement musculaire et squelettique, et l'état d'engraissement.

Mesures de la conformation des animaux

Les mesures de conformation par toise (Heinrichs et Lammer, 1998) ou barymètre (mètre-ruban) (Hoffman, 1997) permettent une détermination et/ou un suivi de la morphologie des animaux. Elles permettent d'obtenir différentes mensurations telles que la hauteur au garrot (HG), la largeur des hanches (LH), le tour de poitrine (TP) ou encore la profondeur de poitrine (PP) (Figure 2).

Le poids vif d'un animal est également un indicateur utilisé en élevage, mesuré directement par pesée à l'aide d'une bascule, ou bien estimé grâce à des équations de prédiction prenant en compte la profondeur de poitrine ou la hauteur au garrot (Hoffman, 1997 ; Enevoldsen et Kristensen, 1997).

Le pointage est quant à lui une méthode indirecte d'estimation de la morphologie (Lajudie *et al.*, 2014) via une notation visuelle réalisée par un pointeur expérimenté sur des critères tels que la musculature, l'ossature et même l'équilibre des animaux. Chaque race dispose de sa propre grille de pointage et les points d'intérêts varient selon la spécialisation des animaux. Pour les bovins allaitants les grilles mettront l'accent sur le développement musculaire, tandis que pour les bovins laitiers, la mamelle sera davantage détaillée.

Mesures liées à l'état d'engraissement des animaux

Afin d'évaluer l'état d'engraissement des bovins et estimer leurs quantités de réserves corporelles, pouvant influencer sur la reproduction et l'état de santé des animaux, une note d'état corporel (NEC) est déterminée. Elle est donnée suite à l'observation et la palpation des dépôts de tissus adipeux sur des zones précises du corps de l'animal. Il existe un certain nombre d'échelles de notations de la NEC. En France, la grille majoritairement utilisée pour déterminer la NEC chez les bovins de race Holstein a été harmonisée en 1984 par l'Institut Technique de l'Élevage Bovin (ITEB) (Bazin, 1984), avec une notation allant de 0 à 5. D'autres grilles reposant sur l'observation et/ou la palpation des animaux ont été proposées pour mesurer l'état d'engraissement des bovins laitiers, avec par exemple une échelle de 1 à 5 aux Etats Unis (Edmonson *et al.*, 1989), ou de 1 à 8 en Australie (Earle, 1976). D'autres systèmes de notation de la note d'état corporel ont également été adaptés aux bovins allaitants (Herd et Sprott, 1986 ; Petit et Agabriel, 1993).

Tableau 1 : Méthodes de phénotypage utilisées pour le suivi morphologique des animaux, leurs avantages et inconvénients

Mesure	Méthode	Avantages de la méthode	Inconvénients de la méthode
Mensurations	Toise et ruban (Hoffman, 1997 ; Heinrichs et Lammer, 1998)	- Mesure objective - Peut permettre de prédire le poids vif - Peu coûteuse - Non invasive	- Manipulation des animaux : contention nécessaire, stress des animaux et risque d'accident - Nécessite de bien positionner l'animal et les outils de mesure
Poids	Pesée (Enevoldsen et Kristensen, 1997)	- Mesure objective - Non invasive	- Nécessite un dispositif spécifique (couloir ou cage de contention) qui peut être coûteux - Chronophage - Manipulation des animaux : stress des animaux et risques d'accidents
Conformation	Pointage (Lajudie <i>et al.</i> , 2014)	- Pas de contention des animaux - Non invasive	- Mesure subjective - Chronophage - Ponctuelle
Etat d'engraissement	Note d'état corporel (Herd et Sprott, 1986)	- Peu coûteuse - Non invasive	- Subjective - Ponctuelle - Nécessite une manipulation de l'animal (palpation)
Etat d'engraissement	Echographie (Schröder et Staufenbiel, 2006)	- Mesure objective - Précise - Non invasive	- Coût de l'échographe élevé - Nécessite des connaissances pour interpréter l'image - Nécessite une contention de l'animal
Etat d'engraissement	Biopsie (Robelin, 1986)	- Mesure objective - Précise	- Invasive - Coûteuse - Nécessite une anesthésie locale

L'échographie peut également être utilisée pour mesurer l'épaisseur de gras déposé sur certaines zones grâce à une sonde à ultrasons permettant de visualiser les différentes couches de tissus et mesurer l'épaisseur de gras intramusculaire à l'épaule ou la croupe (Schröder et Staufienbiel, 2006).

Enfin, d'autres mesures telles que le prélèvement d'adipocytes par biopsie pour suivre la taille des cellules graisseuses peuvent être réalisées, mais s'avèrent invasives et sont utilisées ponctuellement dans les stations d'expérimentation (Robelin, 1986).

1.2.5. Avantages et limites de ces méthodes

Les méthodes de phénotypage traditionnelles présentent un certain nombre d'avantages (Tableau 1). Les méthodes de mesure par notation (pointage et NEC), ainsi que les mesures par toise et ruban sont abordables financièrement et peuvent être mises en œuvre dans les élevages. Elles ne nécessitent pas de technologies ou d'équipements complexes et peuvent être réalisées avec des outils et des ressources disponibles dans les exploitations agricoles (Herd et Sprott, 1986 ; Hoffman, 1997 ; Heinrichs et Lammer, 1998). De plus ces méthodes permettent souvent une mesure directe des caractères phénotypiques d'intérêt, tels que le poids vif et les mensurations, afin d'obtenir des informations précises sur les performances des animaux.

Cependant, les mesures phénotypiques sont confrontées à plusieurs limites et contraintes (Tableau 1). Le coût en temps et en main d'œuvre nécessaire pour effectuer ces mesures (Enevoldsen et Kristensen, 1997 ; Lajudie *et al.*, 2014) rend difficile le suivi en continu de l'évolution phénotypique des animaux. Il s'agit donc de mesures ponctuelles ne reflétant que rarement la variation phénotypique au cours du temps.

Les mesures de pointage, peuvent être influencées par la subjectivité de l'observateur. Ainsi, l'évaluation de traits tels que la NEC, la conformation ou la qualité de la viande peut varier d'un observateur à l'autre, en fonction de leurs propres jugements et critères, et entraîner une variabilité et une imprécision dans les données collectées (Herd et Sprott, 1986).

Les risques de blessures sont également une préoccupation majeure lors des mesures phénotypiques. Les animaux peuvent réagir de manière imprévisible ou agressive, ce qui augmente le risque de blessures pour les personnes chargées des mesures. En 2017 près de 45% des accidents de travail du secteur agricole provenaient de l'élevage bovin (Direction des statistiques, des études et fonds, 2019), et les animaux étaient à l'origine de près d'un accident sur trois, dont 25,5% au cours de manipulations et de contentions d'animaux.

Enfin, les procédures de mesures peuvent entraîner du stress chez les animaux (Lagarrigue et Tixier-Boichard, 2011), ce qui peut influencer leurs réactions et potentiellement biaiser les résultats des mesures phénotypiques, en plus d'augmenter les risques de blessures des animaux et des manipulateurs.

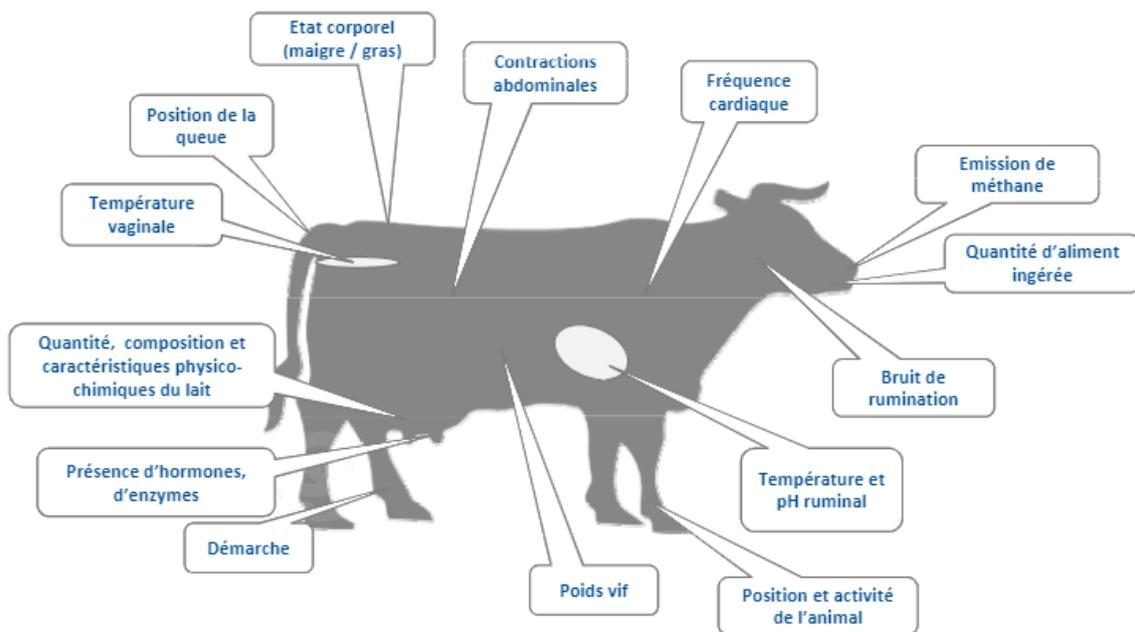


Figure 3 : Exemple de mesures permises par l'élevage de précision (Allain et al., 2012)

Ces mesures peuvent donc constituer un frein à la sélection génétique efficace d'animaux robustes et efficaces et à la conduite d'élevage optimisée. Afin de faire face à ces limites, des approches se sont développées pour améliorer le suivi phénotypique des animaux.

1.3. L'élevage de précision pour améliorer le suivi phénotypique des animaux

1.3.1. Principe de l'élevage de précision

L'élevage de précision est un concept qui fait référence à l'utilisation de technologies telles que des capteurs, des dispositifs de surveillance, des outils de collecte de données et des algorithmes d'analyse, dans le but d'améliorer le suivi et la gestion des troupeaux (Eastwood *et al.*, 2004, cités par Bewley, 2010). L'élevage de précision vise ainsi à optimiser la gestion des ressources et à améliorer les performances des animaux en prenant des décisions basées sur les données collectées d'alimentation, de santé, de reproduction, de comportement et de l'environnement des animaux (Bewley, 2010).

L'élevage de précision s'est développé en parallèle du phénotypage à haut débit. Cette approche consiste à obtenir un grand nombre d'informations sur les performances et la morphologie des animaux, grâce à la « détermination de phénotypes mesurables de façon répétable, automatisable et rapide, de sorte que le processus génère un grand nombre de données » (Hocquette *et al.*, 2011), dans l'objectif de suivre l'évolution des animaux et leur adaptation aux variations de leur environnement.

1.3.2. Des outils permettant le phénotypage à haut débit

Le développement de l'élevage de précision a été favorisé par les avancées technologiques dans les domaines tels que l'informatique, les capteurs, l'internet des objets (IoT) et l'intelligence artificielle (IA). Ces outils permettent de mesurer un grand nombre de données sur la santé, le bien-être et les performances des animaux, nécessaires au phénotypage à haut débit (Figure 3).

Parmi ces outils, l'identification électronique Radio-Frequency IDentification, aussi appelée RFID, a permis de suivre, dès le début de l'élevage de précision, chaque animal. Il s'agit d'une puce électronique liée à un numéro unique et une antenne qui permettent la communication sans fil par ondes radio avec un lecteur (Chastand-Maillard et Saint-Dizier, 2016). L'identification électronique est souvent couplée avec d'autres technologies présentes sur l'exploitation telles que les bascules de pesée, la salle de traite ou un parc de tri afin d'automatiser certaines opérations, mais également de relier les mesures réalisées par un capteur à un animal précis pour faciliter la collecte de données (Idele, 2010).

De nombreux capteurs se sont également développés ces dernières années afin de surveiller en temps réel des paramètres tels que l'activité, la fréquence cardiaque ou les mouvements des animaux. C'est le cas des capteurs accéléromètres, qui peuvent se fixer à la queue, aux pattes ou au cou de l'animal et mesurent une variation de vitesse (Halachmi *et al.*, 2019).

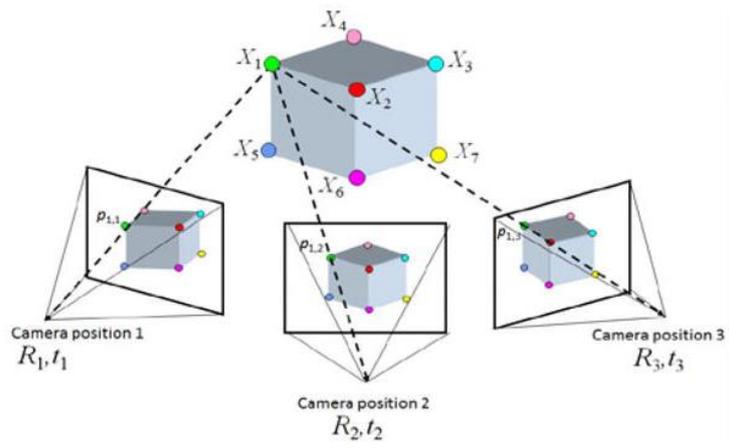


Figure 4 : Principe de stéréovision (Valerga et al., 2020)

Des capteurs *in vivo* peuvent également être utilisés afin de suivre le pH dans le rumen ou la température corporelle, et faciliter la détection précoce de vèlages ou de maladies (Hostiou *et al.*, 2014, Floch et Ben Trad, 2017). Des systèmes de surveillance vidéo par caméra peuvent aussi être utilisés pour observer le comportement des animaux, leur alimentation ou encore leur interaction sociale, permettant ainsi de détecter une mise-bas, des signes de stress ou de maladie, ou d'identifier les problèmes de logement et mettre en place des mesures d'amélioration.

L'utilisation de l'imagerie à des fins de phénotypage s'est également largement développée depuis une vingtaine d'années (Wurtz *et al.*, 2019). Bon marché et facilement disponibles, les caméras offrent la possibilité d'acquérir un grand nombre de données de façon automatique. Initialement, des images en deux dimensions (2D) ont été utilisées chez les bovins pour des mesures telles que le poids (Arias Hernandez *et al.*, 2004), la NEC (Leroy *et al.*, 2005), ou encore la taille des trayons des vaches laitières (Zwertvaegher *et al.*, 2010). La combinaison d'images 2D avec des techniques d'intelligence artificielle a également permis de déterminer des mesures phénotypiques telles que la NEC (Yukun *et al.*, 2019), le comportement (Qiao *et al.*, 2022) ou encore les boiteries (Zheng *et al.*, 2023) chez les bovins. Cependant l'imagerie 2D ne prend pas en compte la profondeur, ce qui rend difficile les mesures telles que l'état corporel ou le tour de poitrine. De plus, l'image obtenue peut être influencée par des facteurs tels que l'angle de prise de vue, l'éclairage ou la distance appareil-objet, ce qui peut créer des distorsions et introduire des erreurs dans les mesures.

Palliant les contraintes de l'imagerie 2D, grâce au développement de nouvelles techniques d'imagerie, l'utilisation d'images 3D pour le phénotypage des animaux a progressivement pris une place de plus en plus grande.

1.4. L'imagerie 3D : un outil de phénotypage non-invasif

1.4.1. Principe de l'imagerie 3D

L'imagerie 3D, ou tridimensionnelle, capture des données sur la forme ainsi que la profondeur. Pour obtenir une image 3D, différentes étapes sont nécessaires.

1.4.1.1. Acquisition de données pour créer l'image 3D

Différentes techniques peuvent être utilisées pour obtenir des informations permettant de créer une image 3D. Dans les dispositifs développés en élevage, la photogrammétrie et la lasergrammétrie sont les principales méthodes employées.

La photogrammétrie repose sur le principe de stéréovision (Figure 4), qui consiste à utiliser au moins deux caméras positionnées légèrement différemment pour capturer le même objet (Maumont, 2010). L'identification de points communs entre les images permet de reconstruire l'animal en 3D. Les capteurs utilisés sont des caméras numériques qui capturent des images bidimensionnelles grâce à un capteur d'image convertissant la lumière en données numériques (Wurtz *et al.*, 2019).

Tableau 2 : Avantages et inconvénients des dispositifs d'acquisition des données nécessaires à la construction d'une image 3D d'un animal

Type de capteur	Avantages	Inconvénients
Stéréovision (caméra 2D) (Maumont, 2010 ; Yang <i>et al.</i> , 2022)	<ul style="list-style-type: none"> - Coût peu élevé des capteurs - Facile à mettre en place 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficulté de capture des détails fins - Très sensible aux conditions d'éclairage - Temps de calcul pour la reconstruction important - Nécessite des images de bonne qualité (haute résolution) et un grand nombre d'image pour une bonne précision
Temps de vol (Salau <i>et al.</i> , 2014 ; Gardenier <i>et al.</i> , 2018)	<ul style="list-style-type: none"> - Mesure des détails fins et des structures complexes - Précision élevée - Rapidité de calcul pour la reconstruction 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensible aux surfaces réfléchissantes et transparentes - Nécessite de balayer l'objet pour une image complète - Temps d'acquisition des données plus long
Triangulation (Viazzi <i>et al.</i> , 2014 ; Kuzuhara <i>et al.</i> , 2015 ; Le Cozler <i>et al.</i> , 2019a et b)	<ul style="list-style-type: none"> - Coût peu élevé des capteurs - Bonne précision - Rapidité de calcul pour la reconstruction 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensible aux surfaces réfléchissantes et transparentes (systèmes laser) - Requiert une calibration très précise - Nécessite de balayer l'objet pour une image complète lorsque la lumière émise est un laser

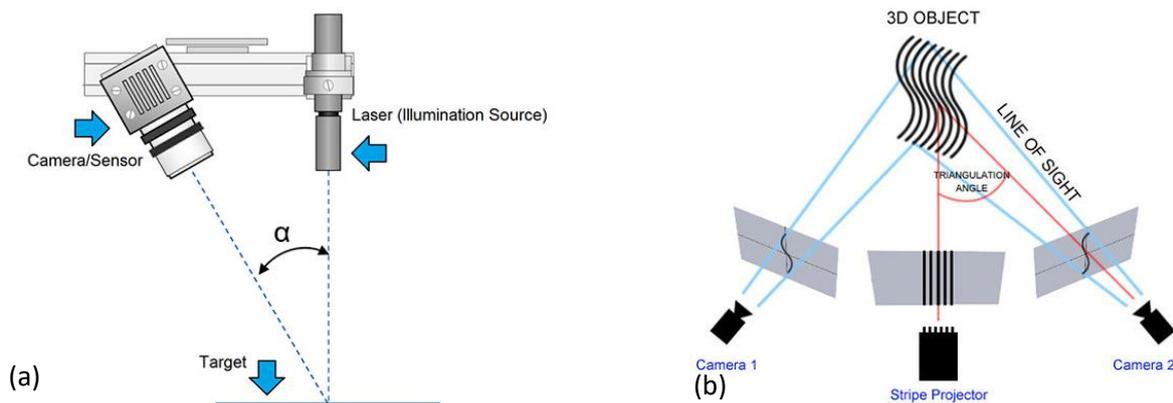


Figure 5: Principe de triangulation avec une émission laser (a) ou une émission de lumière structurée (b) (3Dnatives, 2019)

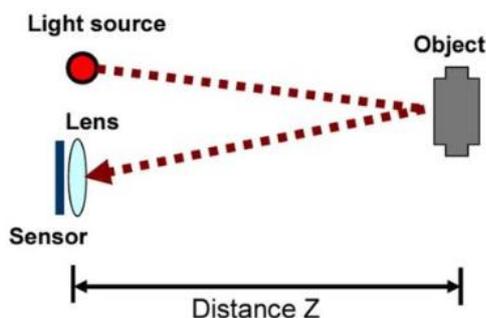


Figure 6: Principe de temps de vol (Bamji *et al.*, 2015)

Comme présenté dans le Tableau 2, le coût des caméras est relativement faible, mais la précision de ces systèmes nécessite un grand nombre d'images de bonne qualité, et un environnement avec une luminosité stable (Yang *et al.*, 2022).

La lasergrammétrie utilise un faisceau laser ou une lumière infrarouge (IR) pour balayer la surface d'un objet et capturer les informations de distance (Maumont, 2010). Différents types de capteurs permettent l'acquisition d'images par lasergrammétrie :

- Les capteurs basés sur la triangulation (Figure 5) fonctionnent en projetant une source de lumière sur l'animal, soit un faisceau laser (Le Cozler *et al.*, 2019a) ou de la lumière structurée comme avec les caméras Asus Xtion Pro (Kuzuhara *et al.*, 2015) ou Microsoft Kinect-v1 (Viazzi *et al.*, 2014). Ils calculent ensuite la distance entre le capteur et chaque point de l'objet en se basant sur l'angle de déviation de la lumière réfléchi.
- Les capteurs à temps de vol (Figure 6) telles que les caméras Swiss Ranger SR- 4000 (Salau *et al.*, 2014) ou Microsoft Kinect-v2 (Gardenier *et al.*, 2018) émettent un faisceau lumineux, souvent infra-rouge et détectent le temps nécessaire à son retour à la caméra. La position des points de l'objet est ainsi calculée grâce à la vitesse de la lumière.

Les systèmes utilisant la lasergrammétrie offrent une bonne rapidité d'acquisition de données et sont faciles à mettre en place. La précision dépend toutefois des caractéristiques du capteur utilisé et de sa calibration (Tableau 2).

D'autres techniques existent, telles que la tomographie, qui utilise des rayons X ou ultrasons pour reconstituer l'intérieur d'un organisme vivant ; ou encore la radargrammétrie qui utilise des ondes radar pour mesurer la distance entre l'appareil et l'objet. Cependant, leur présence en élevage est limitée du fait des contraintes liées à leur utilisation.

1.4.1.2. Traitement des données acquises

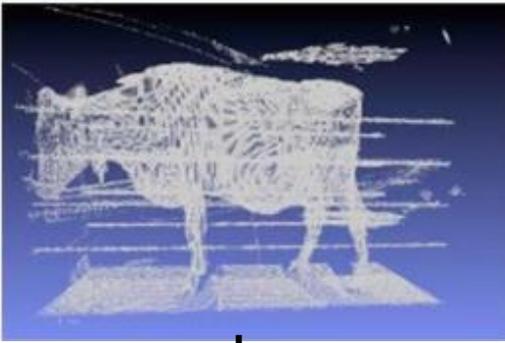
Les données brutes collectées nécessitent un traitement avant de passer à l'étape suivante afin d'améliorer leur qualité, leur précision et leur fiabilité (MathWorks, 2023). La calibration consiste à faire correspondre des coordonnées spatiales d'un point 3D avec les coordonnées 2D de ce même point dans l'image prise par la caméra (Orteu, 2007). Elle permet de corriger des paramètres tels que la distorsion optique, qui peut causer des déformations de l'image, et déterminer la position et l'orientation des capteurs ainsi que leur mise à l'échelle.

Il y a également le nettoyage du bruit. Les données peuvent être sensibles au « bruit » causé par des facteurs tels que l'éclairage ambiant, les artefacts de capture ou les imperfections du capteur. Éliminer le bruit permet de réduire les anomalies et les irrégularités indésirables.

Le système de capture des données peut induire des distorsions géométriques. Une correction de la distorsion, suite à la calibration des capteurs à l'aide d'une mire, permet ainsi d'obtenir une représentation plus précise de l'animal (Orteu, 2007).

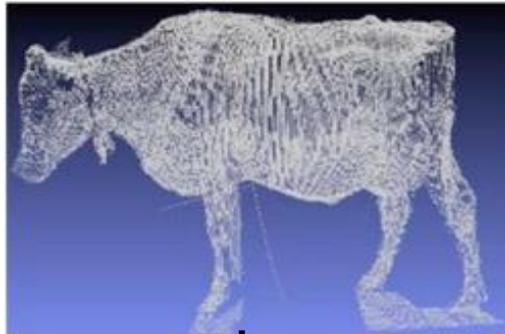


① Acquisition des données

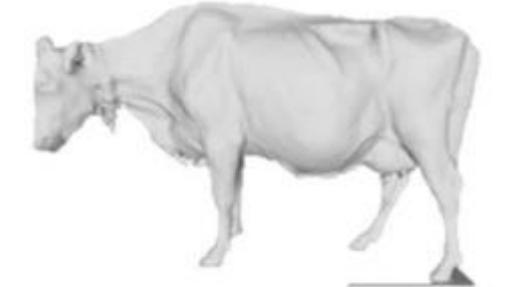


② Traitement des données

Alignement des points



Nettoyage du bruit



③ Reconstruction de la surface

Figure 7 : Etapes de reconstruction d'une image 3D : exemple du dispositif Morpho3D (adapté de Le Cozler et al., 2019a)

Enfin, l'alignement est une étape indispensable lorsque l'image 3D est issue de la fusion de différentes images ou nuages de points (Bartoli, 2003). Il s'agit de faire correspondre des points de référence communs ou des droites entre les images pour les aligner correctement grâce à un algorithme.

1.4.1.3. Reconstruction de la surface de l'animal en 3D

Les données brutes contiennent des informations sur la position spatiale des points de la surface de l'objet. Ces points sont utilisés pour créer une structure discrète (nuage de points), où chaque point représente un échantillon de la surface de l'objet. Une fois la structure discrète créée, différentes techniques peuvent être utilisées pour reconstruire la surface telles que la triangulation de Delaunay (Agarwal *et al.*, 2005) ou la reconstruction de Poisson (Kazhdan *et al.*, 2006). De manière générale cette étape consiste à créer un maillage également appelé « mesh », en connectant les points entre eux par des arêtes pour former des triangles, des quadrilatères ou autres polygones. Une fois la surface reconstruite, elle peut être lissée ou affinée pour obtenir une représentation plus précise de l'objet. La Figure 7 récapitule l'ensemble du processus de reconstruction d'une image 3D.

1.4.2. Validation des systèmes d'imagerie 3D

Selon la norme ISO 5725 (ISO, 1994) il est nécessaire d'évaluer la justesse et la fidélité des mesures obtenues à partir des systèmes d'imagerie 3D pour décrire leur exactitude.

La justesse fait référence à la capacité d'un système de mesure à fournir des résultats cohérents et proches de la valeur réelle ou acceptée selon la norme ISO 3534-2 (ISO, 2006). Pour la déterminer, il convient de disposer de valeurs de référence, ou « gold standard » obtenues grâce à une méthode reconnue et validée. Ainsi, il peut s'agir de mesures obtenues à l'aide d'une toise ou d'un barymètre pour les mensurations, d'une balance pour le poids vif, ou encore d'un pointeur expérimenté pour les notes de NEC ou de pointage. La justesse se détermine alors par comparaison de la moyenne d'un grand nombre de mesures avec la valeur du « gold standard ».

La fidélité quant à elle indique la capacité d'un système de mesure à produire des résultats cohérents et reproductibles lorsqu'il est utilisé de manière répétée, indépendamment de la valeur réelle ou admise (ISO, 2006). Afin de déterminer la fidélité d'un dispositif, des tests de répétabilité et de reproductibilité peuvent être effectués :

- La répétabilité permet de déterminer la variabilité des mesures obtenues lorsqu'elles sont répétées sur un même individu ou un même échantillon, dans des conditions similaires (ISO, 2006). Elle évalue la cohérence des mesures effectuées par un opérateur ou un système de mesure spécifique. Une bonne répétabilité indique que les mesures obtenues sont stables et peu sujettes à des variations aléatoires, c'est à dire justes.

Tableau 3 : Les principaux systèmes d'imagerie 3D développés en élevage bovin

Article	Technologie	Capteurs utilisés	Application principale			
			NEC	Poids vif	Morphologie	Boîtes
Abdul Jabbar <i>et al.</i> , 2017	Triangulation par lumière structurée	Asus Xtion PRO				X
Anglart, 2010	Temps de vol	Swiss Ranger™ SR-4000	X	X		
Fisher <i>et al.</i> , 2015	Triangulation par lumière structurée	Asus Xtion PRO	X			
Gardenier <i>et al.</i> , 2018	Temps de vol	Microsoft Kinect-v2				X
Hansen <i>et al.</i> , 2018	Triangulation par lumière structurée	Type Kinect	X	X		X
Huang <i>et al.</i> , 2018	Temps de vol	LIDAR			X	
Kuzuhara <i>et al.</i> , 2015	Triangulation par lumière structurée	Asus Xtion Pro	X	X		
Le Cozler <i>et al.</i> , 2019a	Triangulation par laser	5 couples caméra-laser			X	
Le Cozler <i>et al.</i> , 2019b	Triangulation par laser	5 couples caméra-laser		X	X	
Martins <i>et al.</i> , 2020	Temps de vol	Microsoft Kinect-v2	X	X	X	
Mullins <i>et al.</i> , 2019	Temps de vol	DeLaval Body Condition scoring	X			
Ruchay <i>et al.</i> , 2020	Temps de vol	Microsoft Kinect-v2		X	X	
Salau <i>et al.</i> , 2014	Temps de vol	Swiss Ranger™ SR-4000	X			
Salau <i>et al.</i> , 2017	Triangulation par lumière structurée	Microsoft Kinect-v1			X	
Schlageter-Tello <i>et al.</i> , 2018	Triangulation par lumière structurée	Microsoft Kinect-v1				X
Song <i>et al.</i> , 2018	Temps de vol	Microsoft Kinect-v2		X		
Spoliansky <i>et al.</i> , 2016	Triangulation par lumière structurée	Microsoft Kinect-v1	X			
Van Hertem <i>et al.</i> , 2014	Triangulation par lumière structurée	Microsoft Kinect-v1				X
Viazzi <i>et al.</i> , 2014	Triangulation par lumière structurée	Microsoft Kinect-v1				X
Yang <i>et al.</i> , 2022	Photogrammétrie	Huawei P20 mobile phone			X	

- La reproductibilité permet quant à elle de déterminer la variabilité des mesures entre différents opérateurs, différents instruments ou différents laboratoires, en évaluant la capacité des mesures à être reproduites et comparées dans différents contextes (ISO, 2006). Une bonne reproductibilité signifie que les mesures sont cohérentes et comparables, même lorsque différentes personnes ou équipements les effectuent, c'est-à-dire fidèles.

1.4.3. Divers systèmes développés pour le phénotypage des bovins

L'imagerie 3D pour le phénotypage des bovins s'est largement développée ces dernières années, en utilisant diverses technologies disponibles (Tableau 3). De nombreuses études montrent le potentiel des images 3D pour déterminer la NEC (Anglart, 2010 ; Fisher *et al.*, 2015 ; Hansen *et al.*, 2018 ; Mullins *et al.*, 2019 et Spoliansky *et al.*, 2016) et le poids vif (Anglart, 2010 ; Hansen *et al.*, 2018 ; Song *et al.*, 2018 ; Le Cozler *et al.*, 2019b et Yang *et al.*, 2022), mais aussi d'autres traits morphologiques tels que la hauteur au garrot, la profondeur de poitrine (Le Cozler *et al.*, 2019a ; Ruchay *et al.*, 2019) et même le volume ou la surface des bovins (Le Cozler *et al.*, 2019b). De même, les systèmes d'imagerie peuvent être utilisés pour le bien-être animal, en détectant des boiteries (Abdul Jabbar *et al.*, 2017 ; Gardenier *et al.*, 2018 ; Hansen *et al.*, 2018 ; Schlageter-Tello *et al.*, 2018 ; Van Hertem *et al.*, 2014 ; Viazzi *et al.*, 2014). L'intérêt majeur de ces mesures régulières réside dans la possibilité de suivre de manière précise l'évolution des bovins au fil du temps. Elles permettent notamment d'évaluer le développement squelettique des jeunes bovins, de détecter les variations d'état corporel et de poids vif, ainsi que d'explorer les relations entre le volume mesuré et la capacité d'ingestion des animaux.

Les systèmes d'imagerie 3D en bovins sont aujourd'hui principalement utilisés dans le domaine de la recherche et ne sont pas encore commercialisés. Toutefois, la société DeLaval a commercialisé un dispositif d'estimation de la NEC des vaches laitières (DeLaval, 2023). De même, un dispositif développé par l'Institut de l'élevage (Idele) pour le pointage des jeunes bovins allaitants dans les exploitations est en cours de développement (Idele, 2022). Ce dispositif permet ainsi de réaliser des mesures telles que la hauteur au garrot, la largeur des hanches et la longueur du dos ainsi que de faire des prédictions concernant le poids, dans l'objectif d'améliorer le pointage des bovins allaitants.

1.4.4. Les systèmes développés à l'INRAE de Bretagne-Normandie

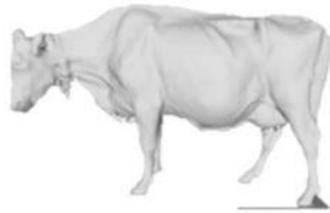
Morpho 3D

Les chercheurs de l'UMR PEGASE, basée à Saint Gilles (35), ont développé un système d'imagerie 3D, Morpho3D, en collaboration avec l'Institut de l'élevage et l'entreprise 3D Ouest. Ce dispositif est installé à l'IEPL de Méjusseume, à Le Rheu (35). Morpho3D se base sur le principe de triangulation par émission laser grâce à 5 couples caméra-laser installés sur un portique monté sur rails.

Dispositif Morpho3D



©Le Cozler Y.



Avantages :

- Images 3D de très bonne qualité
- Bonne précision des mesures

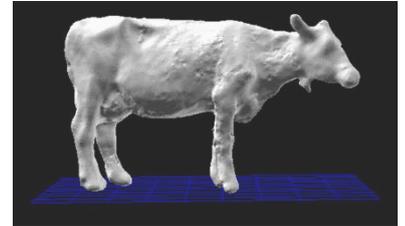
Limites :

- Temps d'acquisition de 5 secondes nécessitant un animal parfaitement immobile
- Sensible à la lumière directe

Dispositif Deffilait3D



©Tiercin A.



Avantages :

- Acquisition instantanée (« One shot »)
- Moins sensible à la lumière directe

Limites :

- Images de qualité réduite par rapport à Morpho3D
- Variation de certaines mesures pour un même animal

Figure 8 : Comparaison des dispositifs Morpho3D et Deffilait3D

Tableau 4: Coefficients de variation et erreurs de répétabilité et de reproductibilité des mesures morphologiques issues du dispositif Deffilait3D (adapté de Dumesny, 2021).

Mesure	Coefficient de variation (%)		Erreur	
	Répétabilité	Reproductibilité	Répétabilité	Reproductibilité
Volume total (L)	1,18	2,21	8,71	21,14
Surface partielle (m ²)	1,77	3,26	0,130	0,230
Largeur aux hanches (m)	0,48	1,12	0,003	0,006
Hauteur au garrot (m)	1,29	1,78	0,019	0,026
Profondeur de poitrine (m)	0,81	1,42	0,006	0,012
Tour de poitrine (m)	0,46	2,16	0,012	0,047
Largeur aux fesses (m)	1,34	1,83	0,007	0,010
Longueur diagonale (m)	0,76	2,55	0,013	0,045
Tour d'abdomen (m)	0,46	1,8	0,012	0,047

Ce dernier se déplace à 0,5m/s pour effectuer un scan complet de l'animal (Figure 8), ce qui correspond à une acquisition moyenne de 2000 images par vache (Le Cozler *et al.*, 2019a et Le Cozler *et al.*, 2019b). Une porte autobloquante peut maintenir les animaux immobiles si besoin. L'utilisation de Morpho3D nécessite un animal parfaitement immobile, bloqué au niveau du cou si besoin le temps de l'acquisition des données (5 secondes). Ensuite il faut 2 minutes pour obtenir le nuage de point reconstruit automatiquement afin de vérifier la qualité des données avant d'effectuer un nouveau scan.

Des tests de reproductibilité et de répétabilité ainsi que la comparaison entre les mesures issues des images 3D et les mesures manuelles ont été réalisés pour valider ce dispositif (Le Cozler *et al.*, 2019b). Avec des coefficients de variation inférieur à 4%, seuil de référence utilisée pour valider le dispositif (Fisher *et al.*, 2015), Morpho3D a été validé et utilisé pour un certain nombre de mesures telles que la hauteur au garrot, la profondeur de poitrine, le tour de poitrine (Le Cozler *et al.*, 2019a) mais aussi le poids, la surface et le volume d'un bovin adulte (Le Cozler *et al.*, 2019b) et en croissance (Le Cozler *et al.*, 2022). Il permet d'obtenir des images de très bonne qualité, mais l'utilisation de lasers le rend très sensible à la lumière directe.

Deffilait3D

La nécessité d'avoir un animal immobile due au temps d'acquisition des images, ainsi que les interférences lumineuses pouvant altérer les images acquises par Morpho3D ont engendré le développement d'un deuxième système, Deffilait3D, qui permet de réaliser l'acquisition de données instantanément (« one shot »). Il se base sur la stéréovision, grâce à 15 caméras de profondeur Intel® RealSense™ D415 qui se déclenchent instantanément pour donner une carte de profondeur de l'animal. Ce dispositif offre ainsi d'avantage de possibilités pour le phénotypage à haut débit tout en limitant le stress des animaux, grâce à sa rapidité d'acquisition, ce qui permet de ne pas bloquer les animaux et limiter leur manipulation (Figure 8). Il présente également l'avantage d'être moins sensible à la lumière directe

1.4.5. Problématique

Le dispositif expérimental d'acquisition d'images 3D Deffilait3D a été validé lors d'un précédent stage mené au sein de l'UMR PEGASE en 2021 (Dumesny, 2021). Une comparaison avec les mesures obtenues par le dispositif morpho 3D, ainsi que des tests de répétabilité, reproductibilité avec un coefficient de variation inférieur à 4% ont permis de valider le dispositif Deffilait3D (Tableau 4).

Tableau 5: Comparaison des mesures morphologiques issues des dispositifs Morpho3D et Deffilait3D (adapté de Dumesny, 2021)

Mesures	Morpho3D	Deffilait3D	Différence	Différence (%)
Volume total (L)	739,8	738,6	1,2	0,16
Surface partielle (m ²)	7,481	6,881	0,6	8,02
Largeur aux hanches (m)	0,578	0,565	0,0132	2,25
Hauteur au garrot (m)	1,540	1,459	0,0811	5,26
Profondeur de poitrine (m)	0,813	0,787	0,0252	3,20
Largeur aux fesses (m)	0,526	0,530	0,0037	0,76
Tour d'abdomen (mm)	2,580	2,587	0,0067	0,27

Toutefois, la comparaison entre les dispositifs Morpho3D et Deffilait3D (Tableau 5) a montré une différence importante de certaines mesures, notamment la surface partielle et la hauteur au garrot des vaches. Pour la surface partielle, la diminution de la qualité de reconstruction avec le dispositif Deffilait3D peut expliquer en partie la différence entre les mesures (Figure 8). Ces mesures ont été réalisées à la mise en place de Deffilait3D. Depuis, il y a eu une amélioration de la reconstruction, qui a permis d'obtenir une meilleure qualité des images, mais les mesures de surface et volume n'ont pas été refaites.

Pour le dispositif Morpho3D, l'animal est contenu par un cornadis ou une porte autobloquante, ce qui limite fortement ses mouvements, notamment de sa tête. Ce n'est pas le cas du dispositif Deffilait3D où l'animal peut bouger librement. Les vertèbres cervicales qui maintiennent la tête sont directement attachées au garrot. On peut donc supposer que le mouvement de celles-ci entraîne un changement dans la position du garrot, et donc une variation de hauteur pour un même animal. Wang *et al.* (2023), dans leur revue des différents systèmes d'imagerie 3D destinés au phénotypage des bovins, ont également relevé d'importantes plages de valeurs pour l'évaluation de la hauteur au garrot. Dans ces dispositifs, la position « standard » de l'animal pour effectuer différentes mesures n'est pas clairement définie. On peut aussi noter que pour un suivi des animaux, d'autres chercheurs sont confrontés à des problèmes similaires (Ling *et al.*, 2022 pour les porcs).

L'influence de la position des bovins sur les mesures morphologiques pourrait ainsi constituer un frein au phénotypage à haut débit avec la nécessité de maintenir les animaux dans une position spécifique, ce qui serait contraire aux objectifs d'automatisation des mesures pour réduire les manipulations des bovins qui présentent un coût en temps et en main d'œuvre, et engendrent des risques de blessures et un stress des animaux. C'est pourquoi se pose la question suivante :

Comment la posture d'un animal influence les mesures morphologiques dans un système de captation de données basé sur de l'imagerie 3D ?

Hypothèse 1 : La position de la tête influence les mesures morphologiques prises à l'avant d'un animal

Hypothèse 2 : La position de la tête n'a pas d'influence sur les mesures prises à l'arrière de l'animal.

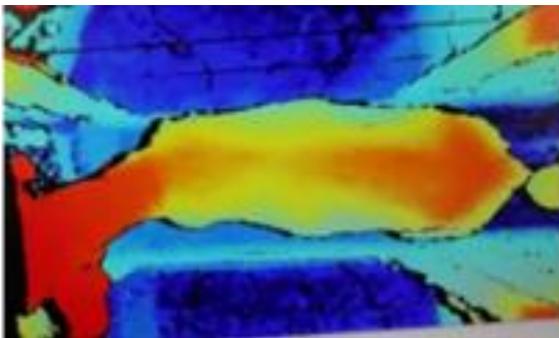
Hypothèse 3 : Il est possible de corriger les mesures en fonction de la position de la tête de l'animal

L'objectif de ce stage est dans un premier temps de déterminer l'influence de la position de la tête des vaches sur les mesures morphologiques, puis, dans un second temps, d'appliquer une correction des mesures selon cette position.



©Tiercin A.

Figure 9 : Le dispositif Deffilait3D



©Le Cozler Y.

Figure 10 : Carte de profondeur.

Le bleu indique une distance éloignée tandis que le rouge indique une distance proche du capteur.

2. Matériels et méthodes

Les études ont été réalisées au sein de l'Installation Expérimentale de Production du Lait (IEPL) INRAE de Méjusseau (Le Rheu, 35). Cette installation dispose d'un troupeau d'environ 180 vaches de race Holstein, produisant en moyenne 8500 kg de lait par vache laitière (VL) et par an. L'IEPL réalise des essais autour de l'alimentation et la conduite du troupeau laitier, et dispose d'outils permettant l'acquisition de données phénotypiques à haut débit. Un premier dispositif d'imagerie 3D a été développé par l'entreprise 3D Ouest, « Morpho3D », et validé. A la suite de ce premier prototype, un deuxième dispositif, « Deffilait3D » a été créé et validé, afin de s'affranchir des effets de la lumière directe et de mouvement des animaux (voir Le Cozler *et al.*, 2019a et b, pour plus de détails).

2.1. Le système d'imagerie en trois dimensions Deffilait3D

Le dispositif Deffilait3D, mis au point en 2019 en collaboration avec l'entreprise 3D Ouest (Lannion,22), est installé à l'IEPL depuis 2020. Il s'agit d'une structure métallique fixe comprenant 15 caméras reliées à 5 ordinateurs, eux-mêmes connectés à un terminal qui regroupe l'ensemble des données acquises (Figure 9). Ce dispositif est doté d'un couloir central formé de quatre rangées de câbles, permettant de guider les animaux et éviter les risques de contact entre les animaux et le dispositif. Le passage des animaux au centre du dispositif permet aussi de ne pas avoir une distance animal-caméra trop courte. Bien qu'il ne soit pas nécessaire d'immobiliser l'animal grâce à la capture d'images en instantané, deux portes métalliques situées à l'entrée et la sortie du couloir central permettent de le faire si besoin.

Le dispositif d'acquisition et de reconstruction des images en trois dimensions au cœur de Deffilait3D est basé sur le principe de stéréovision. Il est composé de quinze caméras de profondeur Intel® RealSense™ D415 (Intel Corporation), des capteurs Rouge-Vert-Bleu (RVB) équipés d'un projecteur infrarouge (IR) et de deux caméras espacées d'une courte distance, qui triangulent la profondeur (distance) (Intel RealSense, 2019). Le projecteur IR permet ensuite de trouver la correspondance entre les deux pixels, pour fournir les données sous forme de carte de profondeur, représentée à l'aide d'une image en fausses couleurs où les pixels bleus indiquent une distance éloignée, et les pixels rouges une distance proche des caméras (Figure 10). Le dispositif Deffilait3D est piloté à distance par connexion Bluetooth® à un ordinateur ou une tablette externe au dispositif. Une interface dédiée permet d'effectuer différentes actions, notamment déclencher le dispositif au moment voulu. L'acquisition des données se fait par le déclenchement simultané des quinze caméras disposées afin de capturer l'animal sous différents angles. L'ensemble des données est alors transmis au terminal du dispositif et peut être transféré à l'appareil de l'opérateur.

Les images enregistrées au format (.png) sont transmises à l'entreprise 3D Ouest, qui se charge de la reconstruction au sein de ses locaux. Il est prévu à terme que cette étape de transfert soit supprimée et que le logiciel de reconstruction soit installé « en local ».

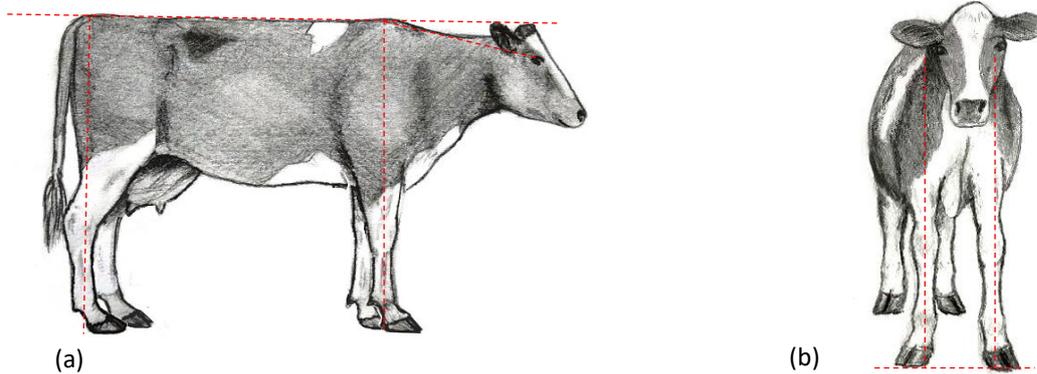
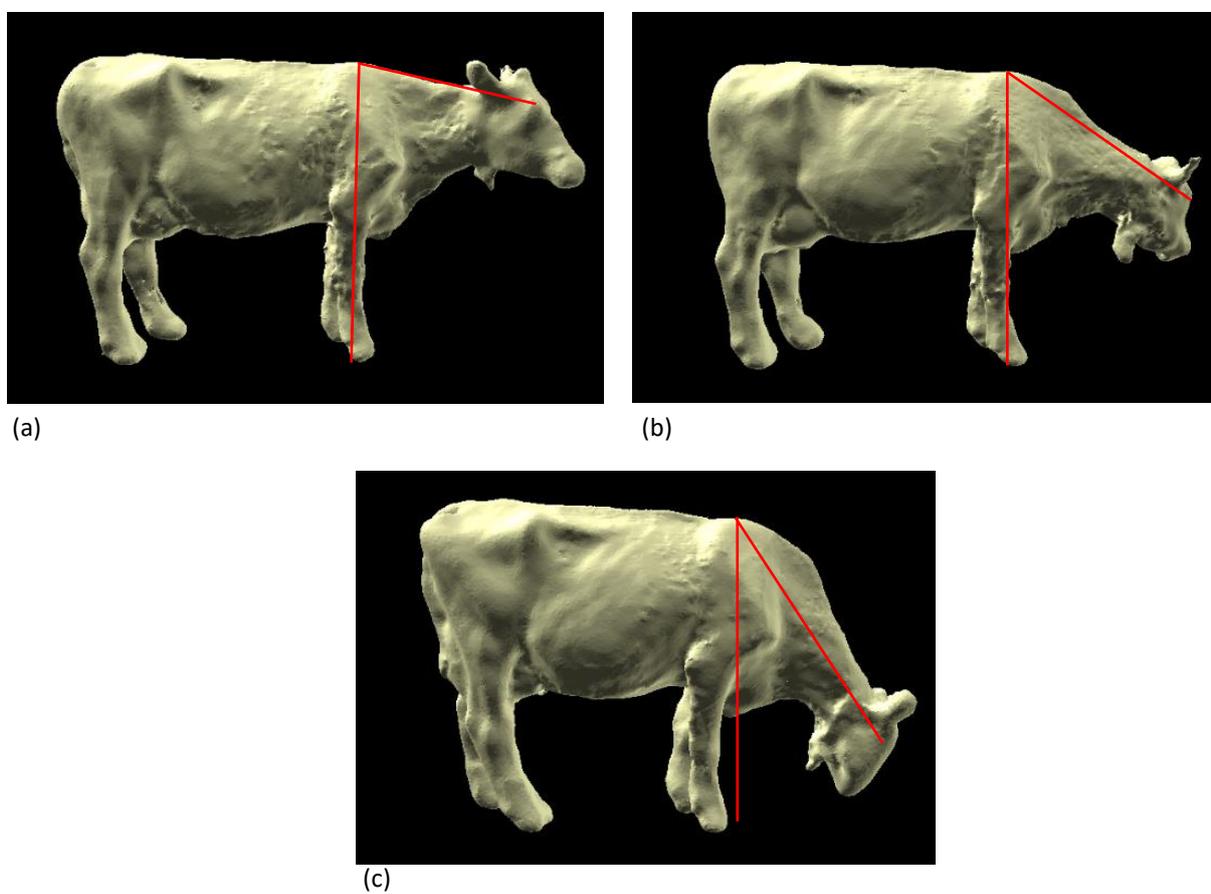


Figure 11 : Vache en position de référence P1 vue de profil (a) et de face (b) (©Tiercin A.).



*Figure 12 : Les positions sélectionnées pour le premier essai : P1 (a), P2 (b) et P3 (c)
Signification : En rouge, la position de la tête par rapport au garrot*

Le choix de transfert s'explique par le souhait des ingénieurs de 3D Ouest de poursuivre et d'améliorer le développement des algorithmes de reconstruction avant transfert définitif. Les images 3D reconstruites sous format (.obj) sont ensuite disponibles sous un serveur de partage de données.

Les mesures morphologiques sont effectuées grâce au logiciel Metrux2- α -8, qui correspond à la 4^{ème} version du logiciel Metrux2- α , également développé par 3D Ouest. Le logiciel dispose de différentes fonctionnalités permettant, par exemple, d'effacer des artefacts, de créer des plans de coupe, mais aussi de déterminer des longueurs, des surfaces et des volumes.

2.2. Essai 1 : utilisation d'un jeu de données déjà existant

2.2.1. Données sélectionnées

Une première analyse a été effectuée sur un jeu de données existant, l'objectif étant de visualiser l'influence de la tête d'une vache sur les valeurs mesurées de différents critères morphologiques (hauteur au garrot par exemple). Les données utilisées ont été acquises en avril 2021, grâce au dispositif Deffilait3D, dans le cadre d'un précédent stage qui avait permis de valider le dispositif (Dumesny, 2021). Huit vaches adultes de race Holstein ont été « scannées » à plusieurs reprises en effectuant cinq passages différents dans le dispositif. Ainsi, environ 25 images par vache étaient disponibles, avec des positions de la tête différentes entre les images. Celles-ci ont été triées et classées, selon différentes hauteurs de tête.

2.2.2. Positions testées

Parmi les images précédemment classées, trois positions de tête, présentes en nombre suffisant pour être utilisées, ont été définies. Quatre vaches (caractérisées en Annexe 1, d'après Dumesny, 2021), et deux images par position ont été conservées, soit un total de 24 images 3D. Ces positions sont :

- Une position de référence P1, définie d'après Heinrichs et Lammers (1986), qui ont défini que la mesure de la hauteur au garrot par toise s'effectue sur une vache qui se tient naturellement sur ses quatre pieds, la tête libre et à hauteur du dos (Figures 11a et 12a). Pour la position des pattes, Yang *et al.* (2022) ont défini la posture standard des pattes comme étant les deux antérieurs et deux postérieurs sur la même ligne (Figure 11a) et parallèles deux à deux (Figure 11b). Ainsi, la trace formée par les quatre pieds doit être un rectangle.

- Une position P2 correspondant à une vache tenant sa tête à mi-hauteur entre son dos et le sol (Figure 12b).

- Une position P3 indiquant que le mufler était au niveau du sol (Figure 12c).

Les images sur lesquelles la vache ne posait pas ses quatre pieds au sol ont été écartées pour réduire l'influence de la position des pattes sur les mesures.



(a)

(b)

(c)



(d)



(e)

Figure 13 : Acquisition des données pour chacune des positions à tester : (a) la position de référence P1, (b) la position P2, (c) la position P3, (d) la position P4 et (e) la position P5. (©Tiercin A.)
 Signification : En rouge, la position de la tête par rapport au garrot

2.3. Essai 2 : acquisition de nouvelles images

Les données disponibles pour l'essai 1 n'ayant pas été acquises dans l'objectif de tester l'influence de différentes positions, la variabilité de positions disponibles par vache était limitée, conduisant à un faible nombre de données exploitables (24 images). Une nouvelle acquisition de données spécifiques à cet essai a donc été réalisée.

2.3.1. Définition des positions testées

Différentes positions de tête ont été définies avant l'acquisition des données, à partir des analyses de l'essai 1. La position de référence P1 (tête au niveau de la ligne de dos et pattes alignées deux à deux) a été conservée. Deux nouvelles positions de tête ont été ajoutées, soit un total de cinq positions : P1 la position de référence ; P2 et P3 deux positions où la tête est à un niveau intermédiaire entre la ligne de dos et le sol ; P4 la tête au niveau du sol, et P5 la tête au-dessus de la ligne du dos (Figure 13). Pour chacune de ces positions, la posture des pattes est la même que pour P1.

2.3.2. Acquisition des images

Dix vaches laitières adultes ont été choisies au hasard et scannées avec le dispositif Deffilait3D. L'Annexe 1 détaille les principales caractéristiques de ces vaches. Chaque vache est passée une première fois dans le dispositif, sans marquer d'arrêt, afin de les habituer à ce nouvel environnement. Lors de ce passage, le dispositif Deffilait3D était activé (déclenchement des caméras par l'opérateur), permettant de générer un dossier par vache sur l'ordinateur, afin de trier les ultérieurement les images collectées.

Un deuxième passage a été effectué, en bloquant l'animal dans le dispositif. La première étape consistait à laisser la vache prendre une position naturelle, semblable à P1 (Figure 13a). Plusieurs séries d'images ont été prises par l'opérateur (1). Ensuite, à l'aide d'un seau rempli de granulés, un second opérateur (2) faisait varier la hauteur de la tête de l'animal, tandis qu'un troisième (3) contrôlait que la position prise par la vache était celle recherchée, puis indiquait à l'opérateur (1) de déclencher le dispositif (Figure 13 b à e). Cette organisation dans l'acquisition de l'ensemble des données a permis de limiter la présence de l'animal dans le dispositif afin d'éviter tout stress inutile et ne durait que quelques minutes par vache.

Au minimum, trois acquisitions par position et par vache ont été enregistrées. Chaque acquisition correspondait à l'enregistrement de 15 images, une par caméra, sous forme de cartes de profondeur, et entraînait la création d'un sous-dossier contenant ces images, précisant la date et l'heure d'acquisition. L'ensemble des données acquises a été transféré sur clé USB, puis transmis à 3D Ouest pour la reconstruction des images 3D.

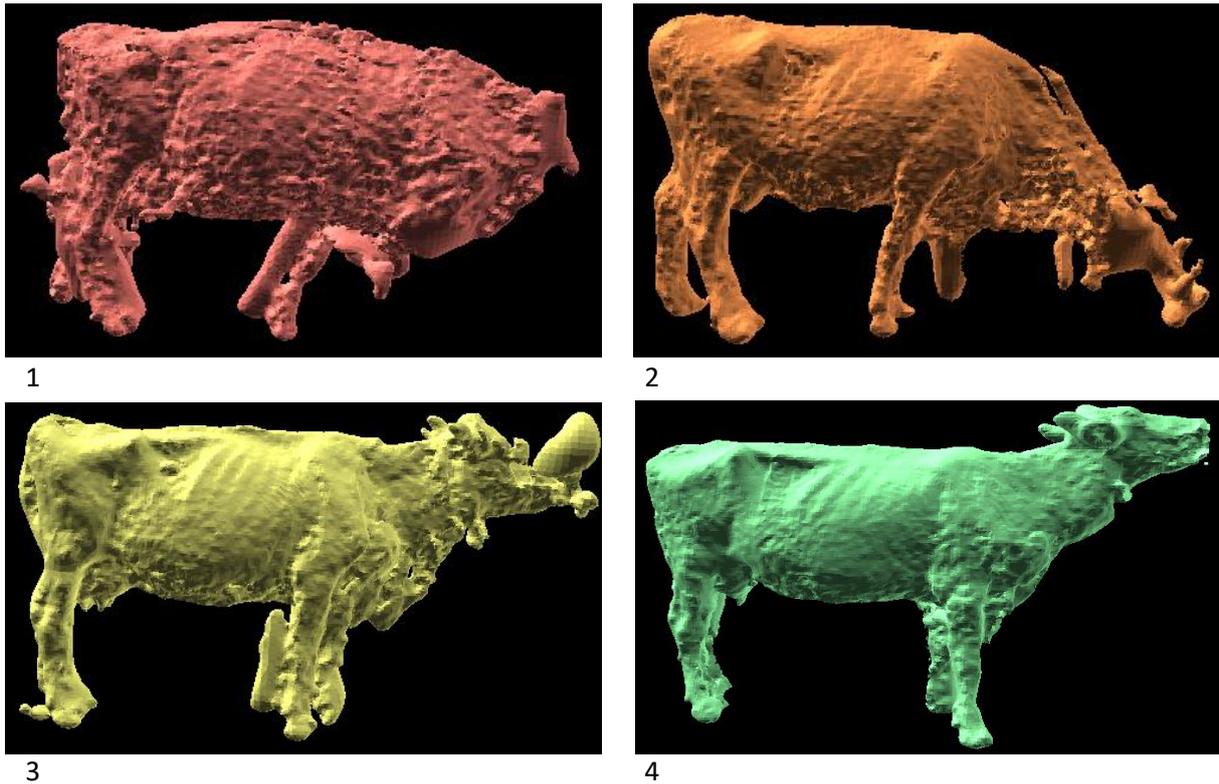


Figure 14 : Grille de notation de la qualité des images 3D adaptée pour l'essai 2 (de 1 à 4).

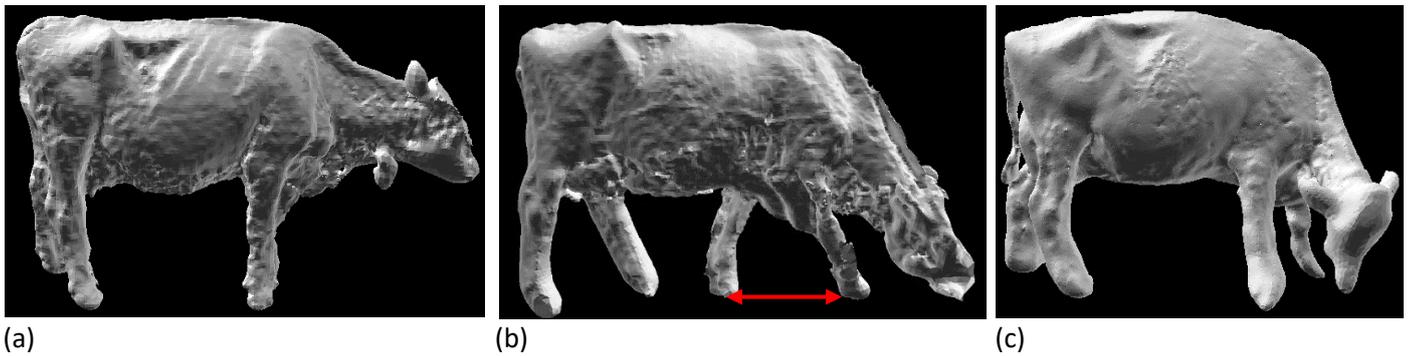


Figure 15 : Exemple de positions retenues (a) et écartées pour problème de pattes (b) ou de dos (c)

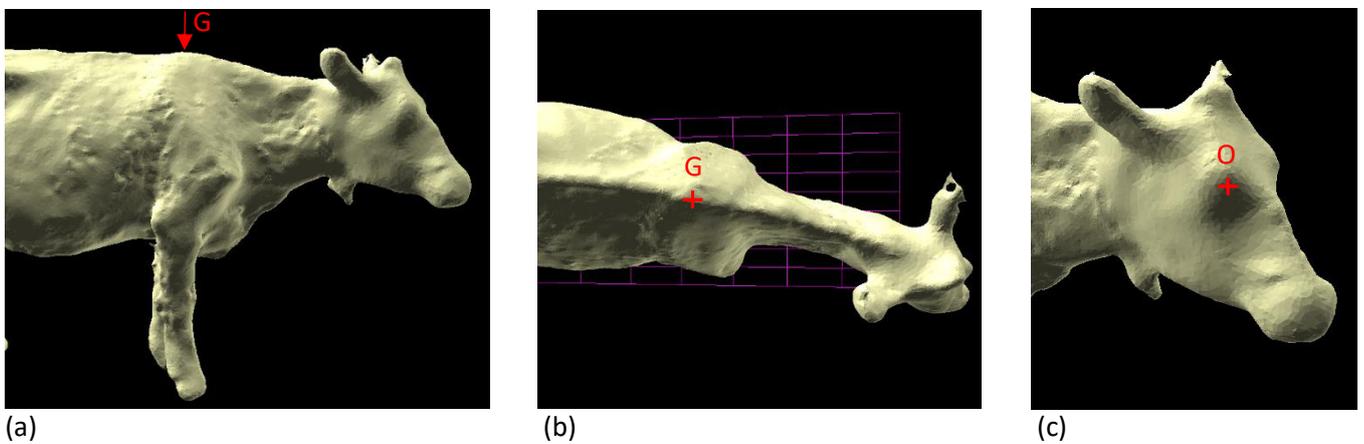


Figure 16 : Localisation des points fixes par vache : le garrot G vu de profil (a) et du dessus (b) et l'œil O (c)

2.3.3. Sélection des images 3D utilisées pour les mesures morphologiques

2.3.3.1. Qualité des images

La grille d'évaluation de la qualité des images 3D, issus des travaux réalisés avec le dispositif Morpho3D par Depuille (2018) a été utilisée. La notation initiale allant de 0 à 4 a par la suite été reprise en 8 points par Xavier (2019) et Dumesny (2021), permettant son utilisation sur les deux dispositifs Morpho3D et Deffilait3D. Toutefois, ces grilles ne prenaient que peu ou pas en compte la qualité de reconstruction de la tête, souvent absente avec les images issues de Morpho3D à cause de la barrière autobloquante, et inutile pour les mesures et objectifs réalisés jusqu'à présent avec le dispositif Deffilait3D. Cependant, pour déterminer la position de la tête des vaches, leur reconstruction, au moins partielle, s'est avérée nécessaire dans cet essai. C'est pourquoi une nouvelle grille de notation a été créée, prenant en compte cette fois-ci la tête, sur une échelle allant de 1 à 4 (Figure 14). La note 1 correspondait à des images de très mauvaise qualité, avec des vaches partiellement reconstruites, et n'ont donc pas été utilisées. Les notes 2, 3 et 4 correspondaient respectivement à des images de moyenne, bonne et très bonne qualité, permettant de réaliser les mesures pour cet essai.

2.3.3.2. Critères de position de l'animal

En plus du critère de qualité des images, la position globale des vaches a aussi été un critère de sélection des images 3D utilisées pour les analyses. Ainsi, pour évaluer uniquement l'effet de la tête et limiter d'éventuels biais liés aux pattes, les images où la posture des pattes était très éloignée de la position de référence ont été écartées (Figure 15). C'est pourquoi les images sur lesquelles la vache ne pose pas les quatre pieds au sol ou qu'au moins trois pattes ne sont pas placées correctement (posture campée par exemple) (Figure 15b), ainsi que celles sur lesquelles la ligne de dos présente une forte courbure (Figure 15c) n'ont pas été retenues.

2.4. Mesures réalisées sur les images 3D issues des deux essais

Les mesures, réalisées à l'aide du logiciel Metrux2- α -8, nécessitent de placer un plan horizontal au niveau des pieds de la vache. Le placement d'un plan ou d'un point doit être en contact direct avec l'objet 3D : aucun point ne peut être placé dans l'espace vide entourant l'animal.

2.4.1. Placement de plans et points fixes

La première étape consistait à créer un plan représentant le sol et applicable à toutes les images du même essai, comme décrit par Depuille (2018), Xavier (2019), Lebreton (2020) et Dumesny (2021). Pour chaque essai, une image de bonne qualité (notée 4) a été utilisée pour créer ce plan. Trois points ont été placés sous trois pieds de la vache, et l'alignement de la vache sur le plan créé a été vérifié avant de le valider. Ce plan a ensuite été sauvegardé et utilisé pour toutes les images issues du même essai.

Ensuite, pour chaque vache, deux points ont été placés et enregistrés, facilement localisables : le garrot, noté G, et l'œil, noté O (Figure 16).

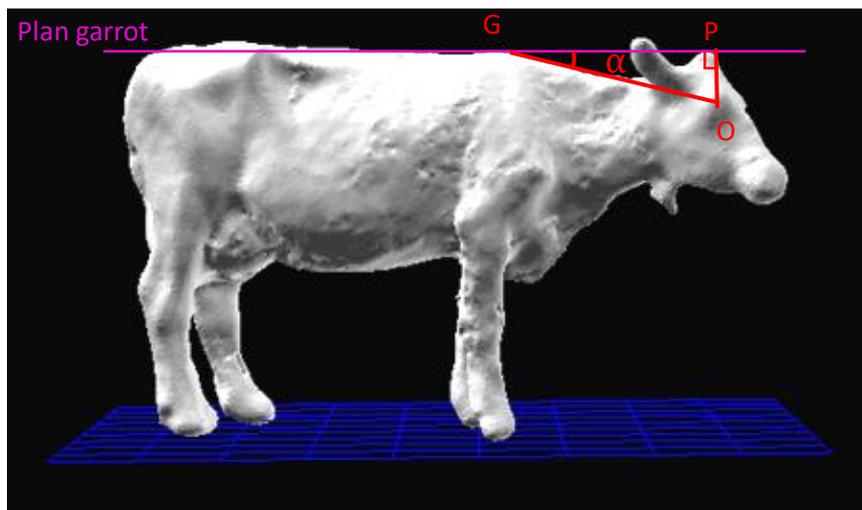
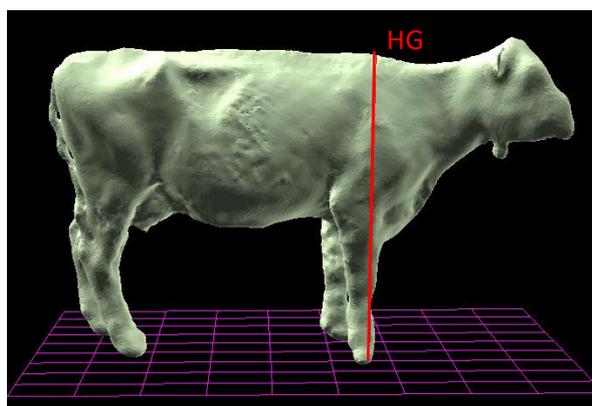


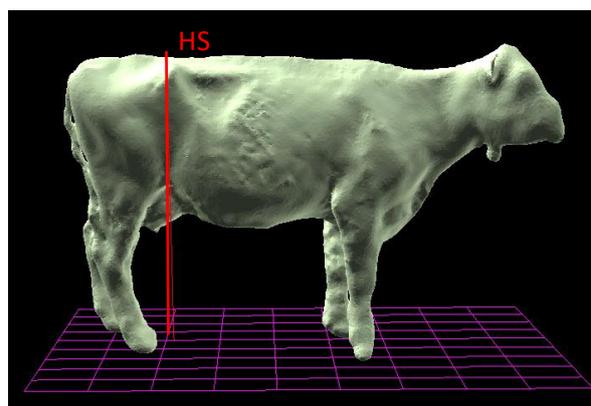
Figure 17 : Mesures effectuées pour déterminer l'angle de la tête
 Signification : G le garrot, O l'œil, P le point d'intersection entre le segment perpendiculaire au plan garrot passant par O et le plan garrot, α l'angle de la tête

Tableau 6 : Les classes d'angles permettant de caractériser les différentes positions de la tête.

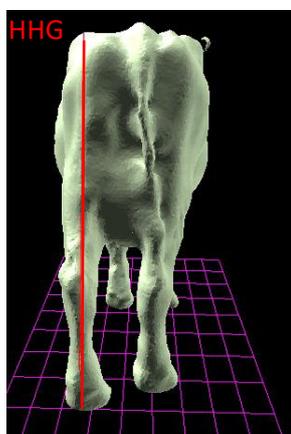
Position	P1	P2	P3	P4	P5
Classe d'angle (degré)	[0 ;15]	]15 ;30]	]30 ;45]	> 45	< 0



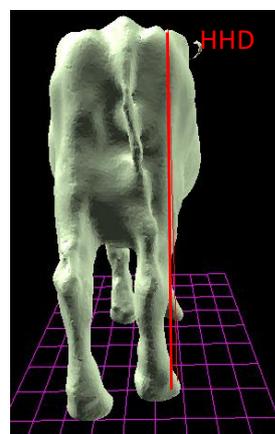
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 18 : Les mesures morphologiques réalisées sur les images 3D : HG (a), HS (b), HHG (c) et HHD (d)

Le placement du garrot correspond à l'arrondi situé au-dessus des épaules, à la jonction du dos et du cou de la vache (Figure 16a). L'arrondi de l'épaule visible en vue du dessus sur les images 3D constituait un repère pour placer le point (Figure 16b). Le point représentant l'œil était quant à lui placé grâce au relief qu'il forme sur la tête de l'animal (Figure 16c).

2.4.2. Calcul de l'angle formé par la tête selon les positions testées

La position de la tête de la vache a été définie selon l'angle formé par l'axe garrot-œil et un plan parallèle à celui représentant le sol, passant par le garrot (plan garrot) (Figure 17). La distance entre les points G et O a été mesurée, ainsi que la hauteur du point O par rapport au plan garrot (segment [OP] perpendiculaire au plan et passant par le point O sur la Figure 17). Cette opération a été nécessaire car Metrux2- α -8 ne permettait pas de réaliser directement cette mesure d'un angle. Le triangle GOP ainsi formé par les différents segments de mesure étant rectangle en P, la valeur de l'angle a ensuite été déterminée selon la formule suivante :

$$\sin(\widehat{PGO}) = \frac{PO}{GO}$$

où sin est le sinus de l'angle \widehat{PGO} . Ensuite la fonction « arc sinus » a été utilisée pour obtenir la valeur de l'angle α en radian, converti ensuite en degré par la relation suivante :

$$\text{angle (degré)} = \text{angle (radian)} \times \frac{180}{\pi}$$

La mesure de ces angles a permis de créer des classes d'angles de tête pour chaque position (Tableau 6). Ainsi, pour les positions P1 à P3, la plage de variation de l'angle α est de 15 degrés par classe, P4 correspond à un angle supérieur à 45 degrés, et P5 à un angle inférieur à 0 degré, c'est-à-dire que la tête est située au-dessus du plan garrot.

2.4.3. Mesures morphologiques

Les différentes mesures morphologiques réalisées correspondaient à la hauteur du point d'intérêt marqué sur l'animal par rapport au plan du sol (segment perpendiculaire au plan du sol passant par le point d'intérêt). La hauteur au garrot (HG) a été mesurée grâce au point G enregistré pour chaque vache (Figure 18a) afin d'utiliser le même point pour la mesure de la hauteur et de l'angle de la tête. La hauteur au sacrum (HS) a été prise sur la colonne vertébrale, au point situé entre les deux hanches (Figure 18b). Enfin, la hauteur aux hanches moyenne (HH) a été déterminée par la moyenne des mesures de hauteur de la hanche gauche (HHG) et de la hanche droite (HHD). Les mesures des hanches ont été réalisées en prenant le point le plus haut de la pointe de chaque hanche (Figure 18c).

Pour chaque vache, la moyenne des mesures en position de référence P1 (\bar{x}_{P1}) a été déterminée. Pour chacune des mesures de P2 à P5, l'écart par rapport à la position de référence, ou erreur relative (Δ) a été calculé et exprimé en pourcentage, d'après la formule suivante :

$$\Delta = \frac{\bar{x}_{P1} - \text{mesure}}{\bar{x}_{P1}} \times 100$$

La qualité des images obtenues lors de l'essai n'a pas permis de mesurer d'autres critères, tels que le tour de poitrine, la surface ou le volume. En effet, une des caméras inférieures du dispositif a bougé de son axe initial, entraînant un léger décalage des images 3D au niveau du bas du ventre et du haut des pattes (Annexe 2). Cette déformation sur les images n'était pas gênante pour les mesures de hauteur, mais plus problématique pour des mesures prenant en compte la forme de l'abdomen (volume et surface par exemple).

2.5. Correction de la hauteur au garrot

Trois méthodes de correction des mesures morphologiques ont été testées :

1. La prédiction de la hauteur au garrot à partir des mesures de l'arrière de l'animal : l'importance de la corrélation entre la hauteur au garrot (HG) et les mesures à l'arrière a été déterminée pour les deux essais, afin d'établir une équation de prédiction de HG en fonction de ces mesures, selon la formule :

$$HG_{\text{corrigée}} = a * \text{Mesure arrière} + b$$

avec $HG_{\text{corrigée}}$ en cm, a et b des coefficients et Mesure arrière = HH ou HS, en cm.

2. La correction des mesures en augmentant la hauteur au garrot mesurée ($HG_{\text{mesurée}}$) selon la position de la tête. Deux augmentations différentes (en %) ont été testées : l'application d'un pourcentage correspondant à ΔHG moyen par position, issue de l'essai 2, et l'application de pourcentages arrondis à l'unité. Ainsi, la hauteur au garrot corrigée ($HG_{\text{corrigée}}$) est obtenue de la façon suivante :

$$HG_{\text{corrigée}} = HG_{\text{mesurée}} + x\% * HG_{\text{mesurée}}$$

avec $HG_{\text{corrigée}}$ et $HG_{\text{mesurée}}$ en cm, x le pourcentage correspondant à la position de la tête de la vache.

3. La prédiction de la variation de la hauteur au garrot par rapport à la position de référence P1 (ΔHG) via un modèle de régression linéaire simple, défini pour prédire ΔHG ($\Delta HG_{\text{prédit}}$, en %), en fonction de l'angle α , selon l'équation suivante :

$$\Delta HG_{\text{prédit}} = a * \text{angle } \alpha + b$$

La hauteur au garrot corrigée a ensuite été déterminée de façon suivante :

$$HG_{\text{corrigée}} = HG_{\text{mesurée}} + \Delta HG_{\text{prédit}} * HG_{\text{mesurée}}$$

2.6. Démarche statistique

L'ensemble des traitements statistiques a été réalisé avec le logiciel R, version 4.2.2. (R project, 2022), et l'application de bureau Rstudio (R Studio, 2023). La librairie « dplyr » (Wickham *et al.*, 2022) a été utilisée pour organiser, regrouper et filtrer les données. Pour créer les graphiques, « ggplot2 » (Wickham, 2016) a été utilisé, et pour les organiser, « gridExtra » (Auguie, 2017) a été appliquée. Enfin pour les traitements statistiques, la librairie « stat » (R project, 2022) a permis de réaliser les régressions linéaires simples et calculer les coefficients de corrélation de Pearson ; « car » (Fox et Weisberg, 2019) a permis de réaliser les ANOVA ; et « multcomp » (Hothorn *et al.*, 2008) a permis de réaliser des comparaisons multiples.

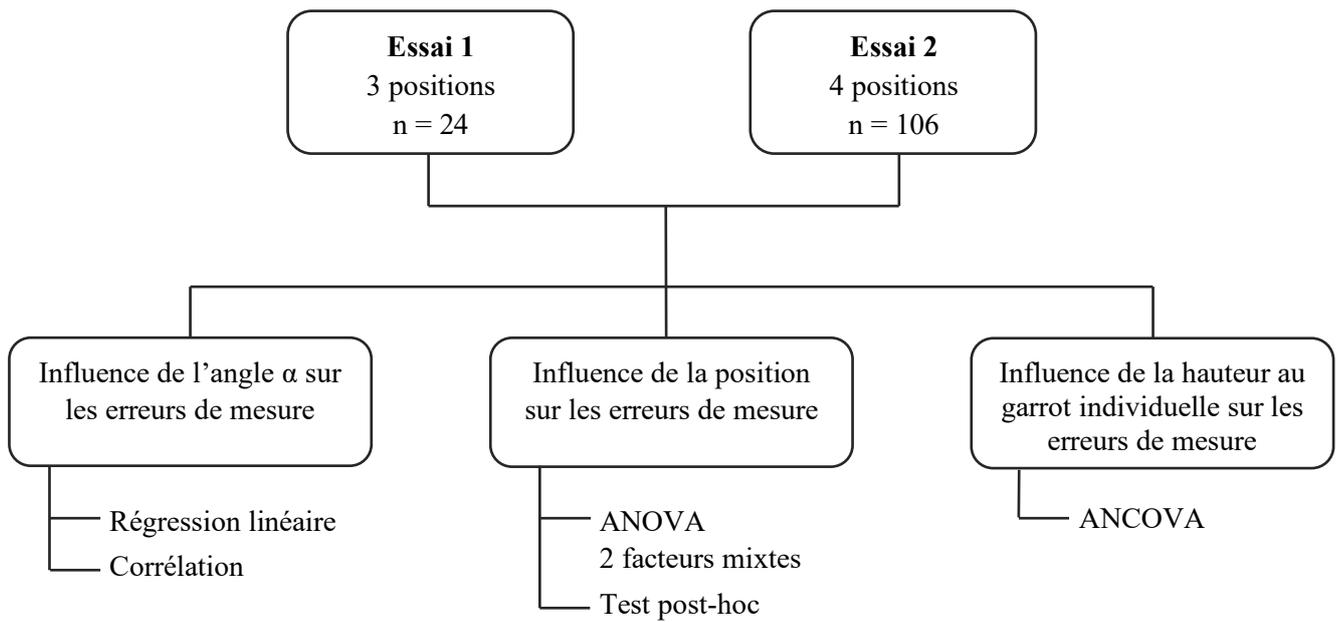


Figure 19 : Schéma récapitulatif des différentes démarches statistiques pour déterminer l'influence de la position sur les mesures morphologiques.

La position P5 était peu exploitable dans les images 3D du deuxième essai. En effet, la position n'étant pas très naturelle, cela a entraîné un mouvement fréquent des pattes des vaches, ne permettant pas de conserver les images pour cet essai. Elles ont donc été écartées des analyses.

2.6.1. Répétabilité des mesures morphologiques

Afin de déterminer la fidélité des mesures répétées sur un même animal, et déterminer la valeur de l'erreur systématique liée au pointage des zones morphologiques, la répétabilité a été évaluée, à partir des données collectées par Dumesny (2021). Huit vaches différentes de celles utilisées pour le premier essai ont été choisies. Une image de bonne qualité par vache a été sélectionnée, Les mesures HG, HS, HHG, HHD (afin d'obtenir HH), et l'angle α ont été déterminées cinq fois de façon successive sur la même image.

La reproductibilité a également été évaluée avec quatre autres vaches issues de ce même jeu de données (Dumesny, 2021), disposant toutes de cinq images différentes collectées le même jour. Les mesures HG, HS, HHG, HHD (afin d'obtenir HH) ont été réalisées une fois pour chaque image. L'angle α n'a pas été pris en compte car la position de tête variait fortement entre les images.

Déjà déterminées par Dumesny (2021) pour la hauteur au garrot, la répétabilité et la reproductibilité n'avaient pas été évaluées pour les mesures de hauteurs aux hanches et au sacrum, et l'angle de la tête pour le dispositif Deffilait3D.

Une analyse de variance (ANOVA) à un facteur (effet vache), a été réalisée pour chacune des mesures morphologiques. Les conditions d'application des ANOVA ont été vérifiées. L'écart-type résiduel σ_r a été calculé à partir des résultats des ANOVA correspondantes et indique l'erreur de répétabilité ou de reproductibilité. Le coefficient de variation CV (en %) a ensuite été calculé comme suit :

$$CV = \frac{\sigma_r}{\bar{x}} \times 100$$

où \bar{x} est la moyenne de la variable étudiée (mesure morphologique).

Une valeur seuil de 4% a été fixée pour déterminer si la mesure était répétable et reproductible, telle que définie par Fisher *et al.* (2015). De manière générale, plus le CV est faible et plus la répétabilité et/ou la reproductibilité est bonne.

2.6.2. Influence de la position sur les mesures morphologiques

Pour déterminer l'influence de la position de la tête sur les mesures morphologiques, les tests ont été effectués sur les données issues des essais 1 et 2 (Figure 19). Pour l'essai 1, les 24 images sélectionnées ont été utilisées. Pour l'essai 2, les images des dix vaches scannées au cours de l'essai ont été gardées. En fonction de la qualité des images 3D, certaines vaches disposaient de trois à quatre images par position, tandis que pour d'autres toutes les positions n'étaient pas disponibles. Ainsi, 106 images ont été utilisées.

Influence de l'angle α sur les mesures morphologiques

Les relations entre les variations des mesures (Δ) et l'angle α ont été étudiées à l'aide de régressions linéaires simples et le calcul des coefficients de détermination (R^2) et de corrélation de Pearson (r) correspondants. Différents graphiques ont également été réalisés pour visualiser ces relations.

Influence de la position de la tête (classes d'angles) sur les mesures morphologiques

Pour l'essai 1, caractérisé par un jeu de données équilibré, des ANOVA à deux facteurs mixtes (la vache en facteur aléatoire et la position en facteur fixe) avec mesures répétées ont été réalisées pour déterminer l'effet de la position sur les variations des mesures (ΔHG , ΔHH et ΔHS), tout en excluant la variance inter-vaches de ces mesures, avec un seuil de confiance à 95%. Les données de l'essai 2 étant déséquilibrées, des ANOVA de type III à deux facteurs mixtes ont été réalisées pour prendre en compte l'hétérogénéité des données selon les positions. En cas de différence significative entre les positions, un test *post-hoc* a été réalisé à l'aide de la méthode CLD (Comparative Letter Display), pour visualiser les différences entre chaque position.

Influence de la hauteur au garrot d'un animal sur les différences de mesures

L'influence de la hauteur au garrot de la vache (HG) sur les différents écarts de mesures a également été testée avec une analyse de la covariance (ANCOVA), réalisée pour les deux essais, afin d'obtenir le coefficient d'estimation de HG sur la variable ΔHG .

2.6.3. Choix des paramètres pour chacune des méthodes de correction de la hauteur au garrot et comparaison des méthodes

La méthode 1 de correction concerne la prédiction de la hauteur au garrot à partir des mesures réalisées sur l'arrière de l'animal. La corrélation entre HG et HH, ainsi qu'entre HG et HS, a été déterminée avec des régressions linéaires simples et le calcul des coefficients de détermination (R^2) et de corrélation de Pearson (r) correspondants. La régression présentant la meilleure corrélation a été sélectionnée comme première méthode de correction.

La méthode 2 consiste à appliquer une augmentation fixe (en %) selon les positions. Les différents pourcentages testés ont été évalués à l'aide d'une ANOVA à un facteur afin de comparer la hauteur au garrot corrigée moyenne avec la hauteur au garrot moyenne en position de référence. L'augmentation présentant le meilleur résultat a été sélectionnée comme deuxième méthode de correction.

La méthode 3 est basée sur un modèle de régression linéaire simple. Celui-ci a été utilisé pour prédire la variation de hauteur au garrot (ΔHG) en fonction de l'angle de la tête. Le modèle établi avec les données de l'essai 2 (données d'entraînement) a été validé avec les données de l'essai 1 (données de validation). Pour évaluer la performance du modèle de prédiction, la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour quantifier l'erreur moyenne entre les mesures prédites et réelles, l'erreur absolue moyenne (MAE) et le coefficient de détermination (R^2) pour évaluer la force de la relation linéaire entre les valeurs prédites et les valeurs réelles ont été testées.

Tableau 7 : Coefficients de variation et erreurs de répétabilité et de reproductibilité des indicateurs morphologiques.

Mesures	Répétabilité			Reproductibilité		
	Moyenne	Coefficient de variation (%)	Erreur de répétabilité	Moyenne	Coefficient de variation (%)	Erreur de reproductibilité
HG (cm)	147,4	0,20	0,29	151,6	1,60	2,40
HS (cm)	154,0	0,08	0,13	157,8	0,24	0,38
HH (cm)	151,6	0,12	0,19	154,8	0,52	0,81
Angle α (degrés)	29,1	0,02	0,37			

Signification : HG représente la hauteur au garrot, HS la hauteur au sacrum, HH la hauteur moyenne aux hanches et angle α l'angle de la tête.

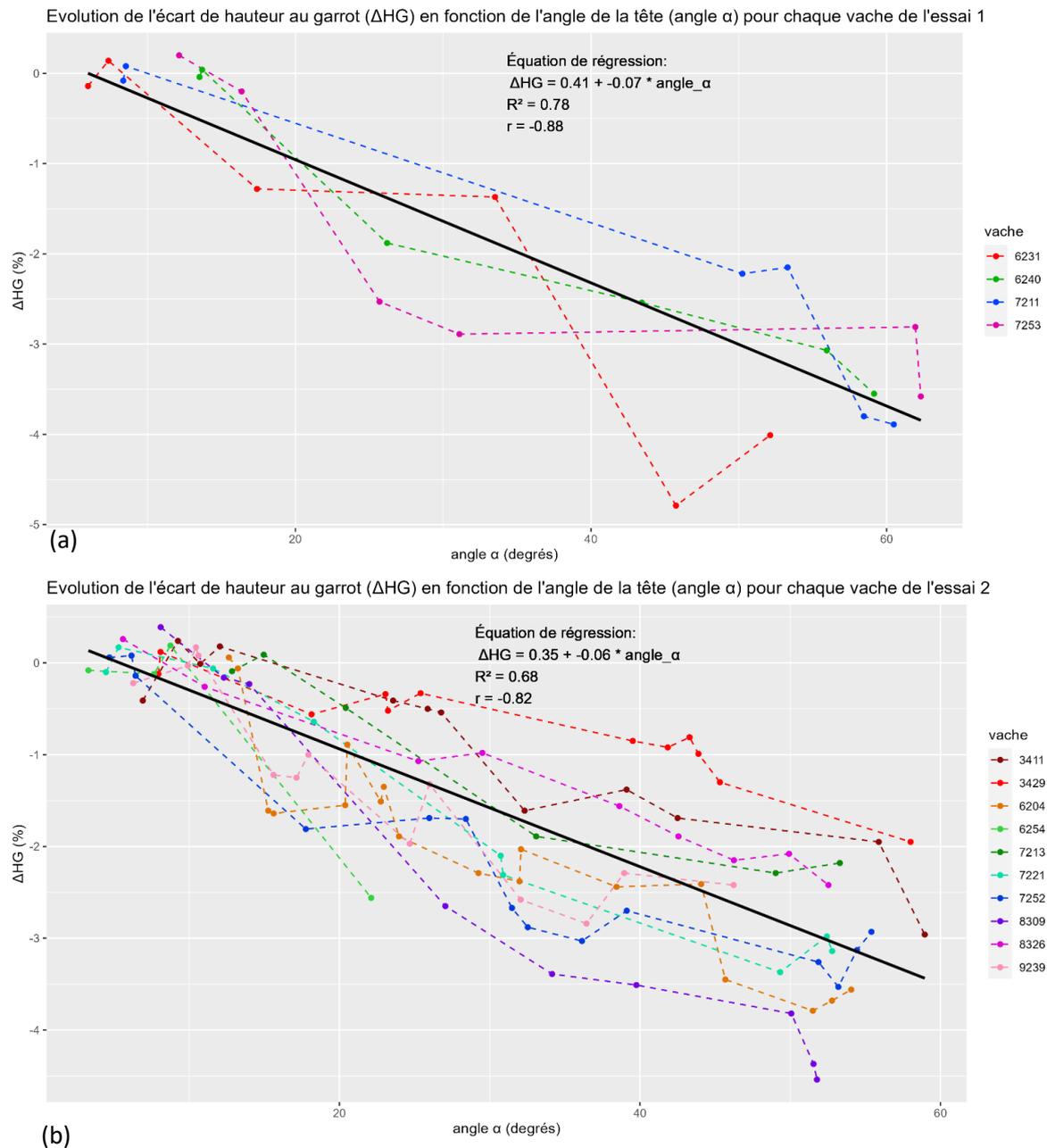


Figure 20 : Evolution de l'écart entre la hauteur au garrot selon l'angle de la tête pour chaque vaches des essais 1 (a) et 2 (b).

Signification : La droite noire représente la droite de régression moyenne, R^2 le coefficient de détermination et r le coefficient de corrélation de Pearson.

Afin de valider les méthodes de correction de la hauteur au garrot, une comparaison de ΔHG moyen de chaque méthode de correction avec la variation de hauteur au garrot en position P1 a été réalisée grâce à une ANOVA à un facteur avec un seuil de confiance à 95%.

3. Résultats

3.1. Répétabilité et reproductibilité des indicateurs morphologiques

Les coefficients de variations de répétabilité liée au pointage et de reproductibilité ont été calculés pour la hauteur au garrot (HG), la hauteur au sacrum (HS), la hauteur moyenne aux hanches (HH), et l'angle α de la tête ; à partir de 40 mesures par indicateurs pour la répétabilité, et 20 pour la reproductibilité (Tableau 7).

Les coefficients de variation de répétabilité (CV) sont faibles, voire très faibles (Tableau 7), trois mesures ayant un CV inférieur à 0,2%. La hauteur moyenne aux hanches présente le CV le plus élevé de 1,9%. L'erreur moyenne pour chaque mesure est également faible avec un maximum de 0,37 cm pour HH, indiquant une bonne répétabilité des mesures. Les coefficients de variation de reproductibilité (Tableau 7) varient de 0,24% à 1,60%, indiquant une bonne reproductibilité des mesures. L'erreur de reproductibilité est faible, et inférieure 1 cm pour HH et HS. La hauteur au garrot (HG) présente la plus grande erreur, avec 2,40 cm. L'annexe 3 détaille les coefficients de variation de répétabilité et de reproductibilité calculés pour chaque vache.

Ainsi, pour une vache mesurant 147,4 cm au garrot (moyenne des 40 mesures), l'erreur de répétabilité est de 0,3 cm, et pour une hauteur aux hanches moyenne de 151,6 cm, l'erreur de répétabilité n'est que de 0,4 cm. Pour un angle de tête de 29,1 degrés, l'erreur de répétabilité est de 0,4 degrés.

3.2. Evaluation de l'effet de la position de la tête sur les mesures morphologiques

Pour déterminer l'effet de la position de la tête sur différentes mesures morphologiques, les données acquises au cours des essais 1 et 2 ont été utilisées, comme indiqué en 2.6.2. L'essai 1 représente un ensemble de mesures effectuées sur quatre vaches, avec 24 données au total par mesure morphologique. L'essai 2 quant à lui comprend 106 données par mesure morphologique prises sur dix vaches différentes.

3.2.1. Effet de la position de la tête sur la hauteur au garrot

Variation de la hauteur au garrot par rapport à l'angle α de la tête.

La variation de hauteur au garrot par rapport à la position de référence P1 (ΔHG) en fonction de l'angle α , représentant la position de la tête, a d'abord été étudiée grâce à une régression linéaire simple entre les variables ΔHG (en %) et l'angle (α en degrés) pour les essais 1 et 2 (Figure 20).

Tableau 8 : Comparaison des écarts de hauteur selon la position par rapport à la position 1 pour les essais 1 et 2.

Position	Classe d'angle α	Essai 1	Essai 2
		ΔHG moyen (%) \pm Erreur standard	ΔHG moyen (%) \pm Erreur standard
P1	[0 ;15]	0,00 \pm 0,16	0,03 \pm 0,18
P2	]15 ; 30]	} -2,11 \pm 0,16	-1,26 \pm 0,18
P3	]30 ;45]		-2,16 \pm 0,18
P4	> 45	-3,69 \pm 0,16	-2,92 \pm 0,19

Signification : ΔHG la différence moyenne de hauteur au garrot par rapport à la position de référence P1 (erreur relative en %).

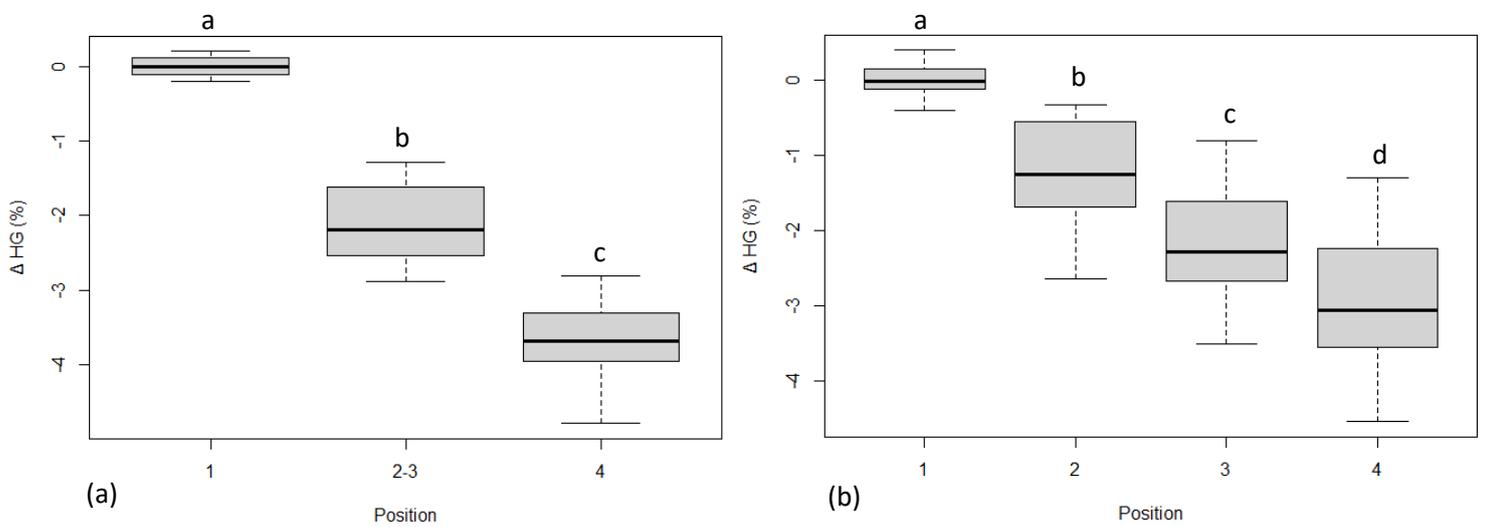


Figure 21 : Comparaison des écarts de hauteur au garrot (ΔHG) entre les différentes positions de tête pour l'essai 1 (a) et l'essai 2 (b).

Signification : Les barres horizontales noires représentent la moyenne de chaque groupe. Les lettres a, b, c et d indiquent une différence significative de ΔHG moyen entre les positions.

Pour chaque essai, l'équation de la régression linéaire simple de ΔHG en fonction de l'angle α a été calculée, ainsi que le coefficient de détermination de la régression (R^2), et le coefficient de corrélation de Pearson (r) entre ces deux variables.

Les résultats obtenus au cours du premier essai (Figure 20a) ont permis d'obtenir l'équation de régression linéaire suivante :

$$\Delta HG = 0,41 - 0,07 * \text{angle } \alpha.$$

Le coefficient de détermination R^2 associé à cette équation est de 0,78, indiquant que 78% de la variabilité de la hauteur au garrot pourrait être expliquée par les variations de l'angle α . La corrélation de -0,88 entre ces deux variables a mis en évidence une relation inverse significative, indiquant que la hauteur au garrot de l'animal diminue à mesure que l'angle α augmente (c'est-à-dire que l'animal baisse la tête), comme cela est observable sur le graphique (Figure 20a).

Les résultats du deuxième essai (Figure 20b) ont permis d'obtenir une équation de régression linéaire légèrement différente :

$$\Delta HG = 0,35 - 0,06 * \text{angle } \alpha$$

avec un R^2 de 0,68, et un coefficient de corrélation de Pearson de -0,82. Bien que légèrement inférieurs à l'essai 1, ces paramètres ont confirmé le lien, et son sens de variation, entre la variation de hauteur au garrot et la position de la tête .

Variation de la hauteur au garrot selon la position de la tête

Le Tableau 8 illustre les variations moyennes de la hauteur au garrot (ΔHG), en fonction des différentes positions de la tête, représentées par les classes d'angle α , la position P1 représentant la position de référence. Les variations de hauteur correspondent à la différence entre la hauteur au garrot mesurée et la hauteur au garrot en position P1. Pour l'essai 1, lorsque la tête est inclinée dans la classe d'angle α]15 ; 45], la hauteur au garrot moyenne diminue de -2,11 % \pm 0,16. Cette diminution se poursuit lorsque l'angle α dépasse 45 degrés (position P4), avec une variation de hauteur au garrot moyenne plus importante de -3,69 % \pm 0,16. La Figure 21a montre des différences significatives de hauteur au garrot entre les différentes positions.

Pour l'essai 2 (Tableau 8), les positions 2 et 3 ont été affinées. Ainsi, lorsque la tête est inclinée dans la classe d'angle α]15 ; 30], ΔHG moyen diminue de -1,26% \pm 0,18, tandis qu'en position P3 (angle α compris entre 30 et 45 degrés) une diminution moyenne de la hauteur de -2,16 % \pm 0,18 est observée. Enfin, la position P4 (angle α supérieur à 45 degrés) présente une variation inférieure à celle observée dans l'essai 1, avec une diminution moyenne de la hauteur au garrot de -2,92% \pm 0,19. La Figure 21b confirme la différence significative de hauteur au garrot selon la position de la tête.

A titre d'exemple, pour une vache de 150 cm au garrot (position 1), sa hauteur mesurée sera de 148,1 cm \pm 0,3 en position 2, contre 145,6 cm \pm 0,3 en position 4.

Tableau 9 : Influence de l'angle α sur les écarts de mesure à l'arrière de l'animal par rapport à la position de référence P1.

	Δ HH			Δ HS		
	Equation	R ²	r	Equation	R ²	r
Essai 1	Δ HH = 0,15 + 0*angle α	0,00	0,03	Δ HS = 0,14 + 0*angle α	0,01	0,10
Essai 2	Δ HH = 0,15 + 0*angle α	0,00	-0,04	Δ HS = 0,14 + 0*angle α	0,00	-0,02

Signification : Δ HH correspond à l'écart de hauteur aux hanches par rapport à la mesure en P1, et Δ HS à l'écart de hauteur au sacrum par rapport à la mesure en P1. L'équation correspond à une régression linéaire simple entre l'écart de mesure et l'angle α . R² est le coefficient de détermination de la régression, et r le coefficient de corrélation de Pearson.

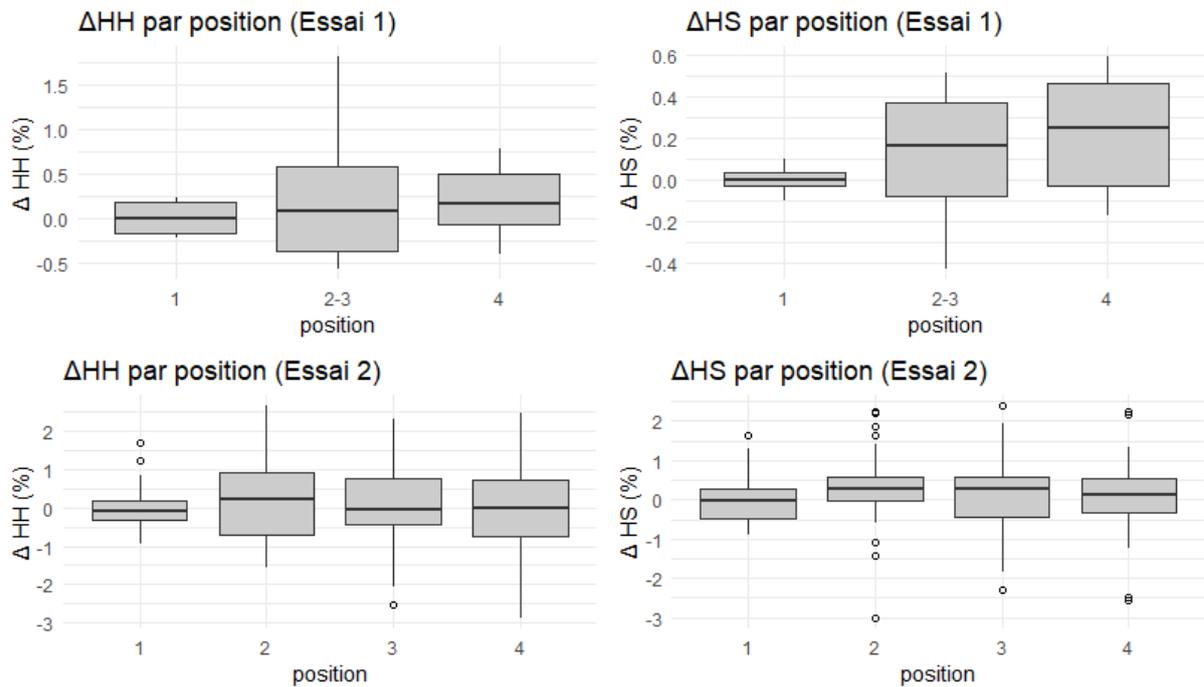


Figure 22 : Comparaison des écarts de hauteur au sacrum pour l'essai 1 (a) et l'essai 2(b), et des écarts de hauteur aux hanches pour l'essai 1 (c) et l'essai 2 (d) selon les différentes positions de tête.

Signification : Δ HH moyen correspond à la différence moyenne de hauteur aux hanches par rapport à P1 et Δ HS moyen à la différence moyenne de hauteur au sacrum par rapport à P1. Les barres horizontales noires représentent la moyenne de chaque groupe. Il n'y a pas de différence (p -value > 0,05).

Tableau 10: Analyse de la covariance entre HG et Δ HG.

Essai	Coefficient d'estimation de HG (%)	p-value
Essai 1	-0,005	0,148
Essai 2	-0,001	0,563

Signification : Le coefficient d'estimation de HG indique l'effet moyen de HG sur la variable Δ HG (en %).

3.2.2. Effet de la position sur l'arrière de l'animal (HH et HS)

Le Tableau 9 présente les modèles de régressions linéaires simples établis entre les variations de mesures à l'arrière de l'animal, ΔHH pour la variation de hauteur aux hanches et ΔHS pour la variation de hauteur au sacrum par rapport aux mesures de P1, en fonction de l'angle α . Pour les deux essais, les équations montrent une absence d'influence de l'angle α sur ces variations de mesures, avec des coefficients de pente nuls. De plus, les valeurs des coefficients de détermination (R^2) et des coefficients de corrélation de Pearson (r) sont proches de zéro, confirmant l'absence de corrélation linéaire significative entre les variations des mesures à l'arrière de l'animal (ΔHH et ΔHS) et l'angle α .

Ces observations sont confirmées avec l'observation de l'absence de variations de mesures à l'arrière de l'animal (ΔHH et ΔHS) selon la position de la tête pour les deux essais (Figure 22).

3.3. Effet de la hauteur au garrot sur la variation individuelle de HG

Le coefficient d'estimation de HG, qui représente l'effet moyen de la hauteur au garrot (en cm) sur la variable ΔHG à une valeur égale respectivement à -0,005 et -0,001 pour les essais 1 et 2 (Tableau 10). Ce coefficient, proche de zéro, indique une très faible influence sur la variable ΔHG : pour l'essai 1, une augmentation de HG de 1 cm entraîne une diminution de ΔHG de 0,005% par exemple. De plus, la p-value associée à ce coefficient est élevée (supérieure à 0,05), indiquant qu'il n'y a pas de relation significative entre la hauteur au garrot et la variable ΔHG . Ainsi, les différences de ΔHG observées entre les vaches (Figure 20) ne semblent pas dépendre de la hauteur au garrot de chaque individu.

3.4. Correction de la hauteur au garrot : choix des méthodes de correction

3.4.1. Méthode 1 : Correction de la hauteur au garrot à partir de mesures de l'arrière de l'animal

La méthode de correction 1 consistait à s'affranchir de la mesure de la hauteur au garrot (HG), en prédisant cette dernière à partir des mesures prises à l'arrière de l'animal, et peu influencées par la variation de position de la tête. La corrélation entre HG, et la hauteur aux hanches (HH), ainsi que la corrélation entre HG et la hauteur au sacrum (HS) ont été étudiées.

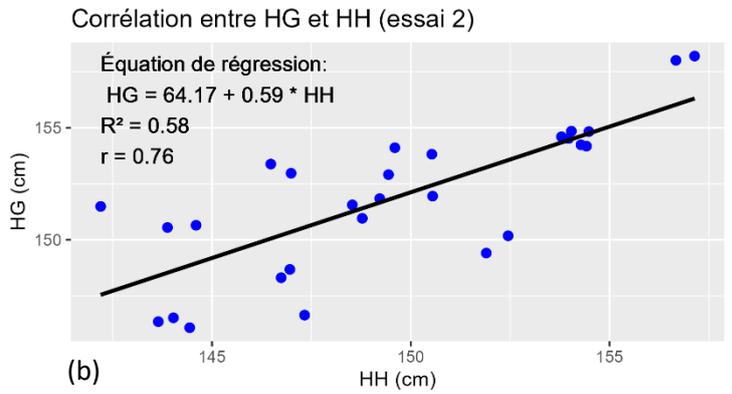
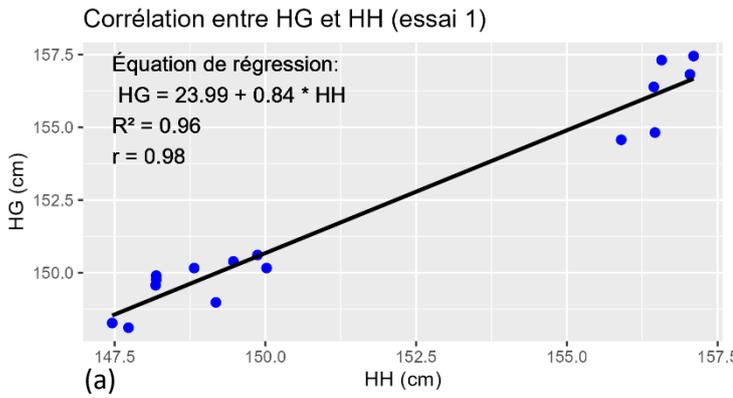


Figure 23 : Corrélation entre les mesures HH et HG pour les essais 1 (a) et 2 (b), en position de référence P1.

Signification : HH représente la hauteur aux hanches (cm), et HG la hauteur au garrot (cm). L'équation correspond à une régression linéaire simple entre HH et HG dont la droite est représentée en noir. R^2 est le coefficient de détermination de l'équation, et r le coefficient de corrélation de Pearson entre HG et HH.

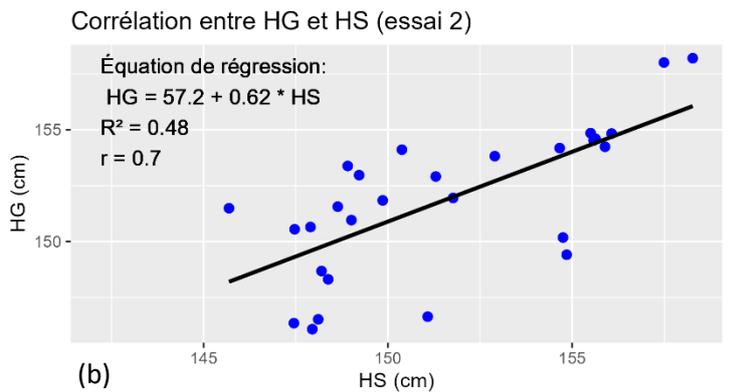
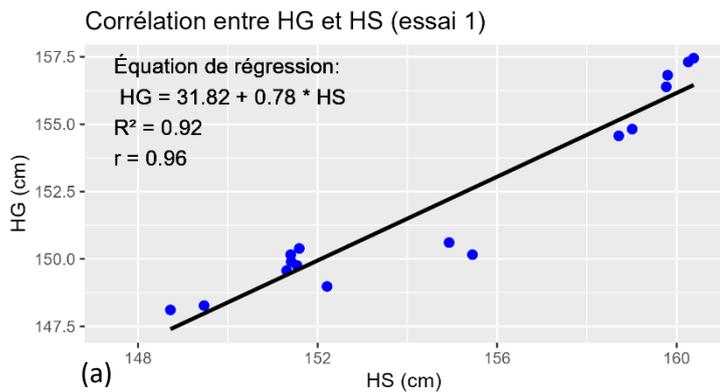


Figure 24 : Corrélation entre les mesures HS et HG pour les essais 1 (a) et 2 (b), en position de référence P1.

Signification : HS représente la hauteur au sacrum (cm), et HG la hauteur au garrot (cm). L'équation correspond à une régression linéaire simple entre HS et HG dont la droite est représentée en noir. R^2 est le coefficient de détermination de l'équation, et r le coefficient de corrélation de Pearson entre HG et HS.

Tableau 11 : Méthodes de correction par application d'un pourcentage à la mesure de la hauteur au garrot en fonction de la position de la tête.

Position	Classe d'angle	% essai 2	% arrondi
P1	[0 ;15]	+ 0,00%	+ 0,00%
P2	]15 ; 30]	+ 1,26%	+1%
P3	]30 ;45]	+2,16%	+2%
P4	> 45	+2,92%	+3%

Signification : % essai 2 représente un correctif issu du ΔHG moyen par position pour l'essai 2, et % arrondi correspond au correctif issu de l'essai 2 arrondi à l'unité.

Tableau 12 : Comparaison de deux méthodes de correction de la hauteur au garrot par application d'un correctif en % en fonction de la position de la tête.

Essai	HG P1 (cm)	% essai 2		% arrondi	
		HG moyen (cm)	ΔHG corrigé (%)	HG moyen (cm)	ΔHG corrigé (%)
Essai 1	154,6 ± 2,9	154,2 ± 3,1	-0,28 ± 0,74	154,1 ± 3,1	-0,31 ± 0,73
Essai 2	152,3 ± 3,7	152,3 ± 3,5	-0,03 ± 0,66	152,1 ± 3,5	-0,12 ± 0,66

Signification : HG P1 représente la moyenne de la hauteur au garrot en position 1 des individus de chaque essai, HG moyen la hauteur au garrot moyenne après correction, et ΔHG corrigée la variation moyenne de la hauteur au garrot corrigée par rapport à la position de référence.

Pour l'essai 1, la répartition des valeurs autour de la droite de régression est très inégale (Figure 23a et Figure 24a), avec deux groupes de mesures distincts. Les résultats issus de l'essai 1 n'ont donc pas été pris en compte à cause d'une mauvaise représentativité des données.

D'après l'essai 2 (Figure 23b, et Figure 24b), la relation entre la hauteur au garrot et la hauteur aux hanches présente un coefficient de corrélation de 0,76, contre 0,7 pour la corrélation entre la hauteur au garrot et la hauteur aux hanches. De même le coefficient de détermination (R^2) de la régression entre HH et HG est plus élevé que celui la régression entre HS et HG, avec respectivement un R^2 de 0,58 et 0,48. Ces résultats indiquent une corrélation un peu plus élevée entre les variables hauteur au garrot et hauteur aux hanches. C'est donc cette corrélation qui a été retenue comme première méthode de correction de la hauteur au garrot. Ainsi, pour une vache dont la hauteur aux hanches serait de 150 cm, la hauteur au garrot estimée serait de 152,7 cm.

3.4.2. Méthode 2 : Application d'une correction fixe selon la position

La deuxième méthode de correction de la hauteur au garrot envisagée était l'application d'un pourcentage correctif fixe en fonction de la position de la tête, définie par les classes d'angle α (Tableau 11). Deux corrections ont été testées pour cette méthode : l'application d'un pourcentage correspondant à la variation de hauteur au garrot moyenne par position issue de l'essai 2 (% essai 2) (Tableau 8, partie 3.2.1), ou l'application des pourcentages issus de l'essai 2, arrondis à l'unité (% arrondi).

A titre d'exemple, pour une vache dont la mesure de la hauteur au garrot en position 4 est de 145 cm, l'application du correctif issu de l'essai 2 (% essai 2) donne une hauteur au garrot corrigée de $145 + 2,92\% * 145$, soit 149,2 cm, tandis que l'application du correctif arrondi (% arrondi) donne une hauteur au garrot corrigée de $145 + 3\% * 145$ soit 149,4 cm.

Pour les vaches issues de l'essai 1, la hauteur au garrot moyenne à la position de référence P1 (HG P1) était de 154,6 cm avec un écart-type de 2,9 cm (Tableau 12). Après correction par application d'un pourcentage issu de l'essai 2, la hauteur au garrot moyenne pour toutes les positions était de $154,2 \pm 3,1$ cm, tandis que la variation de hauteur au garrot par rapport à P1 était de -0,28 % avec une erreur standard de 0,74 %. Après correction par application d'un pourcentage arrondi, les valeurs de HG moyenne et de Δ HG moyen, étaient respectivement à $154,1 \pm 3,1$ cm et $-0,31 \pm 0,73\%$.

Dans le cas de l'essai 2 (Tableau 12), la hauteur au garrot moyenne en position de référence P1 était de 152,3 cm avec un écart-type de 3,7 cm. La hauteur au garrot moyenne après correction par application du pourcentage issu de l'essai 2 était de 152,3 cm avec un écart-type de 3,5 cm. La variation de la hauteur au garrot (Δ HG) après correction pour l'essai 2 était inférieure à celle de l'essai 1, avec une moyenne de -0,03 % et une erreur standard de 0,66 %. Après application du pourcentage arrondi, les moyennes de HG et Δ HG se sont chiffrées à 152,1 cm \pm 3,5 et -0,12 % respectivement.

Tableau 13 : Paramètres d'évaluation du modèle de régression linéaire établi à partir des données de l'essai 2.

Jeu de données	Equation	RMSE (%)	MAE (%)	R²
Données d'entraînement (Essai 2)		0,72	0,58	0,70
Données de validation (Essai 1)	$\Delta HG = 0,346 - 0,064 * \text{angle } \alpha$	0,75	0,57	0,78

Signification : L'équation correspond à la régression linéaire entre la variation de hauteur au garrot (ΔHG) et l'angle de la tête (angle α). RMSE représente l'écart type des résidus, MAE l'erreur absolue moyenne et R² le coefficient de détermination de l'équation de régression.

Les deux méthodes de correction par application d'un pourcentage à la hauteur au garrot mesurée selon la position de la tête ont montré des résultats similaires pour les deux essais, et permettent d'obtenir des hauteurs au garrot corrigées moyennes proches de la hauteur au garrot en position de référence, avec un écart par rapport à la position de référence maximum de $-0,31 \pm 0,73\%$. L'application d'un pourcentage arrondi à la mesure de la hauteur au garrot selon la position a donc été retenue comme méthode de correction n°2, car plus facile à réaliser.

3.4.3. Méthode 3 : modèle de régression linéaire pour prédire la variation de la hauteur au garrot à partir de l'angle de la tête

La troisième méthode de correction consistait à établir un modèle de régression linéaire à partir des données de l'essai 2 pour prédire la variation de hauteur au garrot (ΔHG) en fonction de l'angle α de la tête. L'équation obtenue à partir de ce modèle est la suivante :

$$\Delta HG_{\text{prédite}} = 0,346 - 0,064 * \text{angle } \alpha$$

L'erreur absolue moyenne absolue moyenne (MAE) issue de ce modèle indique un écart moyen entre les valeurs prédites et réelles respectivement de 0,57% et 0,58% pour les essais 1 et 2, avec des écarts types moyens (RMSE) de 0,75% et 0,72% (Tableau 13). Le coefficient de détermination (R^2) est respectivement égal à 78% et 70% pour les essais 1 et 2.

La variation de hauteur au garrot (ΔHG) prédite grâce à ce modèle permet de corriger la hauteur au garrot mesurée selon la position. Pour exemple, la vache n°3411 avait une hauteur au garrot de 148,6 cm pour un angle α de la tête de 55,9 degrés. La variation de hauteur prédite est donc de $0,346 - 0,064 * 55,9 = -3,23\%$. Ainsi, sa hauteur au garrot corrigée est de $148,6 + 3,23\% * 148,6 = 153,4$ cm.

3.5. Application et comparaison des méthodes de correction

Les trois méthodes de correction déterminées précédemment ont été appliquées aux données des essais 1 et 2. Pour rappel, la méthode 1 consistait à prédire la hauteur au garrot ($HG_{\text{prédite}}$, en cm) à partir de la mesure de la hauteur aux hanches ($HH_{\text{mesurée}}$, en cm) selon l'équation déterminée en 3.4.1:

$$HG_{\text{prédite}} = 64,17 + 0,59 * HH_{\text{mesurée}}$$

La méthode 2 consistait à appliquer un pourcentage de correction à la hauteur au garrot selon la position de la tête : +0% en position 1 ; +1% en position 2 ; +2% en position 3 ; et +3% en position 4.

La méthode 3 correspondait à une prédiction de la variation de hauteur ($\Delta HG_{\text{prédit}}$, en %) en fonction de l'angle α (en degrés) de la tête de l'animal. L'équation de prédiction déterminée en 3.4.2. est la suivante :

$$\Delta HG_{\text{prédit}} = 0,346 - 0,064 * \text{angle } \alpha$$

Tableau 14 : Comparaison des écarts de hauteur par rapport à la position de référence P1 pour chaque méthode de correction.

	ΔHG non corrigée (%)	Méthode 1 : ΔHG (%)	Méthode 2 : ΔHG (%)	Méthode 3 : ΔHG (%)
Essai 1	$-1,93 \pm 1,72$	$0,56 \pm 0,65$	$-0,32 \pm 0,73$	$-0,08 \pm 0,73$
Essai 2	$-1,43 \pm 1,17$	$0,50 \pm 1,36$	$-0,1 \pm 0,46$	$0,02 \pm 0,51$

Signification : ΔHG la variation de hauteur par rapport à P1 (erreur relative)

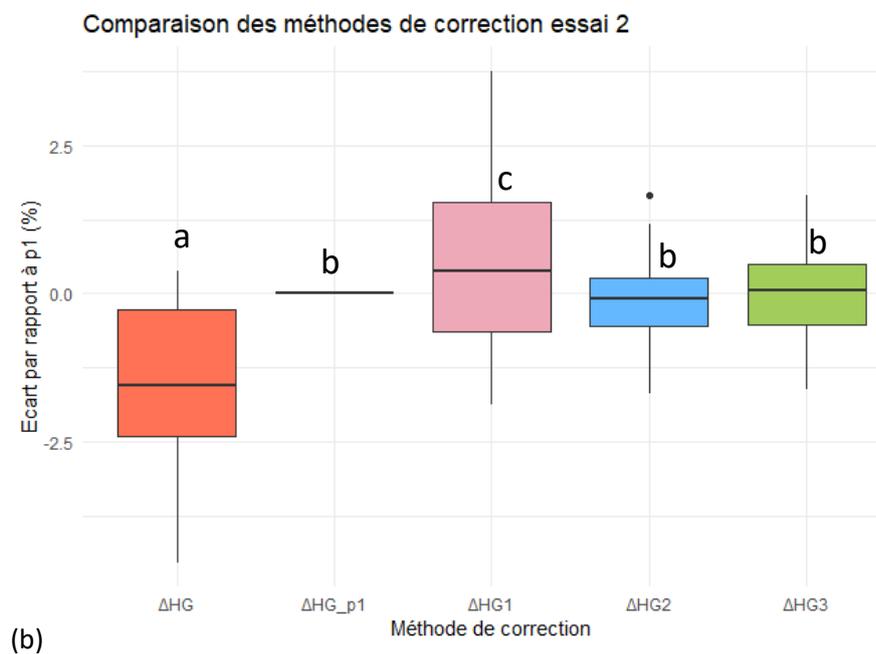
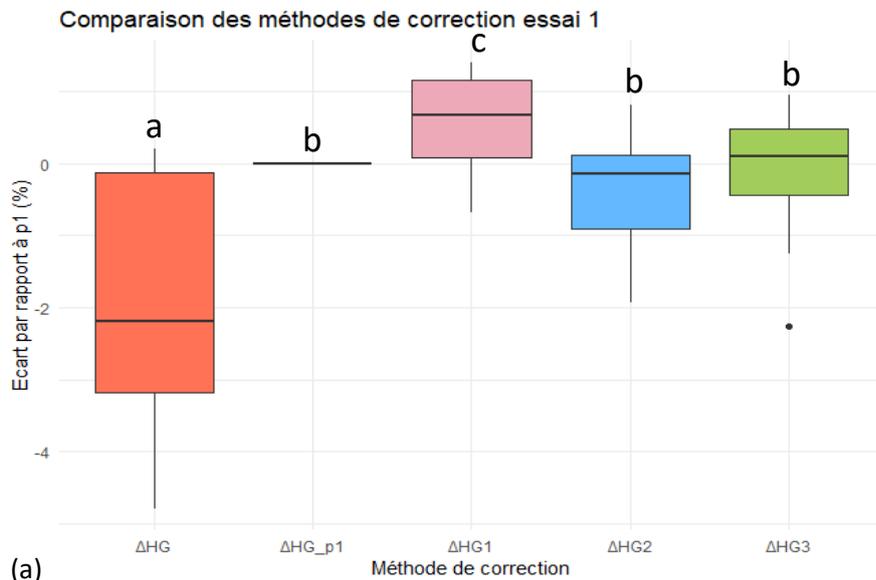


Figure 25 : Comparaison des écarts de hauteur au garrot par rapport à la position de référence P1 pour chaque méthode de correction appliquées aux données de l'essai 1(a) et de l'essai 2(b).

Signification : ΔHG correspond aux mesures avant correction, ΔHG_{p1} à la position de référence, $\Delta HG1$ aux mesures corrigées par la méthode 1, $\Delta HG2$ à la méthode 2, et $\Delta HG3$ à la méthode 3. Les barres horizontales noires représentent la moyenne de chaque groupe. Les groupes reliés par des lettres différentes (a, b et c) indiquent une différence significative.

Avant correction des mesures de hauteur au garrot, la variation moyenne de ces mesures par rapport à la position de référence (ΔHG) était respectivement de $-1,93 \pm 1,72\%$ et $-1,43 \pm 1,17\%$ pour les essais 1 et 2 (Tableau 14). La méthode 1 de correction a montré une légère amélioration de cet écart de hauteur, avec un ΔHG moyen de $-0,56\%$ pour l'essai 1 et $-0,50\%$ pour l'essai 2. La méthode 2 de correction donne un ΔHG moyen respectif de $-0,32 \pm 0,73\%$ et $-0,1 \pm 0,46\%$ pour les essais 1 et 2. La méthode 3 de correction permet d'obtenir un ΔHG moyen inférieur à $0,1\%$ pour les deux essais (essai 1 : $-0,08 \pm 0,73\%$ et essai 2 : $0,02 \pm 0,51\%$).

La valeur de ΔHG moyen avant correction présentait bien une différence significative par rapport aux mesures en position de référence, confirmant les résultats obtenus précédemment sur l'influence de la position sur les mesures de hauteur au garrot (Figure 25). Pour les deux essais, la méthode 1 de correction a permis de diminuer la valeur de ΔHG moyen (ΔHG_1), qui présentait une différence significative avec ΔHG avant correction, mais n'a pas permis d'obtenir des résultats significativement similaires à la position de référence (ΔHG_{p1}). Les méthodes 2 et 3 ont quant à elles donné des valeurs de variation de hauteur au garrot par rapport à la position de référence (ΔHG_2 et ΔHG_3) significativement nulles, c'est-à-dire que les hauteurs corrigées par ces deux méthodes sont similaires à la hauteur au garrot en position de référence. L'annexe 4 présente les résultats de comparaisons de ces différentes méthodes de correction sur la hauteur au garrot brute (valeur absolue, en cm), et confirme ces observations.

4. Discussion

Les vaches utilisées pour ce travail, en nombre réduit mais représentatives du troupeau de l'IEPL de Méjusseume, présentent une grande diversité au niveau de la morphologie et de la production (Annexe 1). Les caractéristiques des animaux de ce troupeau seront présentées, mais non discutées en tant que telles, l'objectif principal étant d'analyser et discuter plus les variations de valeurs et les mesures correctives que les valeurs elles-mêmes.

4.1. Influence de la posture des animaux sur les mesures morphologiques

Le rang de lactation des 10 vaches de l'essai 2 variait de 2 à 6, avec une production de lait quotidienne allant de 13,8 à 36,4 kg, sur la semaine du 8 mai 2023 ; traduisant également des stades de lactation différents. Ces vaches présentaient un poids vif variant de 631 à 856 kg, pour une note d'état corporel (NEC) moyenne de 1,50 à 4,00.

4.1.1. Position de la tête

Une hauteur au garrot affectée

Les coefficients de variation de la répétabilité des mesures de hauteur au garrot (HG) et d'angle α étaient respectivement de $0,20\%$ et $0,02\%$. Les valeurs de ces coefficients sont faibles et inférieures à celle de la variation de hauteur au garrot observée entre les différentes positions (ΔHG), indiquant que l'erreur liée aux mesures ne permet pas d'expliquer la variation de ΔHG observée au cours de l'étude. Le coefficient de variation de la reproductibilité est plus élevé pour la hauteur au garrot ($1,6\%$).

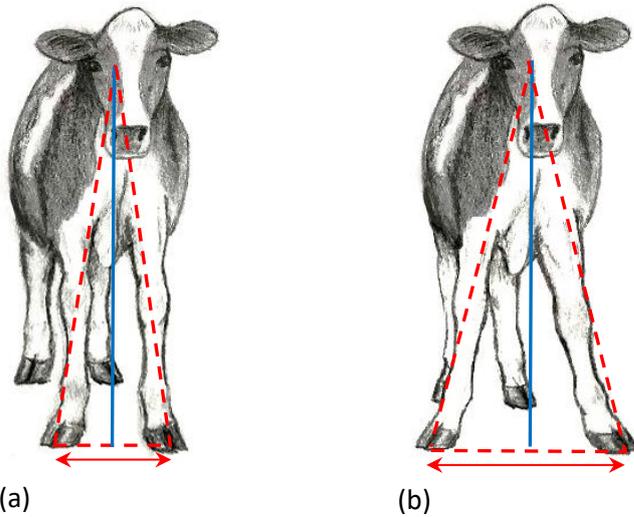


Figure 26 : Position latérale des pattes en position de référence (a) et avec écartement des pattes (b).
 Signification : Le trait bleu représente la hauteur au garrot (HG), les traits rouges les longueurs utilisées pour estimer HG, et la double flèche l'écartement latéral des pattes au niveau des onglons (©Tiercin A.).

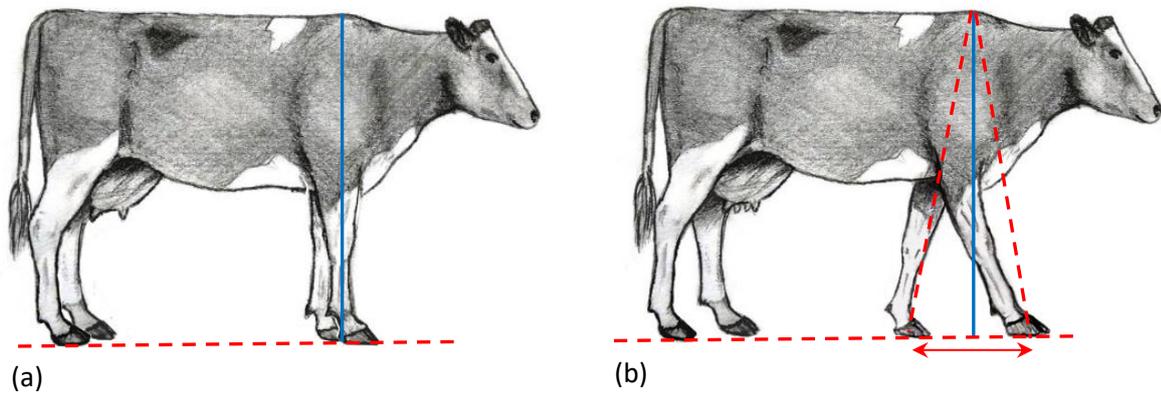


Figure 27 : Position longitudinale des pattes en position de référence (a) et avec écartement des pattes (b).
 Signification : Le trait bleu représente la hauteur au garrot (HG), les traits rouges les longueurs utilisées pour estimer HG, et la double flèche l'écartement longitudinal des pattes au niveau des onglons (©Tiercin A.).

Bien qu'en dessous du seuil de 4% fixé par Fisher *et al.* (2014), il est supérieur aux coefficients de variation des mesures effectuées à l'arrière, respectivement égaux à 0,24 et 0,52% pour la hauteur au sacrum et la hauteur aux hanches. La valeur de ce coefficient est proche de celle déterminée par Dumesny (2021) pour le dispositif Deffilait3D (1,78%). La valeur du coefficient de détermination obtenu lors de l'analyse corrélation simple entre la variation de hauteur au garrot et l'angle de la tête était respectivement de 0,76 et 0,68 pour les essais 1 et 2. Ceci indique que la position de la tête explique à elle seule près de 70% des variations des mesures de hauteur au garrot. L'erreur de reproductibilité, plus importante pour la hauteur au garrot que pour les autres indicateurs morphologiques, contrairement aux travaux précédents avec le dispositif Morpho3D (Xavier, 2019), semble donc dû à des positions de tête différentes sur les images issues du Dispositif Deffilait3D, en raison de l'absence de système de blocage de la tête au moment de l'acquisition des données. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Li *et al.* (2023), qui identifient également que la position de la tête chez les bovins en engraissement comme principale source d'erreur dans les mesures de la hauteur au garrot.

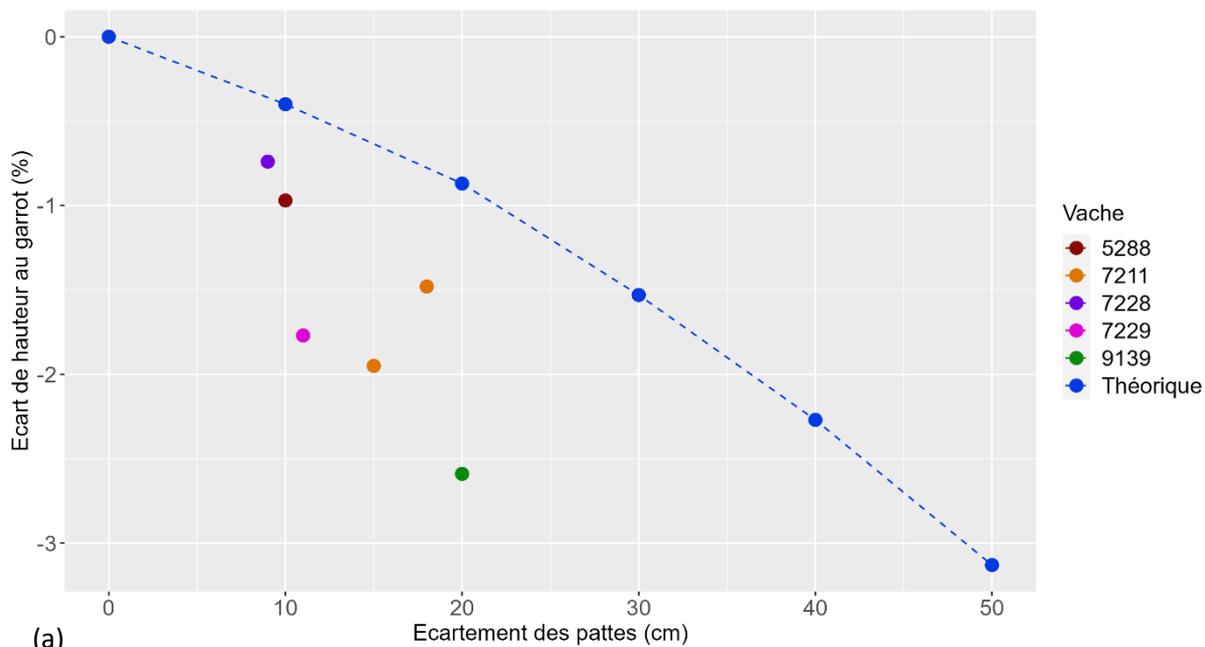
Une absence d'effet sur les mesures de hauteurs à l'arrière de l'animal

Les résultats des deux essais n'ont montré aucune corrélation entre la position de la tête et la variation des mesures prises à l'arrière de l'animal par rapport à la position de référence P1 (variation inférieure à 0,3%). Les valeurs des coefficients de répétabilité de ces mesures (0,19% pour la hauteur au sacrum, 1,9% pour la hauteur moyenne aux hanches) suggèrent alors que la variation de ces mesures peut être en partie expliquée par une erreur de pointage sur les images 3D. La position de la tête de l'animal ne semble donc pas influencer les mesures effectuées à l'arrière de l'animal, comme la hauteur aux hanches ou au sacrum. Li *et al.* (2023) ont également montré que c'est bien la posture de l'arrière de l'animal (dos et pattes) qui constitue la principale source d'erreur des mesures de la hauteur aux hanches, la posture avant ayant un effet moindre.

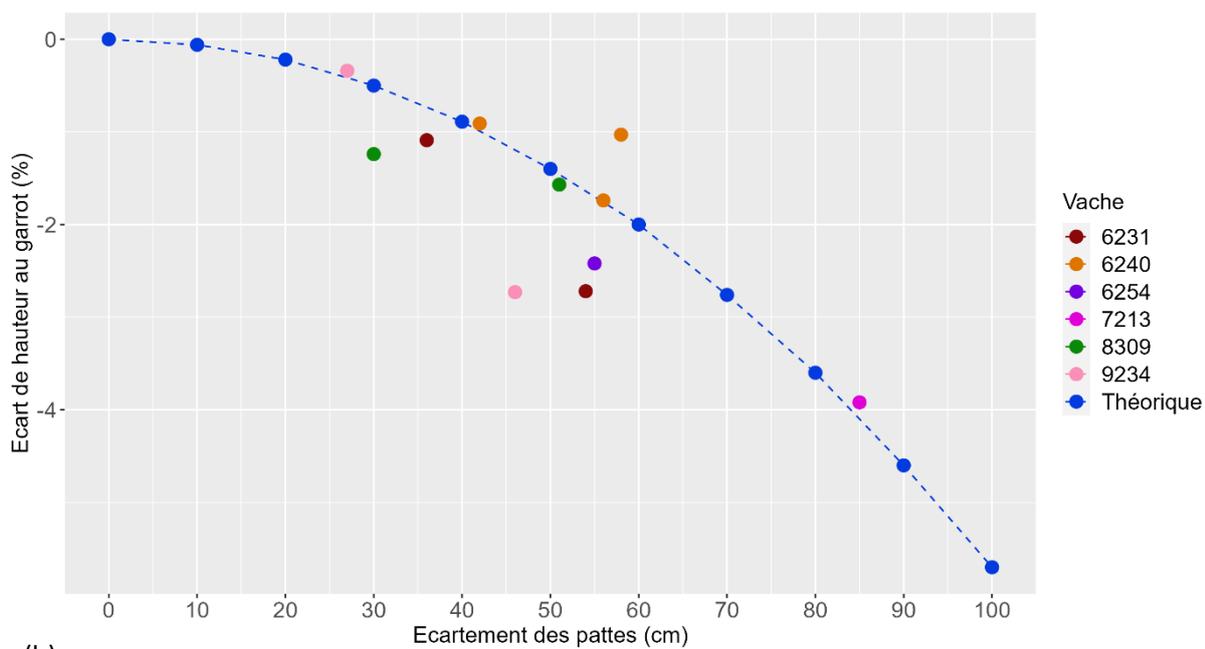
4.1.2. D'autres sources de variation possibles

Si la hauteur au garrot diminue lorsque la tête de l'animal s'incline vers le bas, comme vu précédemment, l'ampleur de cette variation varie d'un animal à l'autre. Par exemple, pour une même vache en position 4 (tête basse), les variations de la hauteur au garrot (ΔHG) étaient de -1,95% et -2,96%, pour des angles de tête respectifs de 58,9 degrés et 55,9 degrés. De plus, la valeur de ce ΔHG , pour une même position, diffère également d'une vache à l'autre. Ainsi, une vache en position 3 présentait un ΔHG de -0,81% (avec un angle de tête de 43,3 degrés), tandis qu'une autre vache avait un ΔHG de -2,41%, avec cette même valeur d'angle de tête de 43 degrés. Les variations de ΔHG entre vaches pour une même position, sans noter d'effet de la hauteur au garrot propre à chaque vache (valeur absolue) sur ces variations. L'hypothèse émise est donc qu'il existe d'autres facteurs susceptibles de les influencer.

Dans la position de référence retenue pour l'étude, la posture des pattes de la vache est prise en compte (Figures 26a et 27a), comme recommandé par Yang *et al.* (2022).



(a)



(b)

Figure 28 : Variation de hauteur au garrot par rapport à la mesure en position de référence en fonction de l'écartement latéral (a) et longitudinal (b) des pattes avant.

Signification : La position de référence correspond à l'absence d'écartement longitudinal des pattes. En bleu la valeur théorique, estimée par calcul

Cependant avec un animal libre de ses mouvements il est difficile d'obtenir des images 3D avec les pattes des animaux toujours dans cette posture, tout comme la position de la tête, et ce d'autant plus que pattes et têtes ne changent pas de disposition de manière synchrone. Certaines images sélectionnées montraient ainsi une légère variation de position des pattes par rapport à la position de référence. A partir des données acquises, deux variations de la position des pattes avant ont été identifiées, liées à l'écartement latéral (Figure 26b) ou longitudinal (Figure 27b).

Pour prendre en compte ces variations, modéliser les pattes par des segments a permis d'estimer une influence éventuelle de la position des pattes avant sur la mesure de la hauteur au garrot. L'influence de l'écartement latéral ou longitudinal des pattes avant est représentée respectivement sur les Figures 28a et 28b. Dans les deux cas, lorsque l'écartement des pattes augmente, la hauteur théorique au garrot diminue. Pour la position latérale des pattes, un écart supérieur à 20 cm entraîne une diminution de la hauteur de plus de 1% par rapport à la position de référence, pour atteindre une baisse de plus de 3% avec un écart de 50 cm. Pour la position longitudinale, un écartement des pattes jusqu'à 40 cm entraîne une diminution de la mesure de moins de 1%. Toutefois cette diminution s'accroît à mesure que l'écart augmente, pour atteindre près de 5% avec un écartement extrême de 1 m. Les mesures réalisées sur des images 3D de vaches présentant des variations des positions des pattes entre deux captures confirment la pertinence de cette approche : la hauteur au garrot diminue à mesure que l'écartement latéral ou longitudinal des pattes avant augmente, ce qu'il sera aussi nécessaire de prendre en compte dans les valeurs de hauteur au garrot à corriger. Ceci confirme les résultats de Li *et al.* (2023), qui ont déterminé qu'un écartement longitudinal ou latéral des pattes contribuaient également à une erreur de mesures de hauteur au garrot, en plus de la position de la tête, chez les bovins en engraissement.

Au final, la position de la tête ne semble donc pas être le seul facteur influençant les mesures morphologiques, et c'est bien l'ensemble de la posture des animaux qui devrait être prise en compte lors de la réalisation des mesures morphologiques sur des images 3D. Ceci est sans doute encore plus vrai lorsque l'animal ne sera pas en position statique mais en mouvement. En effet, Du *et al.* (2022) ont relevé des erreurs de mesures importants (jusqu'à 20%) lorsque les bovins avaient une posture non standard, telle qu'une grande foulée ou une flexion latérale. De même, Li *et al.* (2023), ont caractérisé la posture des bovins en segmentant le corps en différentes zones pour prendre en compte 12 micro-postures, telles que la hauteur de tête, l'élongation du cou, la courbure du dos, mais aussi le placement des pattes avant et arrières. Selon la zone corporelle des mesures morphologiques, la posture des animaux exerçait une influence différente sur l'erreur de mesure, la position des pattes arrière contribuant à l'erreur de mesures pour la hauteur aux hanches mais pas au garrot par exemple.

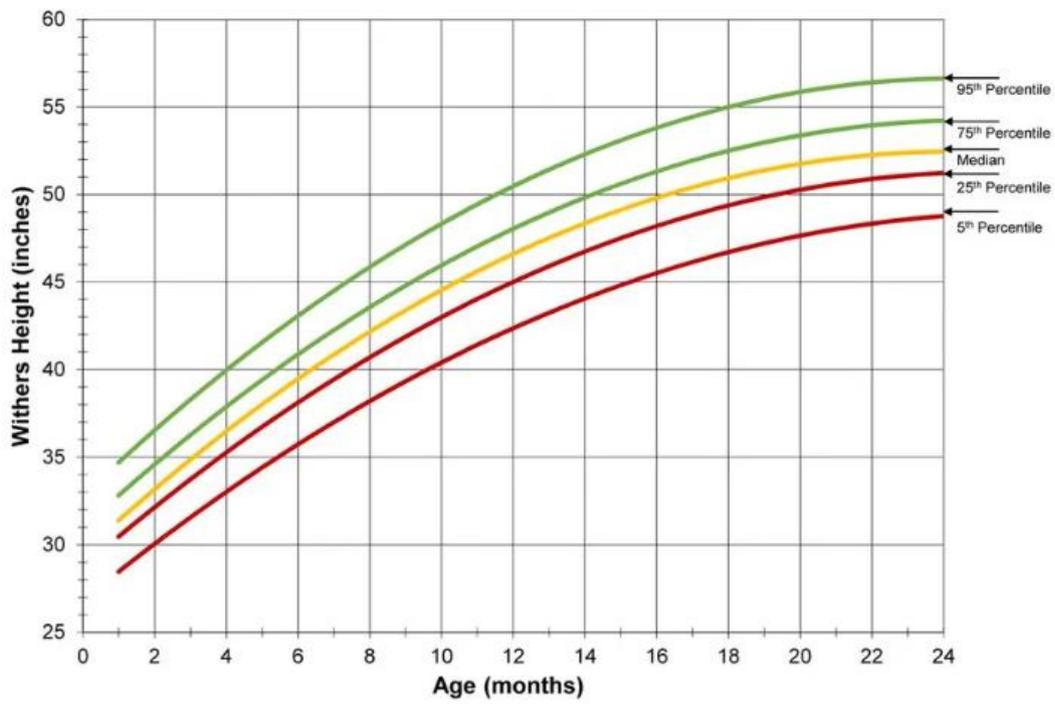


Figure 29 : Hauteur au garrot de génisses de race Holstein américaines, en fonction de l'âge (Jones et Heinrichs, 2022).

Signification : Withers Height la hauteur au garrot en pouces (1 pouce = 2,54cm)

4.2. Correction des mesures morphologiques

Les relevés et analyses effectués précédemment ont montré qu'il pouvait exister d'importantes sources de variation affectant les mesures sur animaux. Les prendre en compte est donc nécessaire pour une utilisation effective de ces données, que ce soit pour le suivi de croissance qui se poursuit au-delà de la seconde lactation (Xavier *et al.*, 2022), de performances ou génétique.

4.2.1. Importance de corriger la hauteur au garrot

La hauteur au garrot, un indicateur stable chez les bovins adultes, présente une corrélation significative avec le poids vif. Heinrichs *et al.* (1992) ont démontré que la hauteur au garrot seule pouvait être utilisée pour prédire le poids des génisses Holstein lors de la croissance et de se passer d'un système de pesée en élevage. Cependant, chez les vaches adultes, cette mesure qui demeure relativement constante ne permet pas d'estimer les variations de poids au fil du temps. Par conséquent, d'autres indicateurs morphologiques tels que la hauteur aux hanches et la longueur du corps (Tasdemir *et al.*, 2011), les lignes du dos (Kuzuhara *et al.*, 2020) le volume et la surface (Le Cozler *et al.*, 2019b) sont souvent inclus dans les modèles de prédiction du poids vif des vaches laitières adultes.

Pour exemple, la vache 6231, de l'essai 1, mesurait 157 cm en position P1. L'équation de Le Cozler *et al.* (2018 ; Annexe 6), estime son poids à 691,8 kg. Avec une variation de la position de la tête en position P4 cette même vache mesurait 150 cm : le poids estimé avec cette même équation serait alors de 685,8 kg (686,5 en faisant toutes les mesures sur l'image 3D de la vache en position P4), soit une différence de 6 kg (0,9%). La variation de position, et donc de hauteur au garrot, affecte, mais de manière peu importante, le poids estimé de l'animal. Ceci confirme que la hauteur au garrot ne soit pas utilisée comme variable de prédiction du poids vif chez les vaches laitières dans la plupart des équations. Kuzuhara *et al.* (2015) ; Gruber *et al.*, (2018) ; Song *et al.*, (2018) n'ont ainsi pas pris en compte cette mesure dans leurs modèles de prédiction du poids vif.

Cependant, la mesure régulière de la hauteur au garrot à un jeune âge permet de déterminer la courbe de croissance d'un animal (Jones et Heinrichs, 2022 : Figure 29). Elle permet de suivre l'évolution de la croissance chez les jeunes animaux, au même titre que le tour de poitrine ou la largeur des fesses (Le Cozler *et al.*, 2022). La hauteur au garrot s'accroît de 5 à 7% entre les âges de 12 et 15 mois dans les essais de Le Cozler *et al.* (2022), passant de 133cm à 141cm environ. Hoffman (1997), a déterminé que la taille au garrot optimale des génisses Holstein au premier vêlage est comprise entre 137,7 cm (pour les plus petits animaux) et 141 cm (pour les plus grand), avec une taille moyenne de 139,4 cm. Les essais ont été réalisés avec des vaches adultes, mais il est possible que la variation des mesures de hauteur au garrot observée soit également présente sur des génisses en croissance, notamment au-delà de 12 mois d'âge, où l'animal a atteint déjà 75% de sa taille adulte (et 96% à 24 mois ; Kertz *et al.*, 1998).

A titre d'exemple, dans le cas des génisses de Jones et Heinrichs (2022 ; Figure 29), une génisse de 24 mois mesurant 134,6 cm au garrot en position de référence pourrait avoir une variation de hauteur de -2,92% en position P4, ce qui la placerait parmi les 25% des plus petites génisses. De telles erreurs de mesures pourraient aussi indiquer une croissance insuffisante chez des animaux situés dans les cinq premiers centiles, se traduisant par des erreurs de plan d'alimentation mais aussi des risques de biaiser les choix de sélection.

4.2.2. Deux méthodes de correction possibles

Pour corriger la mesure de la hauteur au garrot, différentes méthodes ont été testées, dont l'une basée sur les mesures de hauteur au sacrum (méthode 1), mais qui n'a pas été retenue au final en raison de ses faibles performances de correction. Les deux autres méthodes de correction ont montré des résultats similaires : la correction de la hauteur par application d'un pourcentage fixe (méthode 2) et la prédiction de la hauteur au garrot grâce à un modèle de régression linéaire (méthode 3). L'absence de correction entraînait un écart moyen de la mesure de $-1,93 \pm 1,72$ % pour l'essai 1, et de $-1,43 \pm 1,17$ % pour l'essai 2, avec des variations de hauteur maximales supérieures de plus de 4% par rapport à la position de référence, en accord avec les erreurs moyennes de 1,68% relevées par Li *et al.* (2023). Ces deux méthodes de correction ont permis de réduire de manière significative l'écart entre les différentes mesures et la position de référence. En moyenne, la méthode 2 a permis de réduire l'écart à moins de 0,30%, tandis que la méthode 3 a atteint une réduction encore plus importante, avec moins de 0,1% en moyenne. Après correction, l'écart maximal observé n'a pas dépassé 1%. À titre de comparaison, Li *et al.* (2023) ont obtenu une erreur relative moyenne plus élevée de 1,34%, avec une erreur maximale de 4,34%, en utilisant une approche basée sur la régression Elastique Net. L'intérêt de cette méthode d'apprentissage automatique est qu'elle permet de prendre en compte les erreurs potentielles liées à la posture pour ajuster les mesures morphologiques.

En pratique, le choix de la méthode de correction la plus appropriée est influencée par sa précision et sa complexité de mise en œuvre. La méthode 2 consiste à appliquer un pourcentage de correction en fonction de la position de la tête est facile à mettre en œuvre. Elle ne nécessite qu'une mesure, la hauteur au garrot, et de déterminer visuellement dans quelle position (1, 2 3 ou 4) se situe la tête pour appliquer la correction. La méthode 3, utilise un modèle de prédiction et prend en compte des mesures supplémentaires, telles que l'angle de la tête, calculé à partir de deux autres mesures. Metrux2- α -8 ne permet pas encore le calcul d'angles, nécessitant davantage de temps et sa mesure s'avère chronophage (environ 2 à 3 minutes pour déterminer l'angle). Ainsi, pour un dispositif mobile destiné au phénotypage des animaux dans différentes fermes, la méthode 2 apparaît la plus simple et la plus rapide à mettre en œuvre, dès lors que la position de la tête de l'animal est identifiée. Avec une automatisation des mesures, la méthode 3 pourrait donner des mesures plus précises et rapidement disponibles.

Tableau 15 : Correction de la hauteur au garrot en fonction de la position de la tête et de la position longitudinale des pattes pour deux vaches.

Vache	HG référence (cm)	HG mesurée (cm)	Δ HG (%)	Position de la tête			Position longitudinale des pattes			Combinaison des corrections	
				Position	HG corrigée	Δ HG (%)	Position	HG corrigée	Δ HG (%)	HG corrigée	Δ HG (%)
7213	154,0	145,5	- 5,5	P4	149,9	- 2,6	+ 80cm	150,7	- 2,1	155,2	0,78
9239	146,4	139,2	- 4,9	P4	143,3	- 2,1	+ 50cm	142,0	- 3,0	146,2	- 0,13

Signification : HG la hauteur au garrot, et Δ HG l'écart par rapport à la position de référence (erreur relative). La correction en fonction de la tête correspond à la méthode 2. La combinaison des corrections correspond à une correction par rapport à la position des pattes puis de la t

4.2.3. Combinaison de corrections en fonction des positions des pattes et de la tête

Lorsque la posture d'une vache varie, notamment au niveau de sa tête et de ses pattes avant, la correction de la hauteur au garrot basée sur la seule position de la tête ne suffit pas. Le Tableau 15 présente en effet les résultats de différentes corrections de la hauteur au garrot en fonction de la position de la tête (méthode 2), de la position longitudinale des pattes, et de la combinaison des deux. L'application d'une seule méthode de correction permet de réduire l'erreur de mesure de 2 à 3 %, par rapport à une erreur d'environ 5 % sans correction. En combinant les corrections basées sur la position des pattes et de la tête, une erreur de précision de la hauteur au garrot inférieure à 0,8 % a été obtenue. Cette approche de combinaisons des corrections se rapproche davantage de la mesure prise en position de référence, ce qui concorde avec l'étude de Li *et al.* (2023), qui ont pris en compte différents facteurs de posture dans leur correction des mesures. Il est donc sans doute probable de pouvoir affiner les mesures à l'avenir, sur des animaux ayant des postures diverses sur les images 3D.

4.3. Perspectives

Automatisation des mesures

La réalisation des mesures morphologiques manuellement est une étape chronophage qui peut constituer un frein à l'utilisation de l'imagerie 3D pour le phénotypage à haut débit. Mais il est sans doute nécessaire de passer par cette phase pour étudier l'intérêt de le faire, avant d'investir, financièrement et humainement, dans de tels développements. L'automatisation des mesures est essentielle pour utiliser un dispositif d'imagerie 3D tel que Deffilait3D à l'échelle d'un troupeau, ou même sur plusieurs exploitations différentes. Le dispositif Deffilait3D permet une liberté de mouvement des vaches (tête et pattes). Un élément clé de cette automatisation consisterait à établir une position de référence précise, en représentant l'animal par des segments et des articulations par exemple. Cette position de référence serait ainsi le point de départ pour déterminer les variations de mesures en fonction du changement de posture, sur différentes zones de l'animal (pattes avant, pattes arrière, dos...). Une fois la position de référence définie, le système d'automatisation des mesures pourrait appliquer une correction automatique des mesures selon la posture de l'animal sur l'image 3D, afin d'obtenir des mesures précises même en présence de variations de postures. Des études récentes ont montré la faisabilité de l'automatisation de mesures morphologiques des bovins dans des systèmes d'imagerie 3D (Du *et al.*, 2022 ; Li *et al.*, 2023 et Luo *et al.*, 2023).

Utilisation du dispositif Deffilait3D sur des animaux en mouvement

Un des objectifs du dispositif Deffilait3D et de ses successeurs est de pouvoir l'utiliser sur des animaux en mouvement, éliminant ainsi la nécessité de manipuler les animaux et réduisant les risques de stress et d'accidents pour les animaux et les manipulateurs, tout en simplifiant le processus de collecte de données. Bien que prises au cours de l'essai 2, les images des animaux en mouvement se sont avérées non exploitables pour le moment car cela nécessite certaines adaptations du dispositif.

Après ces réglages et quelques modifications complémentaires prévues cet automne, il devrait être possible d'acquérir des images 3D d'animaux en mouvement, comme pour le dispositif Phéno3D, évolution du dispositif Deffiliat3D (Lebreton *et al.*, 2023), et d'y appliquer les correctifs nécessaires.

Les animaux en liberté présentent naturellement différentes postures, qu'il s'agisse du mouvement de leurs pattes, de la position de leur tête, ou de la rectitude de leur dos. Une étude de Ling *et al.* (2022) a démontré l'importance de prendre en compte ces variations de posture dans un système d'imagerie 3D pour les porcs. Li *et al.* (2023) ont quant à eux identifié jusqu'à 12 micro-postures pour caractériser les bovins en engraissement, ce qui leur a permis de corriger certaines variations des mesures. Cependant, malgré ces avancées, des erreurs subsistent, mettant en évidence la complexité de l'automatisation des mesures sur des animaux en mouvement. Néanmoins, les efforts de recherche pour limiter ces erreurs sont cruciaux pour exploiter pleinement les avantages des dispositifs d'imagerie 3D tel que Deffilait3D, sous peine d'être rejetés par les utilisateurs.

Conclusion

Cette étude visait à évaluer l'impact de la posture des vaches sur les mesures morphologiques obtenues à partir d'images en trois dimensions, en travaillant en priorité sur l'une d'entre elles, la hauteur au garrot, qui a souvent présenté des erreurs de répétabilité et reproductibilité très fortes par le passé. Les résultats des deux essais réalisés démontrent l'influence significative de la position de la tête sur la mesure de la hauteur au garrot, tandis que les mesures à l'arrière de l'animal telles que la hauteur au sacrum restent relativement stables quelle que soit la position de la tête. Ainsi, lorsque l'animal baisse la tête, la hauteur au garrot diminue, ce qui augmente l'erreur de cette mesure morphologique. Les analyses montrent que la correction des mesures morphologiques en tenant compte de la position de la tête est réalisable, avec deux approches différentes, et ce, de manière assez aisée. Cette correction contribue à améliorer la précision des mesures morphologiques, notamment celle de la hauteur au garrot.

Cependant, la posture des vaches ne se résume pas uniquement à la position de la tête, et d'autres variations de posture peuvent également influencer les mesures morphologiques, notamment la position des pattes lors de l'acquisition. Tout ceci pourrait permettre à l'avenir de s'affranchir de bloquer les animaux dans une posture spécifique pour la collecte des données, ce qui est essentiel dans un système de captation d'imagerie 3D tel que Deffilait3D, visant à minimiser la manipulation de l'animal pour réduire le stress et les risques de blessures.

Par conséquent, et pour une utilisation plus étendue du dispositif avec des animaux en mouvement, il reste à déterminer une position de référence pour l'animal, ainsi que l'impact de différentes variations de posture par rapport à cette référence sur les mesures morphologiques. Cette recherche ouvre la voie à de futures investigations dans ce domaine passionnant de l'imagerie 3D appliquée à l'étude de la morphologie animale.

Références bibliographiques

3Dnatives. 2019. *Scanner laser 3D VS scanner à lumière structurée : lequel choisir ?* <https://www.3dnatives.com/scanner-laser-3d-ou-lumiere-structuree-08082019/> (Consulté le 6 juillet 2023)

Abdul Jabbar, K., Hansen, M.F., Smith, M.L. et Smith, L.N. 2017. Early and non-intrusive lameness detection in dairy cows using 3-dimensional video. *Biosystems Engineering*, 153, p. 63-69. DOI : 10.1016/j.biosystemseng.2016.09.017

Agarwal P., Arge L. et Yi K. 2005. I/O-Efficient Construction of Constrained Delaunay Triangulations. Dans : *Proceedings of the Thirteenth European Symposium on Algorithms – ESA 2005*. Palma de Mallorca, Espagne, p. 355-366. DOI : 10.1007/11561071_33

Agreste. 2022. *Statistique agricole annuelle 2021 – chiffres définitifs*. https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2215/cd2022-15_SAA_2021D%C3%A9finiifV2.pdf (Consulté le 23 mai 2023)

Agreste. 2023a. *Population agricole, formation et recherche* https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/GraFra2022Chap4.2/GraFra2022_conditions-de-travail_Chapitre4.pdf (Consulté le 23 mai 2023)

Agreste. 2023b. *Exploitations, foncier, installation*. https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/GraFra2022Chap2.1/GraFra2022_exploitations-en-france.pdf (Consulté le 23 mai 2023)

Allain C., Duroy S., Alix E., Dassé B., Delaunay M. et Langlais J. 2012. Utilisation des capteurs et des TIC en élevage laitier : Une nouvelle dimension pour la conduite du troupeau. Conférence SPACE 2012

Anglart D. 2010. *Automatic estimation of body weight and body condition score in dairy cow using 3D imaging technique*. Uppsala, Suède : Swedish University of Agricultural Sciences. DOI : 10.13140/RG.2.2.26909.26084

Arias Hernandez N., Molina M.L. et Gualdrón O. 2004. Estimate of the weight in bovine livestock using digital image processing and neural network. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 5622, p. 224-228. DOI: 10.1117/12.590779

Auguie B. 2017. *GridExtra: Miscellaneous Functions for "Grid" Graphic*. <https://CRAN.R-project.org/package=gridExtra> (Consulté le 02 septembre 2023)

Bamji C., O'Connor P., Elkhatib T., Mehta S., Thompson B., Prather L., Snow D., Akkaya O., Daniel A., Payne A., Perry T., Fenton M. et Chan V.-H. 2015. A 0.13 μm CMOS System-on-Chip for a 512 \times 424 Time-of-Flight Image Sensor with Multi-Frequency Photo-Demodulation up to 130 MHz and 2 GS/s ADC. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 50, p. 303-319. DOI : 10.1109/JSSC.2014.2364270

Bartoli A. 2003. *Reconstruction et alignement en vision 3D : points, droites, plans et caméras*. (Thèse en interface homme-machine). Grenoble, France : Institut National Polytechnique de Grenoble, 267 p. <https://theses.hal.science/tel-00004360v1/document>

Bazin S. 1984. *Grille de notation de l'état d'engraissement des vaches Pie Noires*. Paris, France : ITEB Institut technique de l'élevage bovin, 31p.

- Bewley J.** 2010. Precision Dairy Farming: Advanced Analysis Solutions for Future Profitability. Dans : *The First North American Conference on Precision Dairy Management*. Toronto, Canada, 16 p. <http://precisiondairy.com/proceedings/s1bewley.pdf> (Consulté le 26 avril 2023)
- Cantalapiedra-Hijar G., Faverdin P., Friggens N. et Martin P.** 2020. Efficience Alimentaire : comment mieux la comprendre et en faire un élément de durabilité de l'élevage. *INRAE Productions Animales*, 33 (4), p. 235-248. DOI : 10.20870/productions-animales.2020.33.4.4594
- Chastand-Maillard S. et Saint-Dizier M.** 2016. *Elevage de précision*. Paris, France : Editions France Agricole, 253 p. ISBN : 978-2-85557-460-8.
- Chatellier V., Lelyon B., Perrot C. et You G.** 2013. Le secteur laitier français à la croisée des chemins. *INRAE Productions Animales*, 26 (2), p. 77-100. DOI : 10.20870/productions-animales.2013.26.2.3138
- DeLaval.** 2023. *Note d'état corporel DeLaval BCS*. <https://www.delaval.com/fr-be/decouvrez-nos-solutions/gestion-de-troupeau/delaval-delpro/precision-analytics/note-detat-corporel-delaval-bcs/> (Consulté le 30 juin 2023)
- Depuille L.** 2018. *L'imagerie 3D, un nouvel outil de phénotypage pour de nouveaux indicateurs morphologiques : surface volume*. (Mémoire de fin d'études en agronomie). Bordeaux, France : Bordeaux Sciences Agro. 50p.
- Direction des statistiques, des études et fonds.** 2019. *Les statistiques des risques professionnels des non-salariés et des chefs d'exploitation agricole. Données nationales 2017*. Paris, France : MSA Caisse Centrale, 21p.
- Du A., Guo H., Lu J., Su Y., Ma Q., Ruchay A., Marinello F. et Pezzuolo A.** 2022. Automatic livestock body measurement based on keypoint detection with multiple depth cameras. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, p. 107059. DOI : 10.1016/j.compag.2022.107059
- Dumesny M.** 2021. *Suivi de l'évolution des réserves corporelles chez la génisse laitière par Imagerie 3D : un outil de prévention des réformes précoces ?* (Mémoire de fin d'études en agronomie). Rennes, France : Agrocampus Ouest, 20 p.
- Earle D.** 1976. Guide to scoring dairy cow condition. *Journal of Agriculture*, 74, p. 228-231.
- Edmonson A.J., Lean I.J., Weaver L.D., Farver T. et Webster G.** 1989. A Body Condition Scoring Chart for Holstein Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 72 (1), p. 68-78. DOI : 10.3168/jds.S0022-0302(89)79081-0
- Enevoldsen C. et Kristensen T.** 1997. Estimation of Body Weight from Body Size Measurements and Body Condition Scores in Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 80 (9), p. 1988-1995. DOI : 10.3168/jds.S0022-0302(97)76142-3
- FAO.** 2015. *GLEAM 3.0 - Évaluation des émissions de gaz à effet de serre et du potentiel d'atténuation*. <https://www.fao.org/gleam/results/fr/> (Consulté le 24 mai 2023)
- Fisher A., Luginbuhl T., Delattre L., Delouard J.M. et 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 (7), p. 4465-4476. DOI: 10.3168/jds.2014-8969

- Floch J. et Ben Trad I.** 2017. *Conception d'une antenne implantable pour un capteur vaginal*. https://www.researchgate.net/profile/Jean-Floch/publication/320629030_Conception_d'une_antenne_implantable_pour_un_capteur_vaginal/links/59f2f4f8a6fdcc1dc7bb344d/Conception-dune-antenne-implantable-pour-un-capteur-vaginal.pdf (Consulté le 1er juin 2023)
- Fox J. Weisberg S.** 2019. *An R Companion to Applied Regression*. <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/> (Consulté le 02 septembre 2023)
- France Génétique Elevage.** 2011a. *Les objectifs de sélection*. <http://fr.france-genetique-elevage.org/Les-objectifs-de-selection.html> (consulté le 25 mai 2023)
- France Génétique Elevage.** 2011b. *La génomique*. <http://fr.france-genetique-elevage.org/La-genomique.html> (consulté le 25 mai 2023)
- Friggens N.C., Blanc F., Berry D.P. et Puillet L.** 2017. Review: Deciphering animal robustness. A synthesis to facilitate its use in livestock breeding and management. *Animal*, 11 (12), p. 2237-2251. DOI : 10.1017/S175173111700088X
- Gardenier J., Underwood J. et Clark C.** 2018. Object detection for cattle gait tracking. Dans : *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Brisbane, Australie, p. 2206 - 2213. DOI : 10.1109/ICRA.2018.8460523
- Gruber L., Ledinek M., Steininger F., Fuerst-Waltl B., Zottl K., Royer M., Krimberger K., Mayerhofer M. et Egger-Danner C.** 2018. Body weight prediction using body size measurements in Fleckvieh, Holstein, and Brown Swiss dairy cows in lactation and dry periods. *Archives Animal Breeding*, 61 (4), p. 413-424. DOI : 10.5194/aab-61-413-2018
- Halachmi I., Guarino M., Bewley J. et Pastell M.** 2019. Smart Animal Agriculture: Application of Real-Time Sensors to Improve Animal Well-Being and Production. *Annual Review of Animal Biosciences*, 7 (1), p. 403-425. DOI : 10.1146/annurev-animal-020518-114851.
- Hansen M.F., Smith M.L., Abdul Jabbar K. et Forbes D.** 2018. Automated monitoring of dairy cow body condition, mobility and weight using a single 3D video capture device. *Computers in Industry*, 98, p. 14-22. DOI : 10.1016/j.compind.2018.02.011
- Heinrichs A.J., Rogers G.W. et Cooper J.B.** 1992. Predicting body weight and wither height in Holstein Heifer using body measurements. *Journal of Dairy Science*, 75 (12), p. 3576-3581.
- Heinrichs A. J. et Lammers B.** 1998. *Monitoring Dairy Heifer Growth*. State College, Etats-Unis : PennState, College of Agricultural Sciences, 12p.
- Herd D.B. et Sprott L.R.** 1986. *Body condition, nutrition and reproduction of beef cows*. College Station, Etats-Unis : Texas AgriLife Extension Service, The Texas A&M University System, 11p.
- Hocquette J.F., Capel C., David D., Guemene D., Bidanel J., Barbezant M., Gastinel P.L., Le Bail P.Y., Monget P., Mormede P., Peyraud J.L., Ponsart C. et Guillou F.** 2011. Les objectifs et les applications d'un réseau organisé de phénotypage pour les animaux d'élevage. Dans : *Rencontre autour des Recherches sur les Ruminants*. Paris, France, p. 327-334.
- Hoffman P.C.** 1997. Optimum body size of Holstein replacement heifers. *Journal of Animal Science*, 75 (3), p. 836-845. DOI : 10.2527/1997.753836x

Hostiou N., Allain C., Chauvat S., Turlot A., Pineau C. et Fagon J. 2014. L'élevage de précision : quelles conséquences pour le travail des éleveurs ? *INRAE Productions Animales*, 27 (2), p. 113-122. DOI : 10.20870/productions-animales.2014.27.2.3059

Hothorn T., Bretz F. et Westfall P. 2008. Simultaneous Inference in General Parametric Models. *Biometrical Journal*, 50 (3), p. 346-363.

Huang L., Li S., Zhu A., Fan X., Zhang C. et Wang H. 2018. Non-Contact Body Measurement for Qinchuan Cattle with LiDAR Sensor. *Sensors*, 18 (9), p. 3014. DOI : 10.3390/s18093014

Idele. 2010. *Valorisations de l'identification électronique en élevage.* https://idele.fr/identification-tracabilite/publications/detail-article?tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Baction%5D=showArticle&tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Bcontroller%5D=Detail&tx_atolidelecontenus_publicationdetail%5Bpublication%5D=334&cHash=97911f3ee91b7c6ded73635541457c79 (Consulté le 30 mai 2023).

Idele. 2015. *Mieux comprendre l'efficience alimentaire des vaches laitières.* https://idele.fr/umt-ebis/?eID=cmis_download&oID=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2F86e1b5e6-b378-4653-bfac-a791e30ca82b&cHash=d8c4b522238427fc2fa692a7e8607d74 (Consulté le 24 mai 2023)

Idele. 2019. *Dossier coûts de productions multi-filières – Economie de l'élevage.* https://idele.fr/fileadmin/medias/Documents/Collection_resultats_annuels_Reseaux_elevage/DEE_Couts_de_production_-_Multifilieres_-_n_501_-_Septembre_2019.pdf (Consulté le 23 mai 2023)

Idele. 2022. *Phéno3D – Pesée et pointage des veaux de races allaitantes au sevrage par imagerie 3D.* https://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2Fb27e7b1a-b13f-4d1a-8e2e-b387cfc0e2c6&cHash=f3ce196071964b69d05abc65b27934e5 (Consulté le 30 juin 2023)

Intel RealSense. 2019. *Beginner's guide to depth (Updated).* <https://www.intelrealsense.com/beginners-guide-to-depth/> (Consulté le 10 septembre 2023).

ISO. 1994. *ISO 5725-1:1994 Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure — Partie 1: Principes généraux et définitions.* <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:5725:-1:ed-1:v1:fr>

ISO. 2006. *ISO 3534-2:2006 Statistique — Vocabulaire et symboles — Partie 2: Statistique appliquée.* <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:3534:-2:ed-2:v1:fr:term:3.3.8>

Jones C.M. et Heinrichs A.J. 2022. *Growth Charts for Dairy Heifers.* <https://extension.psu.edu/growth-charts-for-dairy-heifers> (Consulté le 1er septembre 2023)

Kazhdan M., Bolitho M. et Hoppe H. 2006. *Poisson surface reconstruction.* <https://hhoppe.com/poissonrecon.pdf> (Consulté le 04 juillet 2023).

Kertz A.F., Barton B.A. et Reutzel L.F. 1998. Relative Efficiencies of Wither Height and Body Weight Increase from Birth Until First Calving in Holstein Cattle. *Journal of Dairy Science*, 81 (5), p. 1479-1482. DOI : 10.3168/jds.S0022-0302(98)75712-1

Kuzuhara Y., Kawamura K., Yoshitoshi R., Tamaki T., Sugai S., Ikegami M., Kurokawa Y., Obitsu T., Okita M., Sugino T. et 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, p. 186-193.

Lagarrigue S. et Tixier-Boichard M. 2011. Nouvelles approches de phénotypage pour la sélection animale. *INRA Productions Animales*, 24 (4), p. 377-386.

Lajudie P., Berrechet P., Robergeot F., Deconchat P., Tournadre O., Roy M., Gout P. Roussie C., Hanriot J.-C. et Laloe D. 2014. *Guide pratique du pointage des bovins de race à viande, du sevrage à l'âge adulte*. Paris, France : Institut de l'élevage, 73p. ISBN : 978-2-36343-489-0.

Lang A., Dupraz P., Tregaro Y., Rosner P.-M. et Perrot C. 2015. Les emplois directs et indirects liés à l'élevage français. Dans : *4^{ème} Rencontres nationales « travail en élevage »*. Dijon, France, 4 p. <https://hal.inrae.fr/hal-02738788>.

Lebreton A. 2020. *Estimation des variations des contenus ruminiaux par imagerie 3D : validation et application à l'étude de l'efficacité alimentaire*. (Mémoire de fin d'études en agronomie). Rennes, France : Agrocampus Ouest. 20 p.

Lebreton A., Allain C., Delattre L., Loof J. et Bruyas M. 2023. Validation of a high-throughput movable 3D device for the acquisition of the whole cattle body. Dans : *European Federation of Animal Science*. Lyon, France.

Le Cozler Y., Allain C., Caillot A., Delouard J.M., Delattre L., Luginbuhl T. et Faverdin P. 2019a. High-precision scanning system for complete 3D cow body shape imaging and analysis of morphological traits. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, p. 447-453. DOI : 10.1016/j.compag.2019.01.019

Le Cozler Y., Allain C., Xavier C., Depuille L., Caillot A., Delouard J.M., Delattre L., Luginbuhl T. et Faverdin P. 2019b. Volume and surface area of Holstein dairy cows calculated from complete 3D acquired using a high-precision scanning system : Interest for body weight estimation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 165, p.104977. DOI : 10.1016/j.compag.2019.104977

Le Cozler Y., Brachet E., Bourguignon L., Delattre L., Luginbuhl T. et Faverdin P. 2022. Three-dimensional (3D) imaging technology to monitor growth and development of holstein heifers and estimate body weight, a preliminary study, *Sensors* 22(12), p. 4635. DOI : 10.3390/s22124635

Leroy T., Aerts J.M., Eeman J., Maltz E., Stojanovski G. et Berckmans D. 2005. Automatic determination of body condition score of cows based on 2D images. Dans : Cox S. (éd). *Precision livestock farming '05*. Wageningen, Pays-Bas : Wageningen Academic Publisher, p. 251-255. ISBN : 978-90-76998-68-8

Leudet O., Besson J.-L., Laviron J. et Herve A. 2005. Valorisation technique des données du contrôle des performances des bovins viande. Dans : *Rencontre autour des Recherches sur les Ruminants*. Paris, France, p. 353.

Li J., Ma W., Bai Q., Tulpan D., Gong M., Sun Y., Xue X., Zhao C. et Li Q. 2023. A posture-based measurement adjustment method for improving the accuracy of beef cattle body size measurement based on point cloud data. *Biosystems Engineering*, 230, p. 171-190. DOI : 10.1016/j.biosystemseng.2023.04.014

- Ling Y., Jimin Z., Caixing L., Xihong T. et Sumin Z.** 2022. Point cloud-based pig body size measurement featured by standard and non-standard postures. *Computers and Electronics in Agriculture*, 199, p. 107135. DOI : 10.1016/j.compag.2022.107135
- Luo X., Hu Y., Gao Z., Guo H et Su Y.** 2023. Automated measurement of livestock body based on pose normalisation using statistical shape model. *Biosystems Engineering*, 277, p. 36-51. DOI : 10.1016/j.biosystemseng.2023.01.016
- Martins B.M., Mendes A.L.C., Silva L.F., Moreira T.R., Costa J.H.C. Rotta P.P., Chizzotti M.L. et Marcondes M.I.** 2020. Estimating body weight, body condition score, and type traits in dairy cows using three dimensional cameras and manual body measurements. *Livestock Science*, 236 (11), p.104054. DOI : 10.1016/j.livsci.2020.104054.
- MathWorks.** 2023. *3D Image Processing- MATLAB & Simulink*. <https://fr.mathworks.com/solutions/image-video-processing/3d-image-processing.html> (Consulté le 22 juin 2023)
- Maumont M.** 2010. L'espace 3D : de la photogrammétrie à la lasergrammétrie. *In Situ. Revue des patrimoines*, 13, 25 p. DOI : 10.4000/insitu.6413
- Monget P. et Le Bail P.-Y.** 2009. Le phénotypage des animaux : le nouveau défi ? Dans : *Rencontre autour des Recherches sur les Ruminants*. Paris, France. p. 407-409.
- Moreau J.C., Poisson S., Gate P., Lacroix B., Lorgeou J., Ruget F.** 2010. *Impacts du changement climatique sur les systèmes d'élevage et les grandes cultures : résultats du programme ACTA 2007-2009*. Versailles, France : Climator 2010, 5 p.
- Mottet A.** 2022. Elevage et objectifs de développement durable : enjeux et opportunités. *Viandes & Produits Carnés*, 8 p.
- Mullins I.L., Truman C.M., Campler M.R., Bewley M. et Cost, J.H.C.** 2019. Validation of a commercial automated body condition scoring system on a commercial dairy farm. *Animals*, 9 (6), p. 287. DOI : 10.3390/ani9060287
- Orteu J.J.** 2007. *Imagerie : Calibrage géométrique d'une caméra ou d'un capteur de vision stéréoscopique*. http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/pdf/OPI_fr_M04_C01.pdf (Consulté le 17 mai 2023)
- Petit M., Agabriel J.** 1993. Etat corporel des vaches allaitantes Charolaises : signification, utilisation pratique et relations avec la reproduction. *INRA Productions Animales*, 6 (5), p. 311-318.
- Peyraud J.L. et Phocas F.** 2014. Dossier : Phénotypage des animaux d'élevage. *INRA Productions Animales*, 27 (3), p. 179-181. DOI : 10.20870/productions-animales.2014.27.3.3065
- Phocas F., Agabriel J., Dupont-Nivet M., Geurden I., Médale F., Grasteau S., Gilbert H. et Dourmad J.-Y.** 2014a. Le phénotypage de l'efficacité alimentaire et de ses composantes, une nécessité pour accroître l'efficacité des productions animales. *INRA Productions Animales*, 27 (3), p. 235-248. DOI : 10.20870/productions-animales.2014.27.3.3070
- Qiao Y., Guo Y, Yu K., et He D.** 2022. C3D-ConvLSTM based cow behaviour classification using video data for precision livestock farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 193, 11p. DOI : 10.1016/j.compag.2021.106650.
- R Project.** 2022. *R: The R Project for Statistical Computing*. <https://www.r-project.org/> (Consulté le 2 septembre 2023)

R Studio. 2023. *R-Studio*. <https://www.r-studio.com/fr/> (Consulté le 24 août 2023)

Rastoin J.-L. et Gherzi G. 2010. *Le système alimentaire mondial : Concepts et méthodes, analyses et dynamiques*. Versailles, France : Editions Quae, 565p. ISBN 978-2-7592-0610-0.

Robelin J. 1986. Growth of adipose tissues in cattle; partitioning between depots, chemical composition and cellularity. A review. *Livestock Production Science*, 14 (4), p. 349-364. DOI : 10.1016/0301-6226(86)90014-X

Ruchay A.N., Dorofeev K.A., Kalschikov V.V., Kolpakov V.I. et Dzhulamanov K.M. 2020. Accurate 3D shape recovery of live cattle with three depth cameras. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179, 11 p. DOI : 10.1016/j.compag.2020.105821

Salau J., Haas J., Junge W., Bauer U., Harms J. et Bielecki S. 2014. Feasibility of automated body trait determination using the SR4K time-of-flight camera in cow barns. *SpringerPlus*, 3 (1), p. 225-241. DOI : 10.1186/2193-1801-3-225

Salau J., Haas J., Junge W., Thaller G. 2017. A multi-Kinect cow scanning system: Calculating linear traits from manually marked recordings of Holstein-Friesian dairy cows. *Biosystems Engineering*, 157, p. 92-98. DOI : 10.1016/j.biosystemseng.2017.03.001

Schlageter-Tello A., Van Hertem T., Bokkers E.A.M., Viazzi S., Bahr, C. et Lokhorst K. 2018. Performance of human observers and an automatic 3-dimensional computer-vision-based locomotion scoring method to detect lameness and hoof lesions in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 101 (7), p.6322-6335. DOI : 10.3168/jds.2017-13768

Schröder U.J. et Staufenbiel R. 2006. Invited Review: Methods to Determine Body Fat Reserves in the Dairy Cow with Special Regard to Ultrasonographic Measurement of Backfat Thickness. *Journal of Dairy Science*, 89 (1), p. 1-14. DOI : 10.3168/jds.S0022-0302(06)72064-1

Song X., Bokkers E.A.M., van der Tol P.P.J., Groot Koerkamp P.W.G. et van Mourik S. 2018. Automated body weight prediction of dairy cows using 3-dimensional vision. *Journal of Dairy Science*, 101 (5), p. 4448-4459. DOI : 10.3168/jds.2017-13094

Spoliansky R., Edan Y., Parmet Y. et Halachmi I. 2016. Development of automatic body condition scoring using a low-cost 3-dimensional Kinect camera. *Journal of Dairy Science*, 99 (9), p. 7714-7725. DOI : 10.3168/jds.2015-10607

Steinfeld, H., Haan, C. d., Rosales M., M., Rosales, M., Wassenaar, T. D., Gerber, P., Castel, V. 2006. *Livestock's long shadow : environmental issues and options*. Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN 9789251055717, 9251055718.

Tasdemir S., Urkmez A. et Inal S. 2011. Determination of body measurements on the Holstein cows using digital image analysis and estimation of live weight with regression analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76 (2), p. 189-197. DOI : 10.1016/j.compag.2011.02.001

Valerga A.P., Jimenez-Rodriguez R.A., Fernandez-Vidal S. et Fernandez-Vidal S.R. 2020. Photogrammetry as an Engineering Design Tool. Dans : Alexandru C., Jaliu C. et Comșit M. (éd.). *Product Design*. Londres, Royaume-Uni : IntechOpen, 24 p. ISBN: 978-1-83968-213-1

Van Hertem T., Viazzi S., Steensels M., Maltz E., Antler A., Alchanatis V., Schlageter Tello A., Lokhorst K. et Romanini E.C.B. 2014. Automatic lameness detection based on consecutive 3d-video recordings. *Biosystems Engineering*, 119, p.108-116. DOI : 10.1016/j.biosystemseng.2014.01.009

- Viazzi S., Bahr C., Van Hertem T., Schlageter-Tello A.A., Romanini E.B.C., Halachmi I., Lokhorst C. et Berckmans D.** 2014. Comparison of a three-dimensional and two-dimensional camera system for automated measurement of back posture in dairy cows. *Computers and Electronics in Agriculture*, 100, p. 139-147. DOI : 10.1016/j.compag.2013.11.005
- Wang Y., Mücher S., Wang W., Guo L. et Kooistra L.** 2023. A review of three-dimensional computer vision used in precision livestock farming for cattle growth management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 206, p. 107687. DOI : 10.1016/j.compag.2023.107687
- Wickham H.** 2016. *Ggplot2 : Elegant Graphics for Data Analysis*. <https://ggplot2.tidyverse.org/> (Consulté le 02 septembre 2023)
- Wickham H., François R., Henry L. et Müller K.** 2022. *A Grammar of Data Manipulation*. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr> (Consulté le 02 septembre 2023)
- Wiener G. et Rouvier R.** 2009. *L'amélioration génétique animale*. Versailles, France : Editions Quae, 280 p. ISBN 978-2-7592-0300-0.
- World Commission on Environment and Development.** 1987. *Our Common Future*. Oxford, Royaume-Uni : Oxford University Press. 198 p.
- Wurtz K., Camerlink I, D'Eath R., Fernandez A.P., Norton T., Steibel J. et Siegford J.** 2019. Recording behaviour of indoor-housed farm animals automatically using machine vision technology: A systematic review. *PLOS ONE*, 14 (12), 35 p. DOI : 10.1371/journal.pone.0226669
- Xavier C.** 2019. *Utilisation de l'imagerie 3D pour suivre la croissance des vaches laitières, prédire les quantités ingérées et approcher l'efficacité alimentaire*. (Mémoire de fin d'études en agronomie). Rennes, France : Agrocampus Ouest. 19 p.
- Xavier C., Le Cozler Y., Depuille L., Caillot A., Lebreton A., Allain C., Delouard J.M., Delattre L., Luginbuhl T., Faverdin P. et Fischer A.** 2022. The use of 3-dimensional imaging of Holstein cows to estimate body weight and monitor the composition of body weight change throughout lactation. *Journal of Dairy science*, 105 (5), p. 4508-4519. DOI : 10.3168/jds.2021-21337
- Yang G., Xu X., Song L., Zhang Q., Duan Y. et Song H.** 2022. Automated measurement of dairy cows body size via 3D point cloud data analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 200, 14 p. DOI : 10.1016/j.compag.2022.107218
- Yukun S., Pengju H., Yujie W., Ziqi C. Yang L., Baisheng D., Runze L. et Yonggen Z.** 2019. Automatic monitoring system for individual dairy cows based on a deep learning framework that provides identification via body parts and estimation of body condition score. *Journal of Dairy Science*, 102 (11), p. 10140-10151. DOI : 10.3168/jds.2018-16164
- Zheng Z., Zhang X., Qin L., Yue S. et Zeng P.** 2023. Cows' legs tracking and lameness detection in dairy cattle using video analysis and Siamese neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 205, 9 p. DOI : 10.1016/j.compag.2023.107618
- Zwertvaegher I., Baert J., Vangeyte J., De Vlieghe S., Genbrugge A. et Van Weyenberg S.** 2010. 2D vision based measuring device for teat morphology in dairy cows. Dans : *Production Diseases in Farm Animals, 14th International conference, Proceedings*. Ghent, Belgique : Ghent University, p.103-103. <http://hdl.handle.net/1854/LU-1057193>

Annexes

Annexe 1 : Description des vaches utilisées dans les essais 1 (Tableau a) et 2 (Tableau b)

Tableau a

Numéro	PL (kg) ⁽¹⁾
6231	37,4
6240	38,9
7211	36,7
7253	31,3

PL la production laitière

(1) PL moyenne sur la période de décembre 2020 à mars 2021.

Tableau b

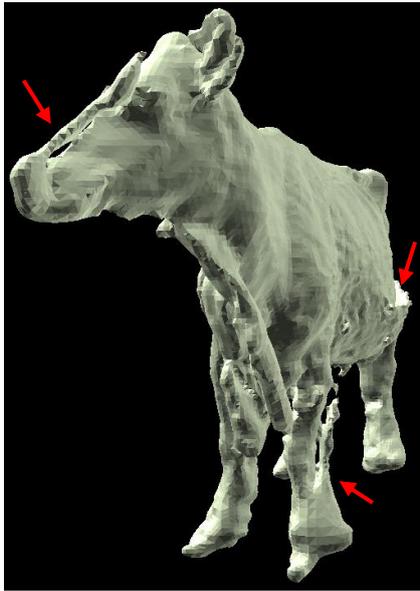
Numéro	Rang de lactation	Durée de lactation (jours)	PV (kg) ⁽¹⁾	PL (kg) ⁽¹⁾	NEC ⁽²⁾
3411	5	152	684,3	24,3	1,50
3429	6	124	682,3	32,0	1,50
6204	4	457	856,0	19,1	4,00
6254	4	474	716,6	18,6	2,25
7213	4	159	743,0	36,4	1,75
7221	4	194	746,6	29,2	1,75
7252	4	129	717,1	36,3	1,75
8309	2	473	766,0	13,8	2,75
8326	3	131	638,0	30,6	1,75
9239	2	243	631,2	21,4	1,75

PV le poids vif, et PL la production laitière

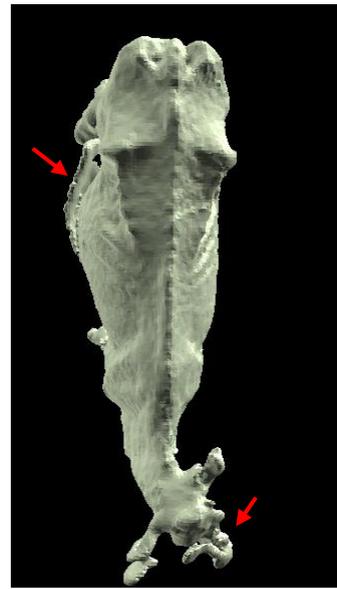
(1) : PV et PL moyens sur la période du 8 au 12 mai 2023

(2) : NEC au 2 mai 2023 selon la méthode définie par Bazin (1984)

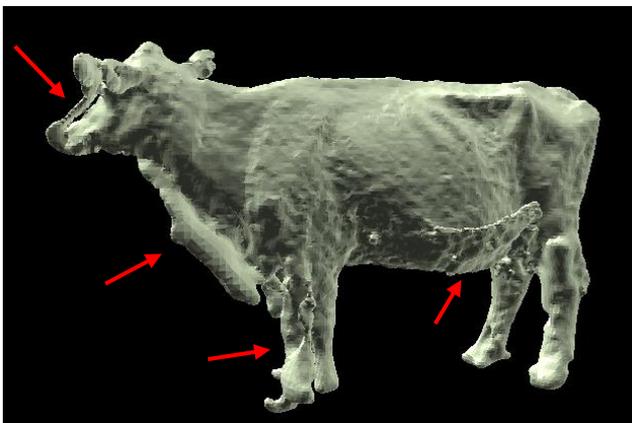
*Annexe 2 : Défaut de reconstruction sur les images 3D issues de l'essai 2
Les flèches rouges indiquent les zones présentant des défauts de reconstruction*



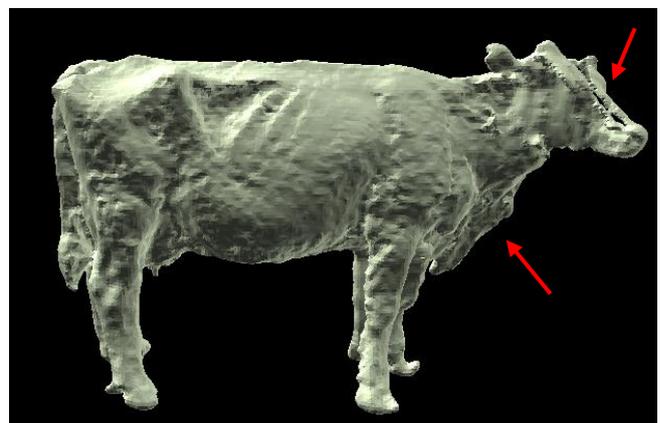
(a) Vue de face



(b) Vue du dessus



(c) Vue de profil (côté gauche)



(d) Vue de profil (côté droit)

Annexe 3 : Coefficients de variation (CV) de répétabilité (Tableau a) et de reproductibilité (Tableau b) détaillés.

Tableau a

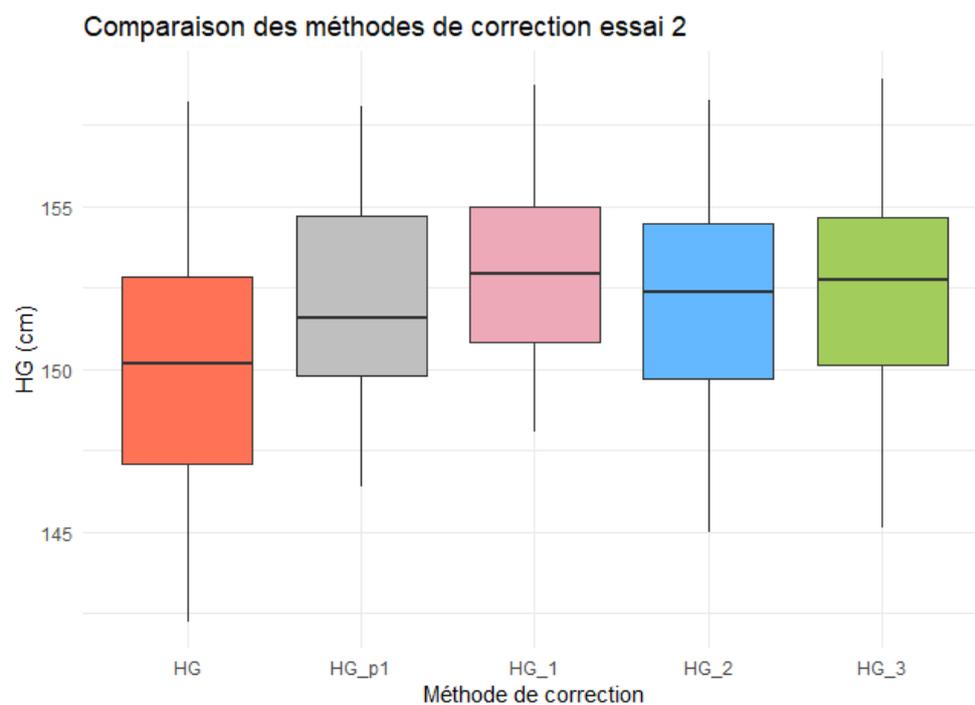
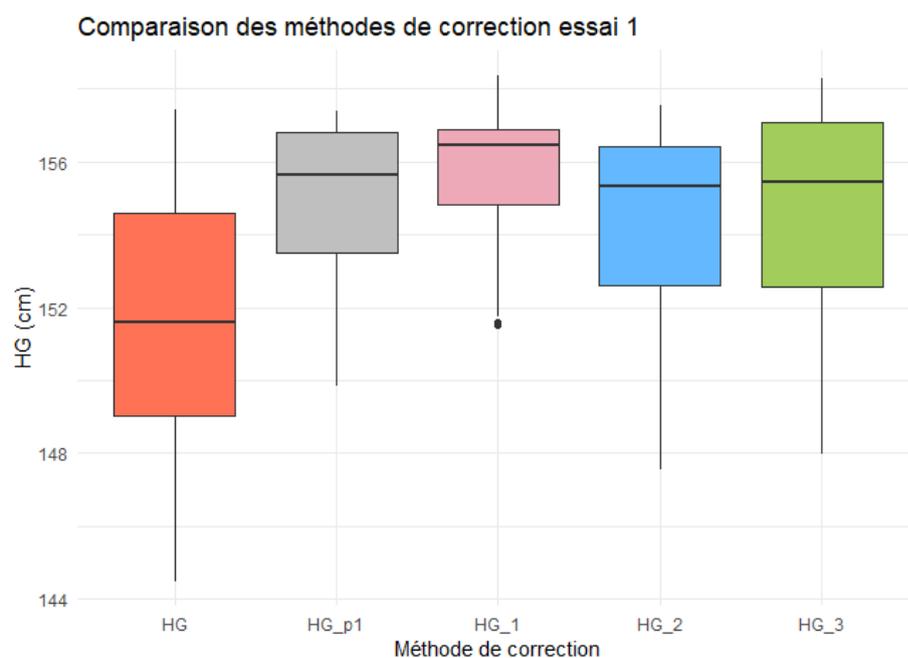
	Hauteur au garrot (cm)	Hauteur au sacrum (cm)	Hauteur aux hanches (cm)
Erreur	0,29	0,13	0,19
CV moyen (%)	0,20	0,08	0,12
CV 4253 (%)	0,08	0,09	0,08
CV 6231 (%)	0,03	0,07	0,08
CV 6258 (%)	0,14	0,06	0,16
CV 7212 (%)	0,15	0,13	0,14
CV 7247 (%)	0,19	0,02	0,11
CV 7264 (%)	0,17	0,08	0,14
CV 8348 (%)	0,24	0,10	0,14
CV 8359 (%)	0,38	0,06	0,14

Tableau b

	Hauteur au garrot (cm)	Hauteur au sacrum (cm)	Hauteur aux hanches (cm)
Erreur	2,40	0,38	0,81
CV moyen (%)	1,60	0,24	0,52
CV 6231 (%)	1,69	0,26	0,43
CV 6240 (%)	1,45	0,23	0,84
CV 7211 (%)	1,96	0,31	0,40
CV 7253 (%)	1,28	0,12	0,16

Annexe 4 : Comparaison des différentes méthodes de correction pour la hauteur au garrot (HG) brute (valeur absolue, en cm) sous forme de tableau, et de graphique.

	HG P1 (cm)	HG moyen (cm)	Méthode 1 : HG moyen (cm)	Méthode 2 : HG moyen (cm)	Méthode 3 : HG moyen (cm)
Essai 1	154,6 ± 2,9	151,6 ± 3,9	155,5 ± 2,3	154,1 ± 3,1	154,5 ± 3,1
Essai 2	152,3 ± 3,7	150,0 ± 3,7	153,1 ± 2,6	152,1 ± 3,5	152,3 ± 3,5



Annexe 5 : Equation de prédiction du poids vif des vaches Holstein (Le Cozler et al., 2019)

$$\text{Poids vif} = 812,1 * \text{Volume total (m}^3) - 51,4 * \text{Surface totale (m}^2) + 343,8 * \text{Largeur des fesses (m)} + 273,8 * \text{largeur des hanches (m)} + 208,8 * \text{profondeur de poitrine (m)} + 113,7 * \text{hauteur au garrot (m)} - 280,7$$

Annexe 6 : Script R de correction des mesures et comparaison des méthodes de correction

```
#### Importer les librairies
library(ggplot2)
library(dplyr)
library(purrr)
library(gridExtra)

# importer données
#data <- read.table(file.choose(),dec=",", h=T) # essai 1
env <- "C:/Users/Maeva/Documents/3e année/stage mémoire/stat/pré-essai"
data <- file.path(env, "data_preessai.txt")
data <- read.table(data, dec=",", h=T)

#data2 <- read.table(file.choose(),dec=",", h=T) # essai 2
env2 <- "C:/Users/Maeva/Documents/3e année/stage mémoire/stat/essai"
data2 <- file.path(env2, "hauteur_ss_5.txt")
data2<- read.table(data2, dec=",", h=T)

## convertir données en cm
data$HG <- round(data$HG /10,2)
data$HS <- round(data$HS /10,2)
data$HH_moyenne <- round(data$HH_moyenne /10,2)
data2$HG <- round(data2$HG /10,2)
data2$HS <- round(data2$HS /10,2)
data2$HH_moyenne <- round(data2$HH_moyenne /10,2)
## Créer une colonne HG position 1 essai 1
moyenne_HG_p1 <- data %>%
  filter(position == "1") %>%
  group_by(vache) %>%
  summarise(moyenne_HG_p1 = mean(HG))
data <- left_join(data, moyenne_HG_p1, by = "vache")

## Créer une colonne HG position 1 essai 2]
moyenne2_HG_p1 <- data2 %>%
  filter(position == 1) %>%
  group_by(vache) %>%
  summarise(moyenne2_HG_p1 = mean(HG))
data2 <- left_join(data2, moyenne2_HG_p1, by = "vache")

##### Méthode 1#####
#Remplacer la mesure de HG par HH => HG_1
# Essai 1 : Data
Data_corrigee <- data[,c("vache","position","angle_a", "HG","delta_prct","moyenne_HG_p1")]
Data_corrigee$HG_1 <- data$HH_moyenne

# Essai 2 : Data 2
Data_corrigee2 <- data2[,c("vache","position","angle_a", "HG","delta_prct" ,"moyenne2_HG_p1")]
Data_corrigee2$HG_1 <- data2$HH_moyenne

##### Méthode 2 #####
#Corriger la mesure HG en appliquant un % selon la position => HG_2
# Définir les intervalles d'angle et les pourcentages correspondants
intervalle_angle <- c(0, 15, 30, 45, 65)
pourcentage <- c(0, 1, 2, 3)

# Fonction pour calculer le pourcentage en fonction de l'angle
calculer_pourcentage <- fonction(angle) {
  pourcentage[findInterval(angle, intervalle_angle)]
}
#Essai 1
# Appliquer la correction à la colonne "HG"
Data_corrigee$HG_2 <- data$HG + data$HG * calculer_pourcentage(data$angle_a) / 100

#Essai 2
Data_corrigee2$HG_2 <- data2$HG + data2$HG * calculer_pourcentage(data2$angle_a) / 100
```



```

##### Méthode 3 #####
# Modélisation de la correction : HG_3
model <- lm(delta_prct ~ angle_a, data = data2) # regression avec données essai 2

# entraînement : prédiction des mesures HG pour l'essai 2
data2$predict_delta_prct <- predict(model)
Data_corrige2$HG_3 <- data2$HG / (1 + data2$predict_delta_prct / 100)

# validation avec l'essai 1 :
data$predict_delta_prct <- predict(model, newdata = data)
Data_corrige$HG_3 <- data$HG / (1 + data$predict_delta_prct / 100)

# Calculer les métriques d'évaluation pour le jeu de données de validation (essai 1)
rmse_data <- sqrt(mean((data$delta_prct - data$predict_delta_prct)^2))
mae_data <- mean(abs(data$delta_prct - data$predict_delta_prct))
r_squared_validation_data <- cor(data$predict_delta_prct, data$delta_prct)^2
cat("RMSE pour le jeu de données de validation:", rmse_data, "\n")
cat("MAE pour le jeu de données de validation:", mae_data, "\n")
cat("Coefficient de détermination (R²) pour les données de validation:", r_squared_validation_data, "\n")

# # Calculer les métriques d'évaluation pour la correction
mae_hg_corrige_data <- mean(abs(Data_corrige$HG_3 - data$moyenne_HG_p1))
cat("MAE entre HG_corrige et mean_HG_position1:", mae_hg_corrige_data, "\n")

mae_hg_corrige_data2 <- mean(abs(Data_corrige2$HG_3 - data2$moyenne2_HG_p1))
cat("MAE entre HG_corrige (data2) et mean_HG_position1:", mae_hg_corrige_data2, "\n")

ggplot(data, aes(x = delta_prct, y = predict_delta_prct)) +
  geom_point() +
  geom_abline(intercept = 0, slope = 1, color = "red", linetype = "dashed") +
  labs(title = "Valeurs Réelles vs Valeurs Prédites - Essai 1",
       x = "Valeurs Réelles (ΔHG en %)",
       y = "Valeurs Prédites (ΔHG en %)") +
  theme_minimal()

###Calcul des différences entre HG_p1 et HG corrigée
### Essai 1
Data_corrige$ΔHG <- Data_corrige$delta_prct
Data_corrige$ΔHG_p1 <- ((Data_corrige$moyenne_HG_p1 - Data_corrige$moyenne_HG_p1) / Data_corrige$moyenne_HG_p1) * 100
Data_corrige$ΔHG1 <- ((Data_corrige$HG_1 - Data_corrige$moyenne_HG_p1) / Data_corrige$moyenne_HG_p1) * 100
Data_corrige$ΔHG2 <- ((Data_corrige$HG_2 - Data_corrige$moyenne_HG_p1) / Data_corrige$moyenne_HG_p1) * 100
Data_corrige$ΔHG3 <- ((Data_corrige$HG_3 - Data_corrige$moyenne_HG_p1) / Data_corrige$moyenne_HG_p1) * 100

### Essai 2
Data_corrige2$ΔHG <- Data_corrige2$delta_prct
Data_corrige2$ΔHG_p1 <- ((Data_corrige2$moyenne2_HG_p1 - Data_corrige2$moyenne2_HG_p1) / Data_corrige2$moyenne2_HG_p1) * 100
Data_corrige2$ΔHG1 <- ((Data_corrige2$HG_1 - Data_corrige2$moyenne2_HG_p1) / Data_corrige2$moyenne2_HG_p1) * 100
Data_corrige2$ΔHG2 <- ((Data_corrige2$HG_2 - Data_corrige2$moyenne2_HG_p1) / Data_corrige2$moyenne2_HG_p1) * 100
Data_corrige2$ΔHG3 <- ((Data_corrige2$HG_3 - Data_corrige2$moyenne2_HG_p1) / Data_corrige2$moyenne2_HG_p1) * 100

##### Test de comparaison des méthodes #####
## ΔHG essai 1
# Sélectionner les colonnes pertinentes
Data_corrige_analyse <- Data_corrige %>%
  dplyr::select(vache, ΔHG, ΔHG_p1, ΔHG1, ΔHG2, ΔHG3)

# Convertir en format long
Data_corrige_analyse <- Data_corrige_analyse %>%
  pivot_longer(cols = c("ΔHG", "ΔHG_p1", "ΔHG1", "ΔHG2", "ΔHG3"),
              names_to = "methode_correction",
              values_to = "valeur")
print(Data_corrige_analyse)

# ANOVA
aov <- aov(valeur~methode_correction, data=Data_corrige_analyse)
summary(aov)
##vérification des conditions
#shapiro (p-value>0.05 = normalité)
shapiro.test(residuals(aov))
# homogénéité (p-value >0.05 = homogène )
Data_corrige_analyse$methode_correction <- as.factor(Data_corrige_analyse$methode_correction)
levene_test <- leveneTest(residuals(aov) ~ methode_correction, data = Data_corrige_analyse)
print(levene_test)
# afficher les différences entre significatives entre positions
comp <- lsmeans(aov, "methode_correction")
comp <- cld(comp, alpha = 0.05)
comp

```

