INRAE PRODUCTIONS ANIMALES

INRAE Prod. Anim., 2026, 39(3), 9995

# Le phénotypage morphologique par imagerie 2D et 3D optique ou à rayons X : quel intérêt pour la recherche et l'élevage des ruminants ?

*Yannick LE COZLER[1], Caroline XAVIER[2], Bruno MEUNIER[3], Anne DE LA TORRE[3], José PIRES[3], Emma DUDOUIT[4], Audrey TIERCIN[4], Adrien LEBRETON[5], Sylvain LERCH[4], Muriel BONNET[3]*

*[1]PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590, Saint-Gilles, France*
*[2]USC URSE, École Supérieure des Agricultures (ESA), INRAE, 49000, Angers, France*
*[3]Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgro Sup, UMR Herbivores, 63122, Saint-Genès-Champanelle, France*
*[4]Nutrition et émissions des ruminants, Agroscope, 1725, Posieux, Suisse*
*[5]Institut de l'Élevage – Idele, 75012, Paris, France*
*Courriel : yannick.lecozler@institut-agro.fr*

**Les technologies basées sur l'utilisation des images en élevage et en abattoir connaissent un essor important. Couplées aux méthodes d'analyses de grands ensembles de données, elles ouvrent un accès plus facile et rapide à davantage d'indicateurs, tels que des critères morphologiques, de composition de carcasse et de qualités de viande, pour une meilleure efficience des systèmes d'élevages bovins. Cet article s'intéresse surtout aux technologies basées sur l'imagerie non pénétrante en deux (2D) et trois (3D) dimensions[1].**

## Introduction

Dans de nombreuses exploitations, la collecte de données relatives à la morphologie des animaux et leur composition corporelle est essentielle pour le suivi de performances et pour adapter les pratiques et conduites d'élevages. En élevage laitier, les mesures de poids vif, de la hauteur au garrot ou de la largeur des hanches, par exemple, ont souvent été mises en avant pour suivre le développement corporel et les changements de morphologie au cours de la croissance ou au cours des différentes lactations (Maltz, 1997).

D'autres caractères comme la note d'état corporel (NEC) indiquent de manière indirecte l'état de l'adiposité périphérique, et une variation de NEC renseigne sur la mobilisation et l'accumulation des réserves corporelles (Banos *et al.*, 2005 ; Friggens *et al.*, 2011 ; Thorup *et al.*, 2012). Les méthodes traditionnellement utilisées pour estimer cette NEC sont basées sur une grille d'évaluation visuelle, couplée le plus souvent à une palpation de certaines zones (Bazin, 1984). En abattoir, les estimations de l'état d'adiposité des carcasses et de la teneur en graisse intramusculaire sont également déterminantes. La conformation et la couverture graisseuse des carcasses définissent leur valeur commerciale (Monteils *et al.*, 2017), alors que dans la viande bovine, une proportion minimale d'environ 2,5 % de lipides intramusculaires est nécessaire pour une bonne appréciation organoleptique par le consommateur français (Bonnet *et al.*, 2010a).

Ces métriques de morphologie, de composition du corps, de la carcasse ou de la viande, fournissent des repères pour formuler au mieux les régimes ou programmer des événements clés en élevage, comme la mise à la reproduction, ou l'abattage avec un niveau d'adiposité suffisant des carcasses bovines pour une rémunération optimale. Cependant malgré leur intérêt et importance, ces indicateurs sont assez peu utilisés, surtout en élevage, car ils nécessitent souvent des outils ou des compétences spécifiques, en plus d'être coûteux et parfois chronophages. Pour y faire face, ces outils de suivi ont évolué,

1 Cet article a fait l'objet d'une présentation aux Journées d'Animation Scientifique et 20 ans du département PHASE en novembre 2024. https://jasphase2024.journees.inrae.fr/

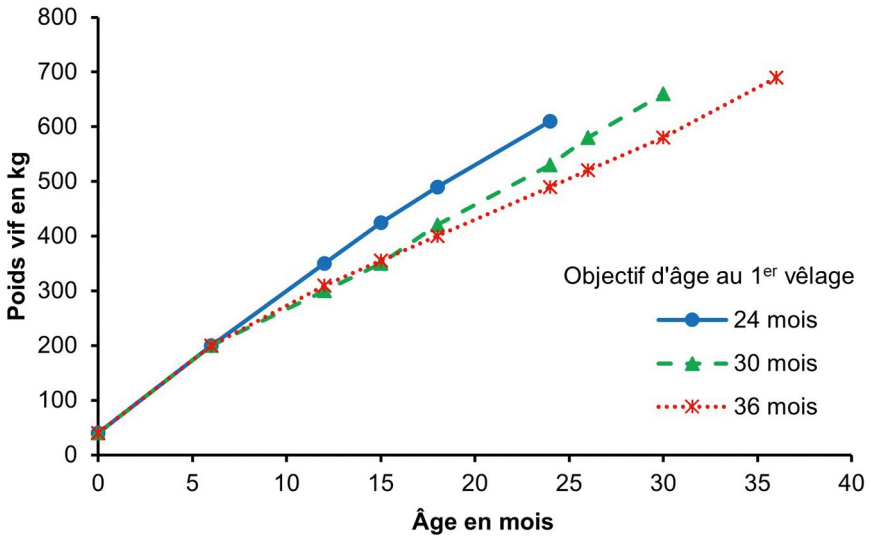
en lien avec l'apparition de nouvelles technologies et approches, basées entre autres sur l'acquisition d'images et leur traitement. Les outils de captation d'images comme les caméras ou les appareils photographiques offrent aujourd'hui la possibilité d'acquérir un grand nombre de données de façon automatique et de manière quasi continue, sans contact avec les animaux, ce qui limite les risques d'accident et de stress, pour les animaux et les hommes. Ces avancées technologiques sont aussi perceptibles en abattoir avec l'émergence de nouvelles méthodes basées sur l'œil de la machine et non plus sur celui de l'humain. Mais si « l'œil de la machine » peut permettre des observations plus objectives que « l'œil humain », ce dernier et la connaissance de l'animal par l'éleveur, le vétérinaire, le chercheur… seront toujours nécessaires pour valider les résultats de la machine. La multiplication d'usage des outils et méthodes d'imageries se réalise grâce à des prix toujours plus accessibles, des puissances de traitements d'images accrues ou encore, une fiabilité de plus en plus éprouvée.

Cet article s'intéresse plus particulièrement aux méthodes d'évaluation de la morphologie (poids et barymétrie) et de la composition du corps, des carcasses et des viandes, en abordant tout d'abord les méthodes de référence historiques et en présentant ensuite les méthodes de phénotypage utilisant des outils d'imagerie plus récents développés en élevages de ruminants, laitiers notamment, et en abattoirs bovins.

## 1. Intérêts portés à la morphologie et la composition corporelle : de l'élevage à l'abattoir

Le développement et la croissance des tissus chez les ruminants ne sont pas des processus linéaires et uniformes (Xavier *et al.*, 2022b). La croissance corporelle résulte à la fois d'une hyperplasie cellulaire (multiplication des cellules), en particulier dans les stades précoces de croissance, et d'une hypertrophie cellulaire (augmentation de la taille des cellules) des tissus qui composent le corps. Le développement est caractérisé par l'acquisition de fonctions nouvelles propres à chaque tissu. En général, chez le bovin, un développement important du tissu nerveux est observé pendant la vie utérine, suivi d'un développement du tissu osseux maximal au début de la vie postnatale, puis des tissus musculaires et enfin adipeux, avec un point d'inflexion de croissance aux environs de la puberté (Xavier *et al.*, 2022b). La croissance des tissus adipeux débute dès la vie fœtale et devient maximale dès que la croissance du muscle diminue, avec des spécificités de chronologie et de développement selon les sites anatomiques des tissus adipeux (Bonnet *et al.*, 2010b). Le squelette conditionne le format de l'animal et donc indirectement sa composition corporelle à un poids donné (Robelin, 1986 ; Pastoureau, 1990).

**Figure 1.** ***Exemples de courbes de croissance recommandée en fonction des stratégies d'âge au 1er vêlage en vache laitière de type Holstein.***




### ■ 1.1. Méthodes historiques et de référence : intérêts et limites

Le poids vif est l'un des indicateurs les plus anciens et les plus fréquemment utilisés pour suivre la croissance et le développement des animaux d'élevage, même si les outils pour le déterminer, tels que les bascules de pesée, sont assez peu présents en élevage (17,6 % des élevages bovins allaitants et 11,6 % des élevages bovins laitiers selon l'enquête réalisée en 2023 par l'Institut de l'Élevage) (Idele, 2024). Cette mesure permet d'établir des courbes de croissance recommandée pour différentes races et objectifs (figure 1). En élevage laitier ou allaitant, atteindre le poids vif cible permet une mise à la reproduction en lien avec les objectifs préalablement fixés.

Le poids vif est aussi utilisé lors de la vente des animaux destinés à la production de viande. Dans ce cas, le tissu musculaire, qui représente 35 à 45 % du poids vif des animaux, est le tissu « noble » des animaux domestiques élevés pour la production de viande (Robelin, 1990), tandis que le tissu adipeux va ajouter des critères de qualités pour la viande (valeur nutritionnelle, jutosité, flaveur). Pour l'éleveur, c'est le poids de carcasse (et donc indirectement, le poids vif) et la composition de la carcasse qui déterminent sa rémunération finale. Toutefois, ils ne sont connus qu'après abattage, lors de la pesée fiscale et de la classification de la carcasse suivant une grille visuelle (EUROP en France par exemple) ou *via* l'utilisation de machines à classer dans certains grands ateliers d'abattage. En ferme sur animaux vivants et en l'absence d'outils spécifiques, les possibilités de correction de conduite d'élevage ou d'alimentation sont alors plus difficiles à mettre en œuvre. Une mauvaise estimation du poids vif ou de la composition de la carcasse peut donc être pénalisante d'un point de vue économique.

Le système de classification des carcasses EUROP en Europe repose sur des critères généraux (sexe, âge, castration, conformation, graisse, et poids de la carcasse chaude). Toutefois, ce système ne reflète pas la complexité des carcasses, qui peuvent varier considérablement en termes de composition musculaire et de valeurs commerciales (Monteils *et al.*, 2017). Les travaux autour de la détermination des compositions tissulaires et chimiques sont relativement anciens, les premiers datant du milieu du XIX$^{e}$ siècle (Lawes & Gilbert, 1859, cités par Hedrick, 1983). Ces compositions de référence sont obtenues par différentes méthodes qui font aujourd'hui référence. La composition tissulaire est déterminée par dissections anatomiques pour séparer physiquement et peser les différents tissus de la carcasse (muscle, os et tissus adipeux), ainsi que des tissus et organes du 5$^{e}$ quartier (organes internes, tractus digestif, peau…). Les procédures normées de dissection n'empêchent cependant pas une variabilité de la mesure (Hedrick, 1983), en raison de techniques de dissection non standardisées et soumises à la technicité des opérateurs. La composition chimique est obtenue grâce à une analyse chimique après broyage et homogénéisation du matériel cible (muscle, carcasse ou corps vide une fois délesté des contenus digestifs, urine et conceptus). Ces étapes préalables sur un animal de grande taille nécessitent de travailler sur de grandes masses et de grands volumes à homogénéiser, nécessitant ainsi des équipements spécifiques (Xavier *et al.*, 2022b, 2023, 2024). Les analyses chimiques sont une référence souvent utilisée dans les articles, avec cependant un référencement des méthodes d'analyses chimiques qui devrait systématiquement être précisé lors de la publication.

Malgré la grande précision des méthodes de référence, des limites ou contraintes existent quant à leur utilisation à large échelle, en France ou à l'étranger. Que ce soit la dissection tissulaire ou l'analyse chimique des tissus corporels, ces méthodes sont chronophages, coûteuses en temps, appareillages, solvants ou de par la destruction d'une demi-carcasse, et elles requièrent différentes qualifications des opérateurs. En outre, ces méthodes pour estimer la composition corporelle, font référence dès lors qu'elles sont utilisées avec des procédures précises et définies. Elles restent donc difficiles à déployer à grande échelle, et sont souvent réservées à l'expérimentation à cause des nombreuses contraintes soulevées.

## ■ 1.2. Alternatives traditionnelles aux méthodes de référence

De nombreuses alternatives à ces méthodes de référence ont vu le jour, dans le but de diminuer le temps, le coût des analyses, la dangerosité pour les opérateurs, d'être plus facilement et largement utilisables, et au final, d'être plus objectives (c.-à-d. reproductibles et répétables). Le développement de ces méthodes alternatives satisfait aux considérations éthiques de plus en plus importantes, que ce soit en élevage ou recherche (bien-être animal, destruction d'aliments consommables par l'homme, impact environnemental). Ces alternatives visent aussi à réduire la pénibilité des interventions et tâches, que ce soit en élevage, en expérimentation ou en abattoir, tout en limitant les risques d'accidents et/ou de stress pour les animaux et les opérateurs.

### a. En expérimentation

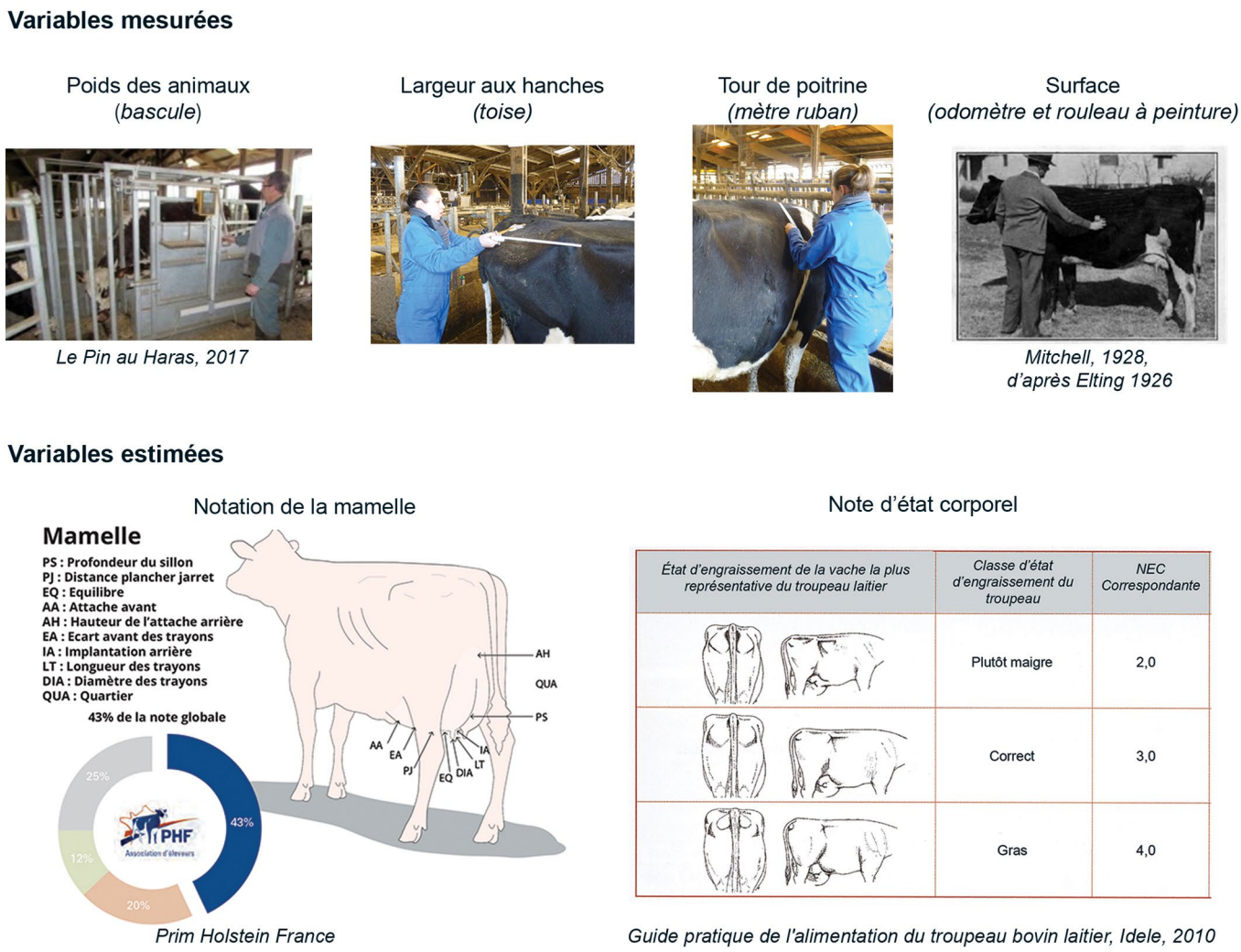
Des méthodes chimiques (administration d'un traceur au niveau de l'organisme par exemple) ou basées sur la cellularité d'un tissu (taille des adipocytes par exemple) ont été développées pour estimer les compositions tissulaire et chimique des ruminants vivants, et ont été largement utilisées dans le domaine de la recherche ces 60 dernières années (Bocquier *et al.*, 1999). Les méthodes chimiques reposent sur l'utilisation d'isotopes, naturels ou marqués, d'un composant chimique du corps (Simeonova *et al.*, 2012). L'une de ces méthodes est basée sur l'utilisation de l'oxyde de deutérium ($D_2O$, un isotope de l'eau), également connue sous le nom « d'eau lourde ». Une dose unique de $D_2O$ administrée à un animal, diffuse (en une à sept heures) dans les différents compartiments hydriques de l'organisme. La relation entre l'espace de diffusion de l'eau marquée et le volume hydrique réel est forte ($r > 0,96$), ainsi qu'avec la teneur en matières grasses de l'animal ($r = -0,92$ à $-0,9$) (Robelin, 1973) du fait des relations statistiques bien connues entre teneurs en eau et lipides corporels.

Malgré un coût élevé, cette méthode a été largement utilisée au cours du siècle dernier pour estimer la composition corporelle des porcs, moutons et bovins vivants (Simeonova *et al.*, 2012). Les avancées récentes permettent de simplifier la préparation des échantillons et d'utiliser des techniques de mesure du $D_2O$ plus performantes, tout en réduisant les coûts. Elles offrent également la possibilité d'utiliser le lait comme matrice non invasive (Louis *et al.*, 2022). Cependant, elle n'est précise que pour les animaux provenant de la population sur laquelle les équations ont été établies. Elle n'est pas non plus adaptée à une utilisation dans les exploitations agricoles (Schröder & Staufenbiel, 2006). La mesure du diamètre/volume des cellules adipeuses dans du tissu adipeux périrénal ou sous-cutané, combinée au poids vif, prédit quant à elle avec précision la teneur en eau ($R^2 = 0,979$), en lipides ($R^2 = 0,790$) et en énergie ($R^2 = 0,915$) de la carcasse bovine (Xavier *et al.*, 2022b). Cependant, la mesure du volume des adipocytes reste une méthode dédiée à l'expérimentation, du fait de l'invasivité du prélèvement d'échantillons par biopsie sous-cutanée, et de la nécessité de fixer les cellules avec un réactif à manipuler dans des conditions réglementaires pour la santé du manipulateur.

### b. En élevage

Pour réaliser un suivi du poids vif des animaux en l'absence de systèmes de pesée en propre dans les élevages, des alternatives existent. Des prestations de service ont été mises en place, par exemple *via* certains organismes de contrôle de performances des bovins en croissance. Elles réalisent des pesées régulières (trois à quatre pesées au cours de la croissance) à l'aide d'une bascule mobile se déplaçant de ferme en ferme. À défaut de pesée, le poids vif peut être déterminé indirectement par des équations établies à partir d'indicateurs morphologiques ou de mensurations, comme

**Figure 2.** ***Exemples de variables mesurées ou estimées sur animaux, et méthodes associées.***




le tour de poitrine et la hauteur au garrot (Heinrichs *et al.*, 1992). La hauteur au garrot présente une corrélation significative avec le poids vif des bovins en croissance et est une alternative à la pesée en élevage. Cependant, cette mesure varie peu chez la vache adulte et 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) ou les lignes du dos (Kuzuhara *et al.*, 2015), sont souvent inclus dans les modèles de prédiction du poids vif des vaches laitières adultes. Certaines de ces mesures de suivi sont effectuées manuellement à l'aide d'un mètre ruban ou d'une toise, voire uniquement estimées à l'œil, comme pour la plupart de celles effectuées dans le cas des protocoles de pointage utilisés pour la sélection génétique (figure 2) (Heinrichs & Hardgrove, 1987).

D'autres mesures sont rarement réalisées faute d'outils adéquats, malgré leur intérêt, comme la surface ou le volume de l'animal, sur lesquels sont basées la détermination des doses optimales pour un traitement ou encore, l'estimation des besoins énergétiques d'entretien d'un animal, utile pour un rationnement maîtrisé. Ces besoins correspondent aux besoins *a minima* pour le maintien des fonctions vitales, déterminés sur un animal à jeun, au repos et dans sa zone de thermoneutralité. En effet, les premières analyses de Elting (1926) puis les équations de Mitchell (1928) chez les ovins, appliquées ensuite aux bovins, ont établi les relations entre surface et poids vif métabolique ($PV^{0,75}$), indicateur utilisé pour déterminer les besoins d'entretien. Ces mesures manuelles et visuelles sont parfois combinées ou non, comme dans le cas de la détermination de la note d'état corporel (NEC). Dans ce dernier cas, différentes échelles et grilles de notations ont été développées dans différents pays, avec des notations allant de 1 à 6, de 0 à 5 ou 1 à 10. Les travaux de Bédère *et al.* (2018) ont montré qu'il est possible de passer de l'une à l'autre des grilles de notation assez aisément. Chronophages, subjectives et parfois sources de stress pour les animaux et les hommes, ces mesures sont finalement peu utilisées dans les exploitations commerciales (Le Cozler *et al.*, 2012), mais elles gardent au final toute leur importance dans les programmes de sélection. De plus, on peut aussi se questionner sur le fait que certaines équations établies par le passé peuvent ne plus être adaptées aujourd'hui, et sans doute demain, du

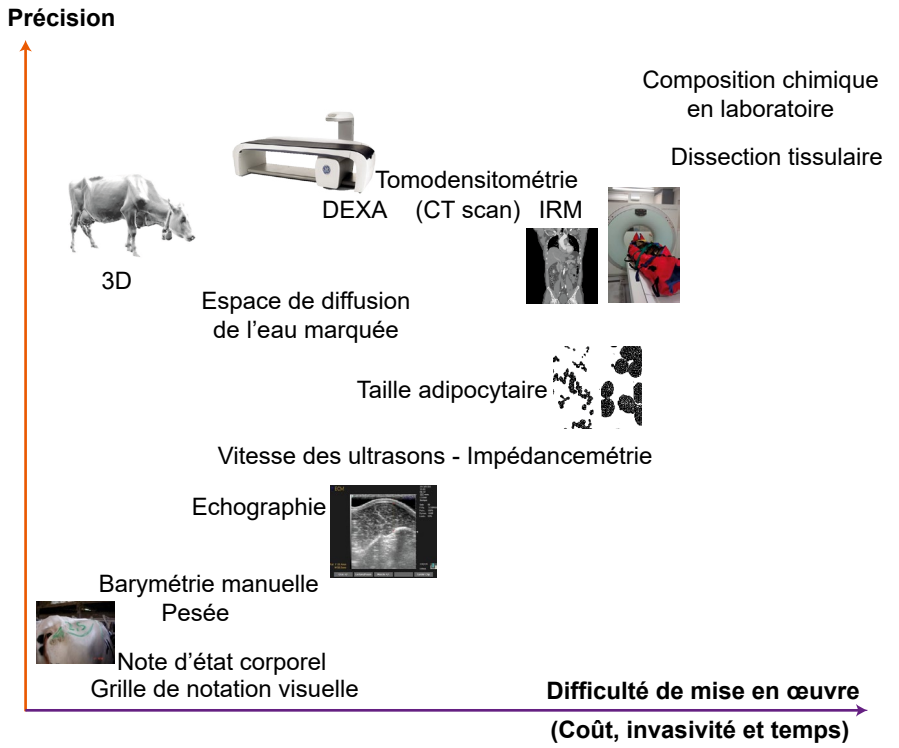
fait de l'évolution du format des animaux, entre et au sein des races.

### c. À l'abattoir

Les alternatives aux mesures de référence pour estimer la composition chimique ou tissulaire, reposent sur des méthodes applicables uniquement *post-mortem* (densité relative, dissection d'un pan de côtes ou d'une côte seule) et d'autres applicables à la fois *in vivo* et *post-mortem* (mensurations, pesées, dilutions de traceurs, impédancemétrie, imagerie). Sur le terrain, la composition tissulaire des carcasses en abattoir est le plus souvent estimée au moyen de grilles de notation, comme les grilles EUROP dans l'Union européenne ou CH-TAX en Suisse. Ces méthodes de notation sont toutefois sujettes à critiques quant à leur utilisation, en raison notamment de la subjectivité des grilles utilisées (Monteils *et al.*, 2017). Globalement, Conroy *et al.* (2010) indiquent que le classement EUROP prédit les proportions de graisse, d'os et de viande avec des valeurs $R^2$ de 0,67, 0,71 et 0,73, respectivement. La dissection d'une fraction de la carcasse par un boucher est aussi une méthode utilisée pour estimer la composition tissulaire d'une carcasse bovine. Pour cela, les poids en os, tissus adipeux et muscles d'une fraction de la carcasse prédisent la composition tissulaire de la carcasse complète grâce à des équations. Des morceaux tricostaux (9-10-11e côtes ou 7-8-9e côtes), la 10e, 11e ou 6e côte ont été utilisés pour prédire la composition tissulaire d'une carcasse de races dont la composition en dépôts adipeux est élevée (Angus, Shorthorn, Hereford) ou faible (Charolais, Limousin, Salers ou Pie Noir). Ces équations sont disponibles notamment dans les publications de Geay *et al.* (1969), Robelin & Geay (1976) et Oliván *et al.* (2001), et rapportent des précisions au-delà de 90 %.

Le travail de Lerch *et al.* (2021) a mis en évidence la pertinence, la sensibilité et la précision relative de différentes méthodes de phénotypage de la composition corporelle chez un modèle de petit ruminant laitier. Les auteurs ont ainsi comparé huit méthodes pour phénotyper la composition corporelle chez la chèvre laitière (figure 3). Les méthodes classiques et bien documentées comme la cellularité des tissus adipeux, l'espace de diffusion de l'eau deutérée, l'impédancemétrie et la note d'état corporel (NEC), ont ainsi été comparées à des méthodes plus innovantes et prometteuses basées sur les technologies numériques telles que l'imagerie tridimensionnelle incluant la reconstitution complète de la chèvre (3D-Scan) et l'estimation automatique de NEC (3D-NEC), l'échographie des épaisseurs des tissus sous-cutanés lombaires et sternaux et la tomodensitométrie du corps entier.

**Figure 3.** ***Positionnement des méthodes de détermination de la composition corporelle suivant leur précision relative et leur difficulté de mise en œuvre (coût, invasivité/destructivité, temps).***




Source : Lerch *et al.* (2021).

Les résultats obtenus contribuent à identifier la méthode la plus adaptée au compromis souhaité entre précision, coût et temps d'acquisition du phénotype en particulier dans le contexte de la recherche.

Face aux problèmes liés aux coûts des mesures en élevages (animaux vivants) ou en laboratoire (analyses chimiques), les approches basées sur des dispositifs d'imagerie sont des alternatives intéressantes (Pezzuolo *et al.*, 2018). Elles permettent un accès facile et sûr aux caractéristiques d'intérêt, tout en ouvrant la possibilité d'accéder à de nouveaux indicateurs, difficilement mesurables de manière traditionnelle sur un animal vivant ou sur les carcasses.

## 2. Perspectives d'utilisation des technologies basées sur les ondes et images pour le suivi des animaux en élevage

L'utilisation de l'imagerie à des fins de phénotypage s'est développée en parallèle des avancées technologiques. L'image peut être obtenue soit *via* un contact direct avec l'animal (échographie), soit à distance de l'animal. L'échographie utilise la différence de réflexion des ultrasons par les tissus biologiques pour former une image des tissus traversés plus ou moins profondément (Scholz *et al.*, 2015). Les mesures échographiques permettent de suivre la mobilisation du tissu adipeux sous-cutané et du muscle chez la vache laitière en début de lactation (Bruckmaier *et al.*, 1998 ; Schröder &

Staufenbiel, 2006 ; Megahed *et al.*, 2019). Néanmoins, les réserves adipeuses internes représentent un dépôt énergétique important, mais leurs dynamiques d'accumulation et de mobilisation sont difficiles à évaluer par la mesure de NEC ou l'échographie (Weber *et al.*, 2013 ; Drackley *et al.*, 2014). Même si certaines études ont proposé l'utilisation de l'échographie pour mesurer la graisse périrénale chez les bovins (Ribeiro *et al.*, 2008), ces approches sont techniquement exigeantes et nécessitent une validation sur un plus grand nombre de données. Les variations de l'épaisseur des tissus sous-cutanés mesurées par échographie ne tiennent pas compte de la variabilité interindividuelle de la mobilisation des dépôts lipidiques internes, qui peuvent présenter des dynamiques différentes et contribuer à l'adaptation métabolique (Weber *et al.*, 2013). Les mesures échographiques sont chronophages, nécessitent des compétences techniques pour l'acquisition et l'analyse des images, et peuvent être sujettes à des biais opérateur (Pires *et al.*, 2012). En outre, elles peuvent ne pas être adaptées aux systèmes de production, aux espèces ou aux races où les réserves de tissu adipeux sous-cutané sont faibles ou rapidement mobilisées en début de lactation (Pires *et al.*, 2013, 2015 ; Lerch *et al.*, 2021).

Différents sites anatomiques ont été identifiés et utilisés pour leur intérêt dans l'estimation de la composition corporelle, tel que le site entre la 12e et 13e côte chez les bovins (Hamlin *et al.*, 1995 ; Greiner *et al.*, 2003). Les technologies d'imagerie qui ne nécessitent pas de manipulation directe des animaux se divisent selon deux grands types et génèrent des images en deux (2D) ou trois (3D) dimensions, voire les deux, par exemple dans le cas de l'imagerie par résonance magnétique (IRM) ou par échographie. Le développement de ces outils s'est accéléré depuis le début des années 2000 (Wurtz *et al.*, 2019) et ils sont aujourd'hui utilisés en ferme, même sur des animaux peu habitués à être manipulés et donc, potentiellement dangereux, comme des taurillons. Les outils d'imagerie utilisées en élevage sont principalement basés sur des technologies non invasives et non destructrices, comme des appareils photographiques, et ne nécessitent pas de dispositions et/ou d'habilitations particulières pour leur mise en œuvre. Elles ne nécessitent pas non plus l'utilisation de traitement particulier en amont. Enfin d'autres méthodes basées sur l'utilisation de biomarqueurs existent, mais ne seront pas présentées ici.

## ■ 2.1. Les différents types d'imageries

Une image représente un objet sous une forme bidimensionnelle (2D), c'est-à-dire une image plate qui ne peut être utilisée qu'en deux dimensions (longueur et largeur). Dans sa forme la plus usuelle, l'image 2D représente donc une photographie dans le domaine du visible où les couleurs sont représentées par l'addition des trois couleurs primaires du spectre visible (rouge, vert, bleu – RVB ; *red*, *green*, *blue* – RGB en anglais). Les caméras thermiques sont, elles, sensibles dans une partie du spectre infrarouge (IR), et elles permettent de détecter certains problèmes tels que les boiteries (Alssaaod *et al.*, 2015). Les images RVB nous entourent dans la vie de tous les jours, comme les photos ou les vidéos prises avec des appareils photographiques conventionnels et des caméras numériques. Dans le cas des appareils numériques, l'image est constituée d'une unité de base appelée « pixel ». Chaque pixel associé à l'une des trois couleurs primaires (rouge, vert, bleu) est localisé précisément par sa position (ligne, colonne) sur l'écran ou l'image. Sa taille dépend des réglages d'impression et des cartes graphiques utilisées. À taille donnée et tout égal par ailleurs, plus une image est composée de pixels, meilleure est sa définition mais cela nécessite des technologies plus onéreuses. La technologie des images RVB est aujourd'hui une des technologies les plus étudiées, pour détecter et analyser les comportements normaux des animaux (vache couchée ou en mouvement par exemple) ou anormaux (stéréotypies tels que les mouvements de langues par exemple), sans que des systèmes commerciaux ne soient encore totalement disponibles. Des technologies basées sur les images RVB issues de caméras optiques couleurs, couplées à de l'analyse d'image et des réseaux de neurones, ont aussi été développées chez les bovins pour estimer leur poids vif (Arias Hernandez *et al.*, 2004), leur adiposité (Leroy *et al.*, 2005), ou encore, analyser la taille des trayons des vaches laitières (Zwertvaegher *et al.*, 2010).

Ajouter l'information de la distance au capteur de chaque pixel plutôt que l'information liée aux couleurs permet d'obtenir une image avec différents niveaux de gris. On obtient alors un voxel, qui est à la 3D ce qu'est le pixel à la 2D. L'image reconstituée, appelée alors image de profondeur, permet de réaliser des mesures phénotypiques à plus grande échelle telles que la NEC (Halachmi *et al.*, 2008 ; Fischer *et al.*, 2015 ; Spoliansky *et al.*, 2016 ; Yukun *et al.*, 2019), le comportement (Qiao *et al.*, 2022) ou encore, les boiteries (Van Hertem *et al.*, 2014 ; Zhao *et al.*, 2018 ; Zheng *et al.*, 2023). Les imageries RVB ou de profondeur, seules, ne permettent pas d'obtenir des volumes des objets en trois dimensions, ce qui rend difficile, mais pas impossible malgré les algorithmes créés, les mesures telles que le tour de poitrine.

Palliant certaines de ces contraintes grâce au développement de nouvelles techniques d'imagerie, l'utilisation d'images 3D obtenues par photogrammétrie pour le phénotypage des animaux a progressivement pris une place de plus en plus grande (Le Cozler *et al.*, 2022, 2024). Dans les premières approches en 3D, les mesures sur animaux étaient effectuées dans des conditions de laboratoire (équipement lourd et points de repère sur les animaux pour guider la mesure par ordinateur), fournissant soit des images du corps entier des animaux immobilisés, soit d'une partie du corps des animaux non immobilisés. Aujourd'hui, les progrès technologiques et informatiques contournent une grande partie de ces contraintes et permettent d'envisager une utilisation plus large, en ferme commerciale notamment. Dans le cas de l'approche par imagerie 3D,

deux grandes familles de méthodes existent, l'une basée sur les caméras de profondeur et la fusion d'images de profondeur prises sous différents angles que l'on retrouve dans des systèmes tels que Deffilait3D, Otop3D ou Phéno3D (voir ci-après) et l'autre basée sur des technologies Lidar (Morpho3D). Dans le premier cas, les images obtenues sont moins précises mais ces systèmes offrent une fluidité d'images intéressante pour des animaux en mouvement alors que dans le second cas, si la méthode est très précise, elle nécessite d'avoir des animaux bougeant peu. Que l'objet final soit une image RGB, de profondeur ou 3D, des facteurs tels que l'angle de prise de vue, l'éclairage ou la distance appareil-objet peuvent créer des distorsions et introduire des erreurs de mesure, qu'il importe de corriger (filtres, algorithmes spécifiques).

## ■ 2.2. La détermination du poids vif et des critères morphologiques

L'imagerie 3D, notamment par photogrammétrie, permet aussi d'apprécier le poids vif (Hansen *et al.*, 2018 ; Song *et al.*, 2018 ; Le Cozler *et al.*, 2019b ; Yang *et al.*, 2022) et de mesurer divers critères morphologiques tels que la hauteur au garrot, la profondeur de poitrine (Le Cozler *et al.*, 2019a ; Ruchay *et al.*, 2020) et même le volume ou la surface corporels des bovins (Le Cozler *et al.*, 2019b) (tableau 1). À titre d'exemple, les dispositifs Morpho3D et Deffilait3D ont été développés par l'entreprise 3D Ouest en collaboration avec INRAE et Idele (figure 4). Le dispositif Morpho3D se base sur le principe de triangulation par émission laser grâce à cinq couples caméra-laser installés sur un portique mobile monté sur rails. Il permet d'effectuer un scan complet de l'animal et correspond à une acquisition moyenne de 2 000 images par vache. La nécessité d'avoir un animal immobile le temps de l'acquisition des images (cinq secondes) ainsi que les interférences lumineuses pouvant altérer les images acquises ont engendré le développement du dispositif Deffilait3D, pour l'acquisition de données instantanées. Celui-ci se base sur le principe de stéréovision, grâce à 15 caméras de profondeur qui se déclenchent instantanément et simultanément pour obtenir une carte de profondeur de l'animal. Ces outils ont été validés et utilisés 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). Grâce à ces dispositifs, il a été possible de déterminer le poids vif de vaches adultes de 500 à 800 kg, sans pesée, avec des modèles prenant en compte uniquement le volume ou davantage de paramètres mesurables sur les images 3D.

Concernant les mesures morphologiques par ces différents dispositifs (tableau 1), les résultats concordent,

**Tableau 1.** ***Comparaison des deux dispositifs Morpho3D et Deffilait3D.***

| Mesures | Morpho3D | Deffilait3D | Écart | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Valeur | Relatif (%)* |
| Volume total (L) | 739,8 | 738,6 | 1,2 | 0,2 |
| Surface partielle ($m^2$) | 7,5 | 6,9 | 0,6 | 8,0 |
| Largeur aux hanches (m) | 0,578 | 0,565 | 0,0132 | 1,3 |
| Hauteur au garrot (m) | 1,540 | 1,459 | 0,0811 | 5,3 |
| Profondeur de poitrine (m) | 0,813 | 0,787 | 0,0252 | 3,0 |
| Largeur aux fesses (m) | 0,526 | 0,530 | 0,0037 | 0,7 |
| Tour d'abdomen (m) | 2,580 | 2,587 | 0,0067 | 0,3 |

* Écart relatif en % de la valeur Morpho3D, prise comme référence.

**Figure 4.** ***Dispositifs Morpho3D et Deffilait3D, et exemples de reconstruction d'animaux en image 3D.***

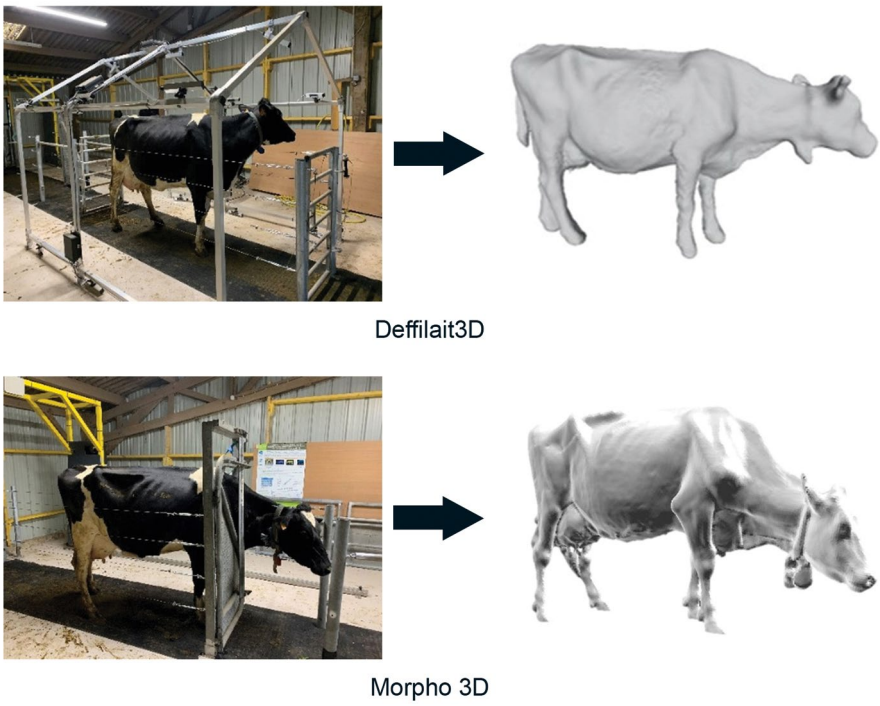
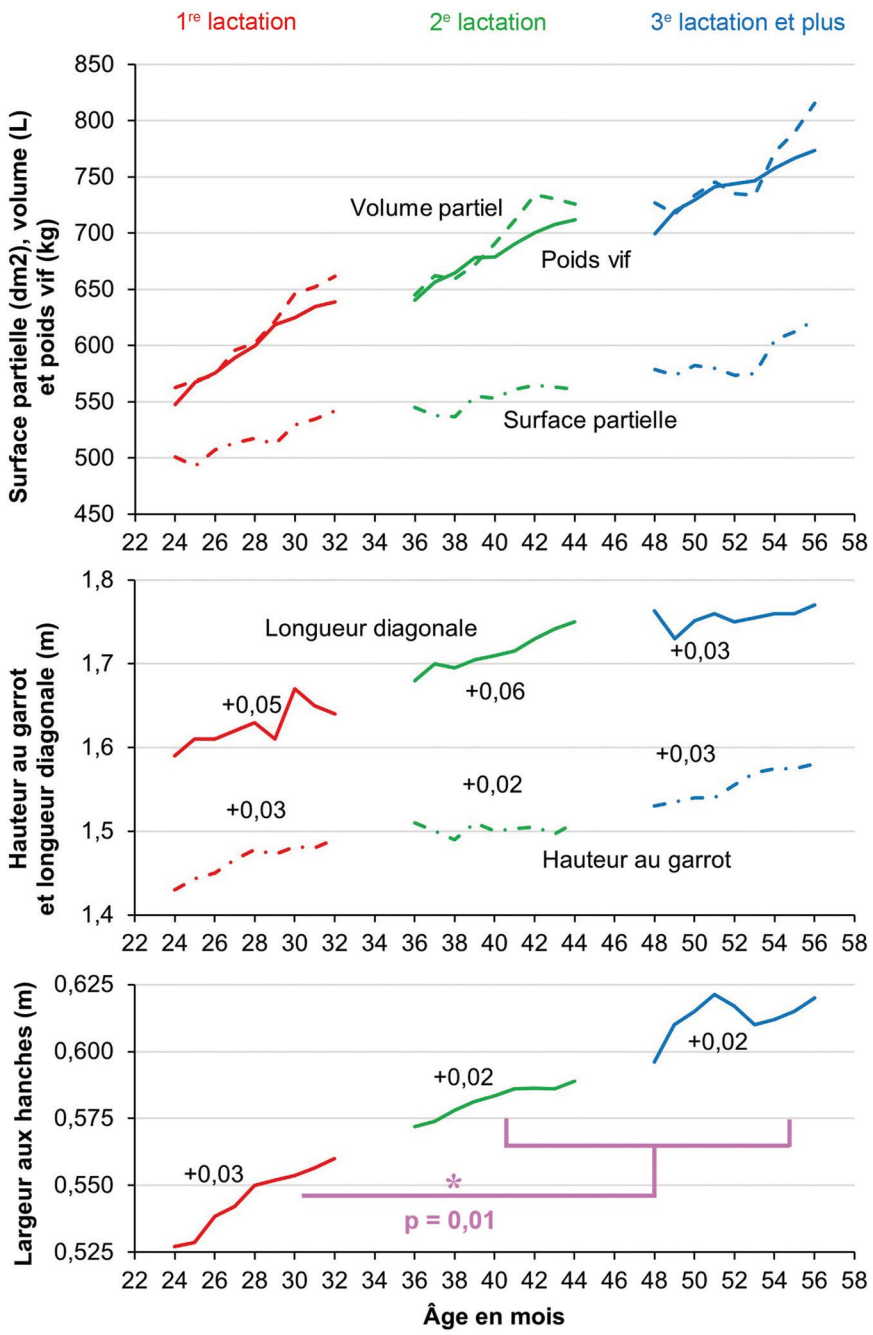


**Figure 5.** ***Exemples d'évolution de la morphologie corporelle de vaches Holstein au cours des trois premières lactations.***




Source : Xavier *et al.* (2022a).
Le volume et la surface partiels sont déterminés à partir des épaules jusqu'à l'arrière de l'individu (voir Le Cozler *et al.*, 2019b pour plus de détails).

mais ils montrent que les différences de mesures de la hauteur au garrot sont parfois importantes entre les dispositifs. Des travaux complémentaires (Tiercin, 2023) ont montré que dans ce cas, il est important de corriger les valeurs de la position de la tête de l'animal (horizontale ou basse par exemple), pour obtenir des valeurs similaires. Des procédures de correction ont été mises en place, pour aboutir à des résultats proches des valeurs mesurées manuellement.

L'intérêt majeur de réaliser ces mesures régulièrement grâce à l'imagerie 3D réside dans la possibilité de suivre de façon précise et en dynamique l'évolution morphologique des bovins. Elles évaluent notamment le développement squelettique des jeunes bovins, détectent les variations d'état corporel et estiment le poids vif, à partir des paramètres déterminés sur les images.

Grâce au suivi morphologique des animaux de race Holstein lors de leur croissance (Le Cozler *et al.*, 2022) et de vaches après leur premier vêlage (Xavier *et al.*, 2022a), il a été possible de démontrer que la croissance se poursuivait au-delà de la première lactation et ce, jusqu'à la fin de la 3e lactation (figure 5).

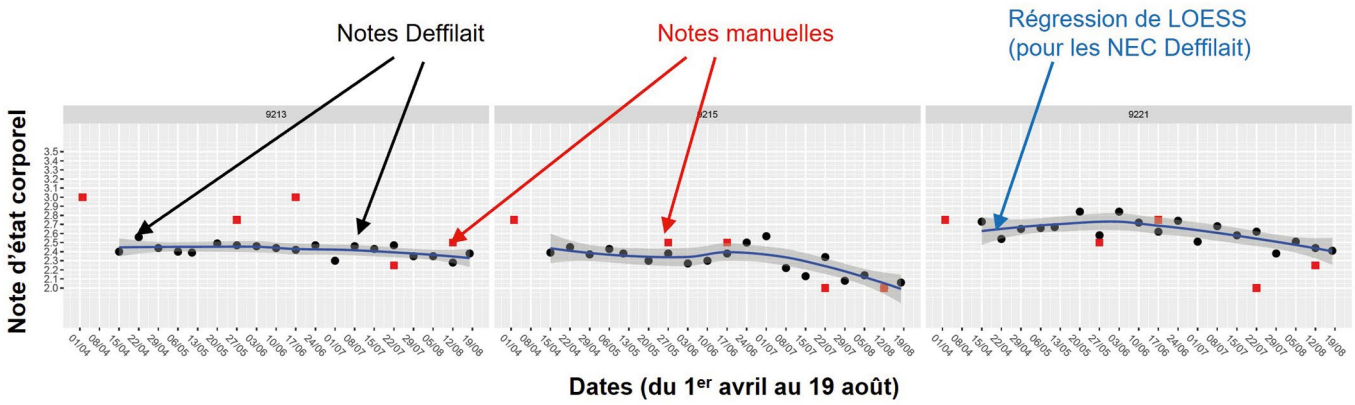
Ces outils ont aussi capturé la dynamique du changement morphologique selon les compartiments corporels (contenus digestifs, réserves corporelles, croissance) (Xavier *et al.*, 2022a). Ces premiers prototypes ont permis la mise en place en France d'outils utilisables sur le terrain, comme ceux développés dans le cadre des projets Phéno3D (Lebreton *et al.*, 2023) et 3D CGT. Les résultats indiquent qu'en race Charolaise, cet appareil estime le poids de l'animal avec une erreur de 4 %, et fait jeu égal avec le pointeur en ce qui concerne l'évaluation du développement musculaire et squelettique.

## ■ 2.3. L'estimation des réserves corporelles

La NEC est un indicateur indirect de l'état d'adiposité des animaux, qui peut être déterminée par imagerie. L'estimation de sa valeur *via* l'imagerie 3D a montré que sa répétabilité était trois fois supérieure à celle déterminée manuellement (Fischer *et al.*, 2015). La mesure répétée apporte ainsi un suivi quantitatif de l'évolution de la NEC. Lors d'un essai réalisé sur 15 génisses gestantes de race Holstein, la comparaison des mesures obtenues manuellement et celles issues d'imagerie 3D ont confirmé l'intérêt de cette approche, avec des évolutions comparables entre méthodes (Le Cozler *et al.*, 2026) (figure 6).

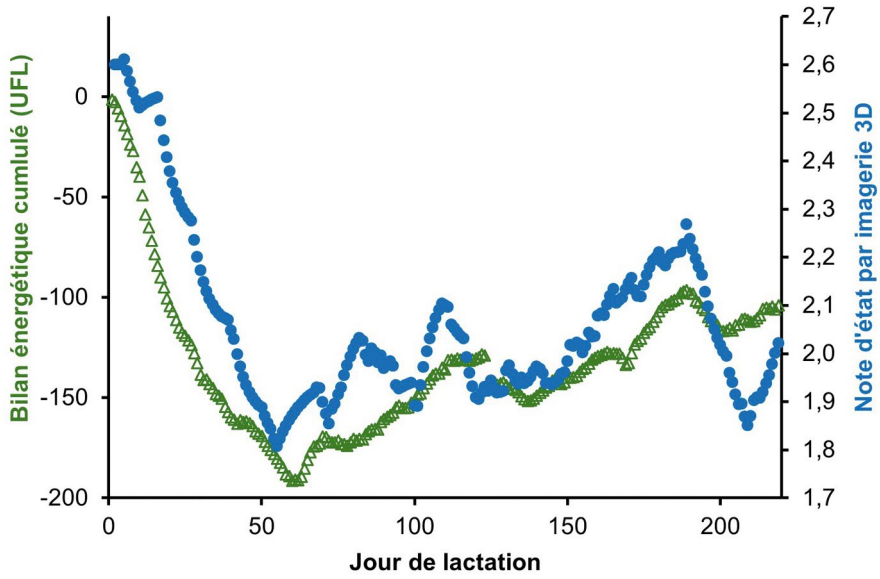
Par ailleurs, la mesure répétée et fréquente permettrait également de suivre le statut métabolique (bilan énergétique) des vaches en lactation (figure 7). Si les premiers résultats sont prometteurs (Faverdin *et al.*, 2021), ces approches restent encore à approfondir.

**Figure 6.** ***Évolution comparée des notes d'état corporel, obtenues manuellement et via imagerie 3D (exemple de trois génisses).***




Sur une période du 15 avril au 28 août, et sur 15 génisses confirmées gestantes début mars, la NEC passe de 2,50 à 2,28 avec le dispositif « Deffilait3D » et de 2,63 à 2,11 avec les notes des opérateurs (manuelles).

**Figure 7.** ***Lien entre NEC et statut métabolique des vaches.***




## 3. Vers une estimation de la composition chimique sur animaux vivants

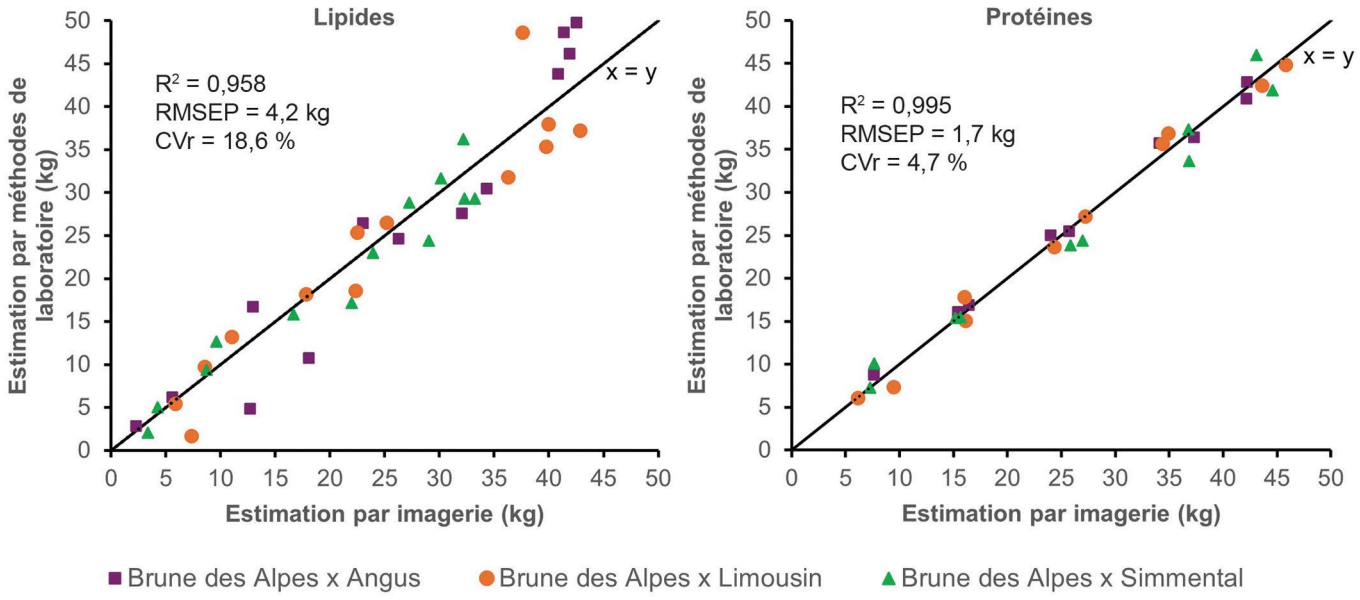
Au-delà de l'estimation des réserves corporelles *via* la NEC, l'utilisation de l'imagerie 3D pour déterminer directement la composition chimique des animaux a aussi été testée. Les données issues des images 3D du dispositif Morpho3D ont ainsi été utilisées pour estimer les teneurs en lipides et protéines des carcasses de taurillons et les comparer à la méthode de référence (dissection, broyage et analyses au laboratoire). Ceci a d'abord été utilisé pour estimer la composition corporelle de la chèvre laitière (Lerch *et al.*, 2021), puis du bovin à l'engraissement (Xavier *et al.*, 2022b, 2024). Les résultats ont ainsi montré qu'il était aussi possible d'estimer la composition chimique (essentiellement masses et proportions de protéines et lipides dans la carcasse et le corps vide) des animaux vivants, en particulier chez les bovins pendant la phase d'engraissement (Xavier *et al.*, 2024). Dans cette dernière étude, l'estimation de la composition chimique des carcasses à partir d'images 3D est réalisée par un modèle statistique des moindres carrés partiels qui combine plusieurs indicateurs morphologiques (figure 8). Ces indicateurs résultent des avancées en modélisation 3D appliquée aux vaches laitières (Le Cozler *et al.*, 2019b), intégrant des mesures innovantes telles que des longueurs diagonales. Ils se sont également inspirés des mesures réalisées par les pointeurs et taxateurs, notamment à travers l'analyse de la convexité de la cuisse (Chaize *et al.*, 2022).

## 4. Intérêts des nouvelles technologies d'ondes et d'imagerie en abattoir

En abattoir, l'imagerie est utilisée pour classer les carcasses des animaux. Certains de ces outils sont basés sur des technologies coûteuses, empruntées à l'imagerie médicale, et nécessitant des précautions particulières (rayons X). L'absorptiomètre biphotonique à rayons X (DXA) est à l'origine un dispositif médical qui émet des photons à deux niveaux d'énergie dans le spectre des rayons X. Ces rayonnements sont émis par l'émetteur, situé sous la table d'examen, et sont reçus par le récepteur, positionné dans le bras du scanner (figure 9).

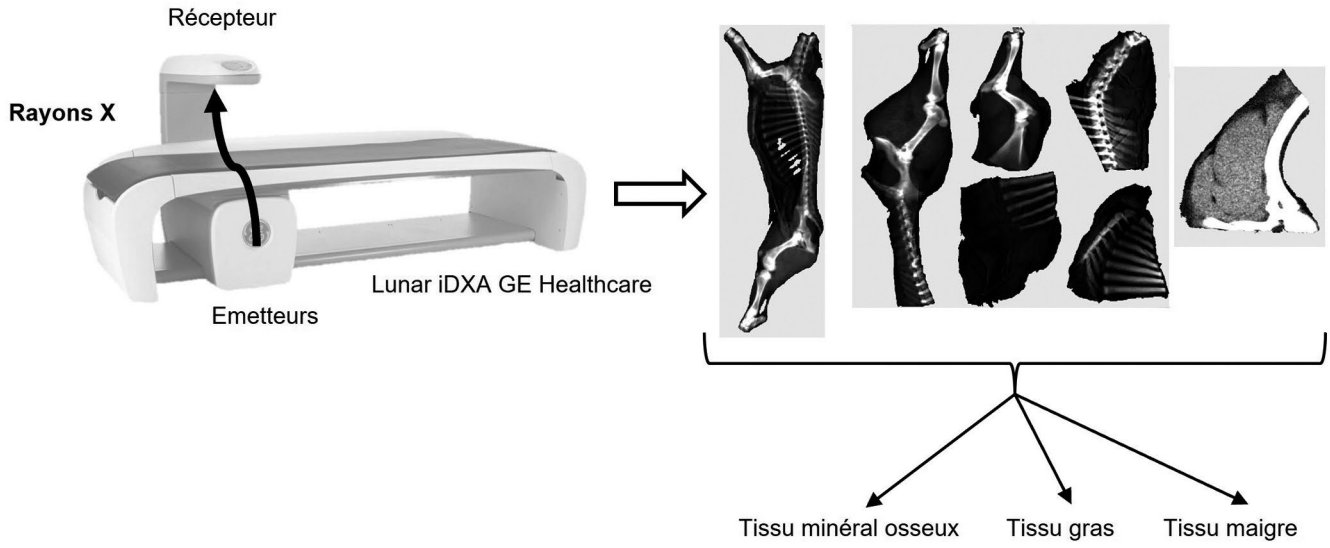
L'échantillon à scanner est positionné entre les deux éléments. L'absorption des rayons X varie en fonction de la nature des tissus. À partir des images obtenues, diverses données sont extraites grâce au DXA, notamment la masse totale de l'échantillon, la masse de « maigre » et celle de « gras », la masse minérale osseuse ainsi que la densité osseuse. Le scanner DXA a été utilisé pour prédire la composition chimique chez de nombreuses

**Figure 8.** ***Comparaison des teneurs en lipides et protéines de carcasses chez différents taurillons croisés lait × viande, estimées par imagerie 3D ou déterminées par analyses chimiques.***




RMSEP : erreur moyenne de précision ; CVr : Coefficient de variation résiduel.

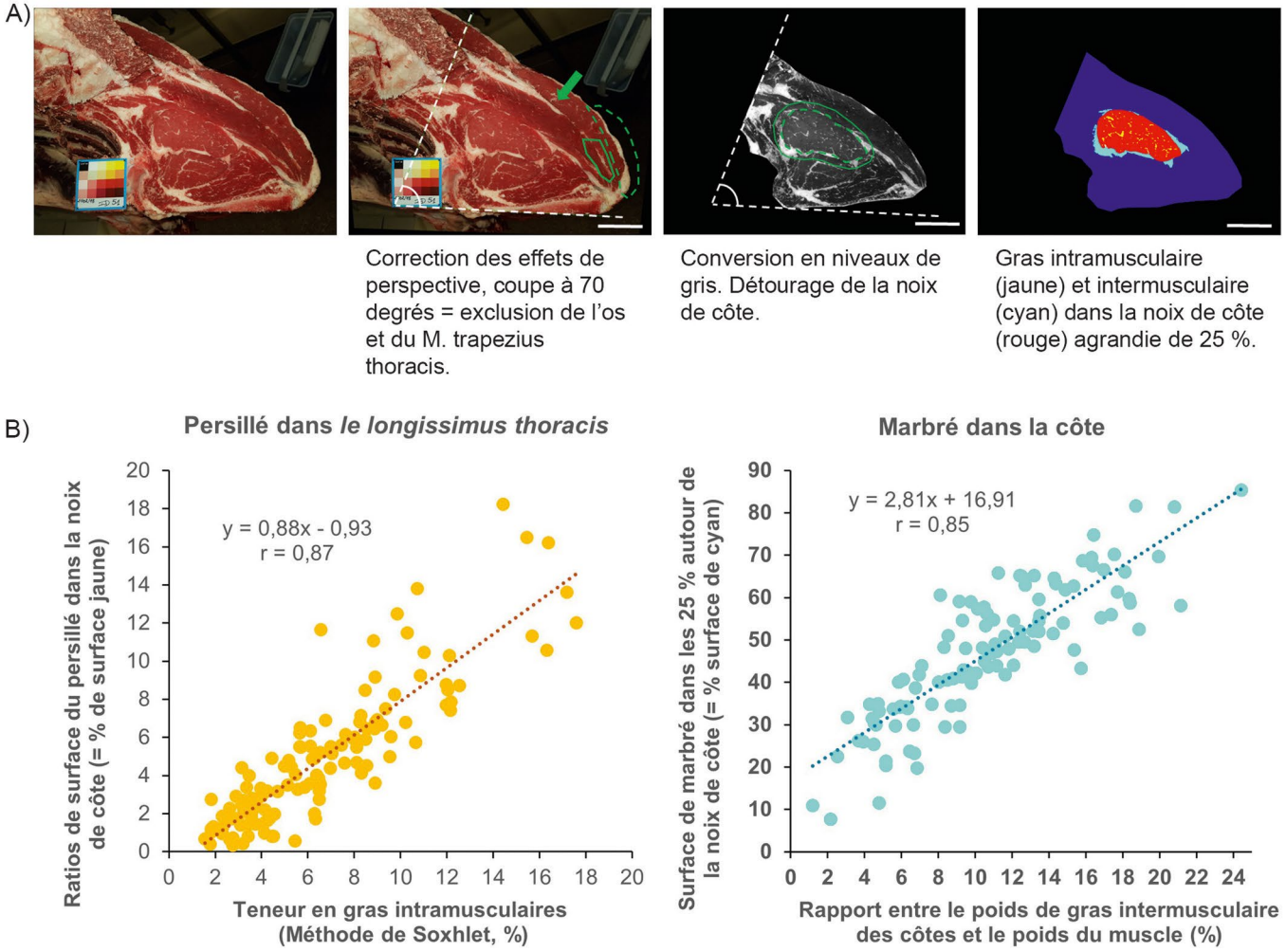
**Figure 9.** ***Principe de fonctionnement des dispositifs d'absorptiomètre biphotonique à rayons X (DXA).***




espèces : porc, bovin, ovin, volailles. Les travaux de Xavier *et al.* (2023) ont porté sur l'utilisation de morceaux de carcasse (demi-carcasse, 11e côte) pour estimer la composition chimique de carcasse entière de bovins. Le scan de la 11e côte suffit pour obtenir une estimation précise de la composition chimique de la carcasse entière, et cette approche permet de gagner du temps de scan et de minimaliser les manipulations et découpes de la carcasse. Dans certains abattoirs en Australie, le système DXA a été adapté pour être utilisé à grande échelle et à haut débit. Le système de mesure se présente comme un couloir dans lequel les émetteurs et récepteurs sont inclus dans les parois verticales, les carcasses défilant alors au milieu de ce dispositif (Calnan *et al.*, 2021). L'utilisation du DXA détermine ainsi la composition corporelle sans effet opérateur et avec une bonne précision de mesures et d'estimations. Son développement est toutefois limité par le coût important du matériel, de son entretien, des aménagements indispensables en abattoir commercial et les risques d'exposition aux rayons X qui nécessitent des mesures de radioprotection spécifiques.

La tomodensitométrie classique (habituellement utilisée en milieu médical) est une autre technologie radiographique qui quantifie l'atténuation des rayons X lorsqu'ils traversent différents tissus (Prieto *et al.*, 2017.). Elle a été utilisée pour prédire la composition de la carcasse (Navajas *et al.*, 2010), à partir de l'analyse tomographique d'une demi-carcasse découpée en

**Figure 10.** ***Estimation de la composition tissulaire et du persillé de la 6e côte à partir d'une photo smartphone.***




A) Un algorithme semi-automatisé pour les quantifications de surfaces a été développé el langage macro à l'aide du logiciel de traitement d'image open source ImageJ v1.52i.
B) Corrélations entre les caractéristiques des images et les mesures de référence.

20 morceaux ou d'une côte bovine. La composition de la carcasse a été évaluée de manière très précise par tomodensitométrie des 20 morceaux (adj-$R^2$ = 0,97 pour les trois tissus : os, muscle et gras). La tomodensitométrie peut prédire le poids du gras, des muscles et des os de la côte avant avec précisions, adj-$R^2$ de 0,95, 0,91 et 0,75, respectivement. Il est à noter que la tomodensitométrie a été utilisée pour prédire les volumes du réticulo-rumen et de la caillette (Pires *et al.*, 2024), avec une bonne précision par rapport aux masses digestives correspondantes mesurées *post-mortem* ($R^2$ = 0,72 et 0,87, écart type résiduel = 1,18 et 0,06 kg, et coefficient de variation résiduel = 11 et 12 %, respectivement) chez la chèvre laitière. Outre le coût de ces équipements et l'utilisation de rayons X, la tomodensitométrie partage avec le scan DXA la même limite de petite taille des animaux analysés (150 à 250 kg, avec une longueur d'acquisition de deux mètres environ). Ceci explique probablement la recherche de relations statistiques entre la composition de fraction du corps estimée par les méthodes à rayons X et la composition de la carcasse dans différentes espèces (Simeonova *et al.*, 2012).

Plus simple d'utilisation et sans rayonnement ionisant, l'outil Meat@ppli est basé sur l'analyse d'images 2D d'une côte de bœuf prélevée à l'abattoir, à l'aide d'un smartphone. Il permet d'estimer la composition tissulaire et le persillé (teneur en lipides intramusculaire) de la 6e côte (Meunier *et al.*, 2021). Les images de coupe transversale de la 6e côte de 164 carcasses, représentatives de la variabilité biologique des quantités de persillé et de marbré de la viande bovine, ont été acquises avec un smartphone Galaxy S8 (Samsung Electronics Co., Corée du Sud) équipé d'un flash avec filtres polarisants pour éviter les reflets liés à la présence de gouttelettes d'eau qui pourraient être confondues avec le gras présent sur les tissus. La détermination de la teneur totale en graisse par dissection et pesée, et la détermination de la teneur en lipides intramusculaires par méthode Soxhlet ont été réalisées au laboratoire. Une première analyse d'image assistée par informatique (Meunier *et al.*, 2021) a montré des relations mathématiques entre la surface des tissus adipeux et des muscles avec leurs poids ou teneurs dans la côte (Bonnet *et al.*, 2020) (figure 10). Ces données ont

servi au développement de plusieurs réseaux neuronaux artificiels pour segmenter la côte, la noix d'entrecôte, le persillé dans la noix d'entrecôte et la graisse totale dans la côte. Les résultats finaux ont montré des corrélations élevées entre méthodes ($0,79 < r < 0,91$, figure 10), soulignant le réel intérêt de cette approche (Normand *et al.*, 2023). Des tests sont en cours en vue d'adapter ce dispositif (réseau de neurones et carénage incluant un flash polarisant) sur de nouvelles générations de smartphones utilisables dans les conditions expérimentales d'un abattoir industriel (projet Meat€cho porté par Idele, en collaboration avec INRAE).

En outre, compte tenu des relations mathématiques entre les compositions d'une côte et d'une carcasse bovines présentées précédemment, l'analyse d'une photographie de côte bovine offre des perspectives d'estimation de la composition tissulaire des carcasses. Cette approche a également été testée avec succès pour la 11e côte (Xavier *et al.*, 2023), pour estimer la composition tissulaire à l'échelle de la carcasse à partir d'une photo smartphone d'une simple côte.

## 5. Perspectives d'implémentation à grande échelle

Dans leur vision des promesses de nouvelles approches de phénotypage, Lagarrigue et Tixier-Boichard (2011) définissaient l'animal idéal comme celui qui se phénotype tout seul. La promesse d'un phénotypage 3D automatisé, où l'animal « acquiert seul » une image complète de sa morphologie, commence, il est vrai, à se concrétiser. Une première étape a été franchie avec le passage des technologies de balayage laser (Lidar) à l'acquisition par caméra de profondeur de champ « *one shot* » d'animaux relativement statiques, notamment *via* le dispositif Deffilait3D (Le Cozler *et al.*, 2024). Plus récemment, le projet Pheno3D a développé un scanner 3D mobile, c'est-à-dire démontable et transportable, capable de collecter simultanément des images RGB et 3D sur des animaux en mouvement (Lebreton *et al.*, 2023). Sa transportabilité facilite le déploiement sur différents sites, bâtiments, paddocks ou fermes, avec des perspectives de modèles économiques au sein desquels des agents pourraient le déplacer de ferme en ferme, comme cela se fait dans le cadre du contrôle de performances en élevages bovins avec les bascules mobiles.

Les défis pour la recherche résident désormais dans une plus grande standardisation des acquisitions afin d'en maximiser l'exploitabilité pour le développement de nouveaux phénotypes. C'est l'objectif poursuivi par le projet Carnet F2E – 3D CGT (*CattleGrowthTracking*), ou le projet ANR-SNF iREACT qui visent à établir les protocoles nécessaires pour intégrer pleinement ces outils dans les dispositifs de recherche des fermes expérimentales françaises.

Transformer une image 3D en un phénotype exploitable, utile à la sélection ou à la conduite d'élevage, constitue toutefois une étape critique avant tout déploiement opérationnel. L'automatisation de cette transformation est donc au cœur des développements récents. Les premières initiatives d'automatisation datent des travaux sur la NEC 3D (Fischer *et al.*, 2015), où des approches de réduction de dimension (analyse en composantes principales) alimentaient déjà des modèles prédictifs. Si le principe de la NEC 3D a été commercialisé, sa diffusion est restée limitée (taux d'adoption de 2,3 %) (Idele, 2024), freinée par la faible robustesse interfermes des références visuelles de NEC et un manque de diversité dans les jeux de données d'apprentissage. Ceci réduit la fiabilité des prédictions aux extrêmes et son adoption par la comparaison à des références intrafermes. Pour dépasser ces limites, les approches récentes se concentrent moins sur la valeur absolue de la NEC que sur l'analyse dynamique des variations individuelles au cours du temps et aux moments clés du cycle de production, où la technologie 3D permet de suivre avec précision les évolutions corporelles dans le temps (Xavier *et al.*, 2022a ; Le Cozler *et al.*, 2026).

Jusqu'à récemment, le traitement d'images 3D restait manuel, limitant fortement la portée des preuves de concept à seulement quelques indicateurs d'images, pour un coût et temps de traitement élevé, et introduisant un nouveau biais opérateur. En France, le projet Pheno3D a transformé cette étape, avec la mise au point d'une chaîne de traitement automatisée pour nettoyer, normaliser et extraire près de 300 indicateurs morphologiques exploitables par des modèles d'intelligence artificielle (Do *et al.*, 2024).

Les perspectives d'amélioration de ces chaînes de traitement sont nombreuses. L'autodétection des postures (Li *et al.*, 2023) et de points clés sur l'animal (Li *et al.*, 2022 ; Menezes *et al.*, 2024) sont un premier pas pour corriger des biais mis en avant par Tiercin (2023). L'amélioration de l'efficience computationnelle des méthodes (Yue *et al.*, 2025) facilitera le développement d'intelligence embarquée dans les dispositifs d'acquisition. Une fois les images 3D prétraitées automatiquement, des modèles prédictifs peuvent valoriser l'image en un phénotypage. Ainsi Dechaux *et al.* (2024), également dans le cadre du projet Pheno3D, ont démontré sur un échantillon de 1 114 veaux Charolais (2 079 images) la capacité d'un modèle 3D à prédire le poids vif avec une erreur absolue moyenne de 4,2 %, et à estimer les scores de développement squelettique et musculaire avec une précision comparable à celle des pointeurs humains. Ces résultats ont validé la faisabilité d'une chaîne complète de phénotypage 3D automatisée, de l'acquisition à la prédiction. Aujourd'hui, les modèles prédictifs sont en phase de généralisation multirace (10 races allaitantes) et les travaux portent sur l'embarquement des algorithmes directement dans le scanner, afin que le calcul des indicateurs, la détection des anomalies et la prédiction des phénotypes soient effectués en temps réel, à la ferme, sans post-traitement supplémentaire. Cette capacité embarquée ouvre la voie à un phénotypage véritablement haut débit, où le scanner devient un capteur intelligent capable de produire instantanément des données morphologiques standardisées, nourrissant les systèmes

génétiques de manière plus objective. Le défi est maintenant d'adapter les compétences de conseil pour que l'interprétation de phénotypes objectifs se fasse à la lecture des contextes des systèmes d'élevage.

## Conclusion

Les technologies d'imagerie optique non pénétrante occupent désormais une place croissante dans les différents segments des filières d'élevage et constituent un levier prometteur pour le phénotypage à haut débit des animaux. En élevage bovin, les milliers d'images d'individus déjà acquises au moyen de dispositifs variés traduisent une dynamique réelle de déploiement de ces outils. La valorisation de ces données demeure toutefois encore majoritairement cantonnée au champ de la recherche, mais les avancées récentes indiquent une évolution vers une phase de maturation technologique. L'automatisation progressive des étapes de traitement, et d'extraction d'informations à partir des images lève une partie des verrous opérationnels. Les outils Morpho3D et Deffilait3D ont ainsi montré la pertinence et l'intérêt de ces outils. Des versions facilement transportables de ferme en ferme (Pheno3D, Morpho3D) sont aujourd'hui en phase de déploiement sur le terrain, testées sur différentes races de bovins, y compris croisées, pour obtenir à terme des courbes de référence de développement mieux adaptées à ces races. Les outils évolueront encore, possiblement embarqués sur smartphone pour partie, même si les premières tentatives sur bovins n'ont pas totalement abouti à ce jour. Outre le développement morphologique, ces outils permettent aussi d'estimer les compositions des animaux. Ces outils et approches sont aussi appliqués à d'autres problématiques comme des études sur la glande mammaire chez la chèvre laitière (projet CASDAR CapriMam3D), la détection de boiterie, les suivis de santé et les comportements des animaux, mais aussi à d'autres espèces. Des travaux autour de ces outils sont aussi réalisés dans d'autres pays européens et au-delà, visant aussi à disposer d'outils de phénotypage fiables et de faibles coûts, capables d'appréhender les animaux dans leur globalité. Toutefois, la recherche est face aux défis de développer des infrastructures de stockage et de calcul pour continuer à explorer le potentiel de ces nouvelles technologies, inventer de nouveaux phénotypes et améliorer les modèles de prédiction, tout en optimisant le stockage de données, trop important, souvent peu utile, et fort consommateur d'énergie. Un des enjeux majeurs réside aussi dans la convergence des initiatives. La standardisation des conditions d'acquisition, de validation par rapport à des méthodes de référence bien décrites, des formats de données, des procédures d'annotation et des indicateurs dérivés apparaît comme une condition essentielle à la mutualisation des efforts et à la construction de chaînes de traitement robustes. Une telle harmonisation favorisera le développement de briques méthodologiques et algorithmiques communes, capables d'analyser les images de manière cohérente dans différents contextes. La valeur de ces images dépendra de leur articulation avec des métadonnées contextuelles de qualité et des références phénotypiques, morphologiques ou zootechniques fiables, seules à même de permettre l'apprentissage, l'évaluation et la validation de modèles prédictifs robustes. Le potentiel de l'imagerie ne réside pas uniquement dans la capacité à produire davantage d'images ; l'aptitude collective à structurer un écosystème de données, de méthodes et d'infrastructures pour convertir ces acquisitions en phénotypes exploitables l'apparaît tout autant. Mais cela nécessitera probablement aussi une évolution des compétences des acteurs, y compris les éleveurs, premiers utilisateurs.

## Contribution des auteurs

La rédaction et la révision de l'article ont été coordonnées par Yannick Le Cozler. Tous les auteurs ont participé à la rédaction d'une ou plusieurs parties des différentes versions du manuscrit et de la version finale du texte.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble des personnes impliquées au sein des installations et fermes expérimentales et commerciales, ayant permis le déploiement des outils et la collecte des données. Ils remercient également les personnels de l'entreprise 3D Ouest pour leur aide et collaboration précieuses.

## Références

Alssaaod, M., Schaefer, A. L., Büscher, W., & Steiner, A. (2015). The role of infrared thermography as a non-invasive tool for the detection of lameness in cattle. *Sensors, 15*(6), 14513-14525. https://doi.org/10.3390/s150614513

Arias Hernandez, N. A., Molina, M. L., & Gualdron, 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*, 224-228. https://doi.org/10.1117/12.590779

Banos, G., Coffey, M. P., & Brotherstone, S. (2005). Modeling daily energy balance of dairy cows in the first three lactations. *Journal of Dairy Science, 88*(6), 2226-2237. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72898-8

Bazin, S. (1984). *Grille de notation de l'état d'engraissement des vaches pies-noires*. ITEB-RNED.

Bédère, N., Cutullic, E., Delaby, L., Garcia-Launay, F., & Disenhaus, C. (2018). Meta-analysis of the relationships between reproduction, milk yield and body condition score in dairy cows. *Livestock Science, 210*, 73-74. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2018.01.017

Bocquier, F., Guillouet, P., Barillet, F., & Chilliard, Y. (1999). Comparison of three methods for the in vivo estimation of body composition in dairy ewes. *Annales de Zootechnie, 48*(4), 297-308. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00889803

Bonnet, M., Gruffat, D., & Hocquette, J. F. (2010a). Métabolisme lipidique des tissus musculaires et adipeux. In D. Bauchart & B. Picard (Éds.), *Muscle et viande de ruminant* (pp. 78-88). Éditions Quae.

Bonnet, M., Cassar-Malek, I., Chilliard, Y., & Picard, B. (2010b). Ontogenesis of muscle and adipose tissues and their interactions in ruminants and other species. *Animal, 4*(7), 1093-1109. https://doi.org/10.1017/S1751731110000601

Bonnet, M., Albouy-Kissi, B., Meunier, B., Tisseur, P., Huguel, D., El Jabri, M., & Normand, J. (2020).

*From an open-access computer image analysis method to a smartphone app for beef marbling evaluation* [Communication]. 71st Annual Meeting of the European Federation of Animal Science, Virtual Meeting. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03125797

Bruckmaier, R. M., Gregoretti, L., Jans, F., Faissler, D., & Blum, J. W. (1998). Longissimus dorsi muscle diameter, backfat thickness, body condition scores and skinfold values related to metabolic and endocrine traits in lactating dairy cows fed crystalline fat or free fatty acids. *Journal of Veterinary Medicine Series A, 45*(6-7), 397-410. https://doi.org/10.1111/j.1439-0442.1998.tb00842.x

Calnan, H., Williams, A., Peterse, J., Starling, S., Cook, J., Connaughton, S., & Gardner, G. E. (2021). A prototype rapid dual energy X-ray absorptiometry (DEXA) system can predict the CT composition of beef carcases. *Meat Science, 173*, 108397. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108397

Chaize, M., Le Cozler, Y., Lerch, S., Morel, I., & Xavier, C. (2022). Mesures morphologiques et description linéaire via imagerie 3D chez le bovin à l'engrais : Quelles perspectives ? *La vache mère, 22*(1), 53-59. https://ira.agroscope.ch/fr-CH/publication/49104

Conroy, S. B., Drennan, M. J., Kenny, D. A., & McGee, M. (2010). The relationship of various muscular and skeletal scores and ultrasound measurements in the live animal, and carcass classification scores with carcass composition and value of bulls. *Livestock Science, 127*(1), 11-21. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.06.007

Dechaux, T., Lebreton, A., Do, Y., El Jabri, M., Bruyas, M., Delattre, L., Gillé-Perrier, C., & Allain, C. (2024). *Comparaison de modèles de machine learning pour prédire le poids vif et les scores de pointage morphologique des veaux au sevrage à partir d'images 3D* [Communication]. 11e congrès ECLF, Bologna Italy, 1232-1241.

Do, Y., Allain, C., Dechaux, T., El Jabri, M., Delattre, L., Bruyas, M., Gillé-Perrier, C., & Lebreton, A. (2024). *3D image preprocessing and feature extraction techniques applied to cattle body traits estimation* [Communication]. 11e congrès ECLF, Bologna Italy. 1242-1249.

Drackley, J. K., Wallace, R. L., Graugnard, D., Vasquez, J., Richards, B. F., & Loor, J. J. (2014). Visceral adipose tissue mass in nonlactating dairy cows fed diets differing in energy density. *Journal of Dairy Science, 97*(6), 3420-3430. https://doi.org/10.3168/jds.2014-8014

Elting, E. C. (1926). A formula for estimating surface area of dairy cattle. *Journal of Agriculture Research, 33*(3), 269-279.

Faverdin, P., Fischer, A., Lebreton, A., Xavier, C., & Le Cozler, Y. (2021). *Indirect approaches of digestive processes to determine feed efficiency in dairy cows* [Communication]. 72nd Annual Meeting of the European Federation of Animal Science, Davos, Suisse. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03359985

Fischer, A., Luginbühl, T., Delattre, L., Delouard, J. M., & Faverdin, P. (2015). Rear shape in three dimensions summarized by principal component analysis is a good predictor of body condition score in Holstein dairy cows. *Journal of Dairy Science, 98*(7), 4465-4476. https://doi.org/10.3168/jds.2014-8969

Friggens, N. C., Thorup, V. M., & Edwards, D. (2011). *Estimation à la ferme du bilan énergétique des vaches laitières à l'aide des mesures fréquentes de poids vif et de note d'état corporel* [Communication]. 18e Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris. https://journees3r.fr/wp-content/uploads/2012/02/Texte_9_aide_decision_Friggens-b7b.pdf

Geay, Y., Béranger, C., Grenet, N., & Villeneuve, G. (1969). Estimation de la composition corporelle de la carcasse de jeunes bovins à partir de la composition de la 11e côte. *Annales de zootechnie, 18*(1), 65-77. https://doi.org/10.1051/animres:19690106

Greiner, S. P., Rouse, G. H., Wilson, D. E., Cundiff, L. V. & Wheeler, T. L. (2003). The relationship between ultrasound measurements and carcass fat thickness and longissimus muscle area in beef cattle. *Journal of Animal Science*, *81*(3), 676-682. https://doi.org/10.2527/2003.813676x

Halachmi, I., Polak, P., Roberts, D. J., & Klopcic, M. (2008). Cow body shape and automation of condition scoring. *Journal of Dairy Science, 91*(11), 4444-4451. https://doi.org/10.3168/jds.2007-0785

Hamlin, K. E., Green, R. D., Cundiff, L. V., Wheeler, T. L. & Dikeman, M. E. (1995). Real-time ultrasonic measurement of fat thickness and longissimus muscle area: II. Relationship between real-time ultrasound measures and carcass retail yield. *Journal of Animal Science*, *73*(6), 1725-1734. https://doi.org/10.2527/1995.7361725x

Hansen, M. F., Smith, M. L., Smith, L. N., Abdul Jabbar, K., & Forbes, D. (2018). Automated monitoring of dairy cow body condition, mobility and weight using a single 3D video capture device. *Computers in Industry, 98*, 14-22. https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.02.011

Hedrick, H. B. (1983). Methods of estimating live animal and carcass composition. *Journal of Animal Science, 57*(5), 1316-1327. https://doi.org/10.2527/jas1983.5751316x

Heinrichs, A. J., & Hargrove, G. L. (1987). Standards of weight and height for holstein heifers. *Journal of Dairy Science, 70*(3), 653-660. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(87)80055-3

Heinrichs, A. J., Rogers, G. W., & Cooper, J. B. (1992). Predicting body weight and wither height in Holstein heifers using body measurements. *Journal of Dairy Science, 75*(12), 3576-3581. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(92)78134-X

Idele. (2024). *Quels sont les équipements numériques des éleveurs en France ? Les résultats de l'enquête Sm@rt Elevage 2023*. Institut de l'Élevage – Idele. https://idele.fr/detail-dossier/quels-sont-les-equipements-numeriques-des-eleveurs

Kuzuhara, Y., Kawamura, K., Yoshitoshi, R., Tamaki, T., Sugai, S., Ikegami, M., Kurokawa, Y., Obitsu, T., Okita, M., Sugino, T., & Yasuda, T. (2015). A preliminarily study for predicting body weight and milk properties in lactating Holstein cows using a three-dimensional camera system. *Computers and Electronics in Agriculture, 111*, 186-193. https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.12.020

Lagarrigue, S., & Tixier-Boichard, M. (2011). Nouvelles approches de phénotypage pour la sélection animale. *INRA Productions Animales, 24*(4), 377-386. https://doi.org/10.20870/productions-animales.2011.24.4.3271

Le Cozler, Y., Recoursé, O., Ganche, E., Giraud, D., Danel, J., Bertin, M., & Brunschwig, P. (2012). A survey on dairy heifer farm management practices in a Western-European plainland, the French Pays de la Loire region. *The Journal of Agricultural Science, 150*(4), 518-533. https://doi.org/10.1017/S0021859612000032

Le Cozler, Y., Allain, C., Caillot, A., Delouard, J. M., Delattre, L., Luginbuhl, T., & 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*, 447-453. https://doi.org/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., & Faverdin, P. (2019b). Volume and surface area of Holstein dairy cows calculated from complete 3D shapes acquired using a high-precision scanning system: Interest for body weight estimation. *Computers and Electronics in Agriculture, 165*, 104977. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104977

Le Cozler, Y., Brachet, E., Bourguignon, L., Delattre, L., Luginbuhl, T., & 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), 4635. https://doi.org/10.3390/s22124635

Le Cozler, Y., Dumesny, M., Delouard, J.-M., Delattre, L., Luginbühl, T., & Faverdin, P. (2024). One-shot technology for three-dimensional imaging of large animals: Perspectives for ruminant management. *Translational Animal Science, 8*, txae018. https://doi.org/10.1093/tas/txae018

Le Cozler, Y., Delattre, L., Luginbühl, T., & Dumesny, M. (2026). Monitoring changes in body reserves in gestating dairy heifers with 3D imaging technology: A potential tool to prevent early culling? *Journal of Dairy Science Communications, 7*(1), 23-28. https://doi.org/10.3168/jdsc.2025-0830

Lebreton, A., Allain, C., Delattre, L., Loof, J., Do, Y., & Bruyas, M. (2023). *Validation of a high-throughput movable 3D device for the acquisition of the whole cattle body* [Communication]. 74th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science, Lyon, France. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21265.85601

Lerch, S., De La Torre, A., Huau, C., Monziols, M., Xavier, C., Louis, L., Le Cozler, Y., Faverdin, P., Lamberton, P., Chery, I., Heimo, D., Loncke, C., Schmidely, P., & Pires, J. A. A. (2021). Estimation of dairy goat body composition: A direct calibration and comparison of eight methods. *Methods, 186*, 68-78. https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2020.06.014

Leroy, T., Aerts, J. M., Eeman, J., Maltz, E., Stojanovski, G., & Berckmans, D. (2005). Automatic determination of body condition score of cows based on 2D images. In S. Cox (Ed.), *Precision livestock farming* (pp. 251-255). Wageningen Academic Publisher.

Li, J., Ma, W., Zhao, C., Li, Q., Tulpan, D., Wang, Z., Yang, S. X., Ding, L., Gao, R., & Yu, L. (2022). Extraction of key regions of beef cattle based on bidirectional tomographic slice features from point cloud data. *Computers and Electronics in Agriculture, 199*, 107190. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107190

Li, J., Ma, W., Bai, Q., Tulpan, D., Gong, M., Sun, Y., Xue, X., Zhao, C., & 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*, 171-190. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.04.014

Louis, L., Angeli, N., Pires, J. A. A., Zahariev, A., Chery, I., Hossann, C., Delavaud, A., De La Torre, A., & Lerch, S. (2022). O182 Deuterium oxide elimination kinetics for estimation of body water mass and flux: Developments for a thrifty, rapid and non-invasive method in dairy goats. *Animal – Science Proceedings, 13*(3), 473-474. https://doi.org/10.1016/j.anscip.2022.07.192

Maltz, E. (1997). The body weight of the dairy cow: III. Use for on-line management of individual cows. *Livestock Production Science, 48*(3), 187-200. https://doi.org/10.1016/S0301-6226(97)00026-2

Megahed, A. A., Hiew, M. W. H., Ragland, D., & Constable, P. D. (2019). Changes in skeletal muscle thickness and echogenicity and plasma creatinine concentration as indicators of protein and intramuscular fat mobilization in periparturient dairy cows. *Journal of Dairy Science, 102*(6), 5550-5565. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15063

Menezes, G., Negreiro, A., Ferreira, R., Higaki, S., Casella, E., Alves, A., & Dórea, J. R. R. (2024). Precision identification and weight assessment of cattle using supervised machine learning on body surface keypoints. *Journal of Animal Science, 102*(Suppl. 3), 310-311. https://doi.org/10.1093/jas/skae234.354

Meunier, B., Normand, J., Albouy-Kissi, B., Micol, D., El Jabri, M., & Bonnet, M. (2021). An open-access computer image analysis (CIA) method to predict meat and fat content from an android smartphone-derived picture of the bovine 5th-6th rib. *Methods, 186*, 79-89. https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2020.06.023

Mitchell, H. H. (1928). *Check formulas for surface area of sheep. A Year's Progress in Solving Problems in Illinois*. Rapport annuel de la station expérimentale agricole de l'Université de l'Illinois, Urbana-Champaign, 155-158.

Monteils, V., Sibra, C., Ellies-Oury, M. P., Botreau, R., De la Torre, A., & Laurent, C. (2017). A set of indicators to better characterize beef carcasses at the slaughterhouse level in addition to the EUROP system. *Livestock Science, 202*, 44-51. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2017.05.017

Navajas, E. A., Richardson, R. I., Fisher, A. V., Hyslop, J. J., Ross, D. W., Prieto, N., Simm, G., & Roehe, R. (2010). Predicting beef carcass composition using tissue weights of a primal cut assessed by computed tomography. *Animal, 4*(11), 1810-1817. https://doi.org/10.1017/S1751731110001096

Normand, J., Meunier, B., Bonnet, M., Albouy-Kissi, M., & Bonnet, B. (2023). *Meat@ppli, a smartphone application to predict fat content of beef* [Communication]. 74th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science, Lyon, France. https://hal.inrae.fr/hal-04196578

Oliván, M., Martínez, A., García, P., Noval, G., & Osoro, K. (2001). Estimation of the carcass composition of yearling bulls of "Asturiana de los Valles" breed from the dissection of a rib joint. *Meat Science, 57*(2), 185-190. https://doi.org/10.1016/S0309-1740(00)00092-9

Pastoureau, P. (1990). Physiologie du développement du tissu osseux. *INRA Productions Animales*, *3*(4), 265-273. https://doi.org/10.20870/productions-animales.1990.3.4.4385

Pezzuolo, A., Guarino, M., Sartori, L., & Marinello, F. (2018). A feasibility study on the use of a structured light depth-camera for three-dimensional body measurements of dairy cows in free-stall barns. *Sensors, 18*(2), 673. https://doi.org/10.3390/s18020673

Pires, J. A. A., Bany, D., Rouel, J., Giraud, J.-M., & Chilliard, Y. (2012). *Mesures échographiques pour étudier la mobilisation des tissus sous-cutanés et du muscle chez la vache laitière peripartum* [Communication]. 19e Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris. https://journees3r.fr/wp-content/uploads/2013/01/Texte_13_alimentation_J-A-A-Pires-dde.pdf

Pires, J. A. A., Rouel, J., Bany, D., Troquier, O., Pomiès, D., & Chilliard, Y. (2013). *Étude de la mobilisation des réserves corporelles par la note d'état corporel et des mesures échographiques chez des vaches Prim'Holstein et Montbéliarde en systèmes d'élevage à faibles intrants* [Communication]. 20e Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02748643

Pires, J. A. A., Chilliard, Y., Delavaud, C., Rouel, J., Pomiès, D., & Blanc, F. (2015). Physiological adaptations and ovarian cyclicity of Holstein and Montbéliarde cows under two low-input production systems. *Animal, 9*(12), 1986-1995. https://doi.org/10.1017/S1751731115001317

Pires, J. A. A., Monziols, M., Lamberton, P., Huau, C., De La Torre, A., & Lerch, S. (2024). The use of computed tomography for in vivo estimation of reticulo-rumen and omasum contents in Alpine goats. *Journal of Dairy Science Communications, 5*(4), 283-286. https://doi.org/10.3168/jdsc.2023-0519

Prieto, N., Pawluczyk, O., Dugan, M. E. R., & Aalhus, J. L. (2017). A review of the principles and applications of near-infrared spectroscopy to characterize meat, fat, and meat products. *Applied Spectroscopy, 71*(7), 1403-1426. https://doi.org/10.1177/0003702817709299

Qiao, Y., Guo, Y., Yu, K., & He, D. (2022). C3D-ConvLSTM based cow behaviour classification using video data for precision livestock farming. *Computers and Electronics in Agriculture, 193*, 106650. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106650

Ribeiro, F. R. B., Tedeschi, L. O., Stouffer, J. R., & Carstens, G. E. (2008). Technical note: A novel technique to assess internal body fat of cattle by using real-time ultrasound. *Journal of Animal Science, 86*(3), 763-767. https://doi.org/10.2527/jas.2007-0560

Robelin, J. (1973). Estimation de la composition corporelle des animaux à partir de l'espace de diffusion de l'eau marquée. *Annales de Biologie Animale, Biochimie, Biophysique, 13*(2), 285-305. https://doi.org/10.1051/rnd:19730212

Robelin, J., & Geay, Y. (1976). Estimation of composition of young beef carcasses from composition of 11th rib cut: 2. Chemical composition of carcass. *Annales de zootechnie, 25*(2), 259-272. https://doi.org/10.1051/animres:19760209

Robelin, J. (1986). *Composition corporelle des bovins : Évolution au cours du développement et différences entre races* [Thèse d'État]. Université de Clermont-Ferrand II.

Robelin., J. (1990). Différenciation, croissance et développement cellulaire du tissu musculaire. *INRA Productions Animales*, *3*(4), 253-263. https://doi.org/10.20870/productions-animales.1990.3.4.4384

Ruchay, A., Kober, V., Dorofeev, K., Kolpakov, V., & Miroshnikov, S (2020). Accurate body measurement of live cattle using three depth cameras and non-rigid 3-D shape recovery. *Computers and Electronics in Agriculture, 179*, 11. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105821

Scholz, A. M., Bünger, L., Kongsro, J., Baulain, U. & Mitchell, A. D. (2015). Non-invasive methods for the determination of body and carcass composition in livestock: dual-energy X-ray absorptiometry, computed tomography, magnetic resonance imaging and ultrasound: invited review. *Animal, 9*(7), 1250-1264. https://doi.org/10.1017/S1751731115000336

Schröder, U. J., & 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), 1-14. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72064-1

Simeonova, M. L., Todorov, N. A., & Schinckel, P. (2012). Review of in vivo-methods for quantitative measurement of protein deposition rate in animals with emphasize on swine. *Bulgarian Journal of Agricultural Science, 18*, 455-481. https://agriacad.eu/ojs/index.php/bjas/article/view/5745

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

Spoliansky, R., Edan, Y., Parmet, Y. & Halachmi, I. (2016). Development of automatic body condition scoring using a low-cost 3-dimensional Kinect camera. *Journal of Dairy Science, 99*(9), 7714-7723. https://doi.org/10.3168/jds.2015-10607

Tasdemir, S., Urkmez, A., & 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), 189-197. https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.02.001

Tiercin, A. (2023). *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* [Rapport de stage de fin d'études]. AgroSup Dijon. https://www.hdigitag.fr/content/download/4510/50216?version=1

Thorup, V. M., Edwards, D., & Friggens, N. C. (2012). On-farm estimation of energy balance in dairy cows using only frequent body weight measurements and body condition score. *Journal of Dairy Science, 95*(4), 1784-1793. https://doi.org/10.3168/jds.2011-4631

Van Hertem, T., Viazzi, S., Steensels, M., Maltz, E., Antler, A., Alchanatis, V., Schlageter-Tello, A. A., Lokhorst, K., Romanini, E. C. B., Bahr, C., Berckmans, D., & Halachmi, I. (2014). Automatic lameness detection based on consecutive 3D-video recordings. *Biosystems Engineering, 119*, 108-116. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.01.009

Weber, C., Hametner, C., Tuchscherer, A., Losand, B., Kanitz, E., Otten, W., Singh, S. P., Bruckmaier, R. M., Becker, F., Kanitz, W., & Hammon, H. M. (2013). Variation in fat mobilization during early lactation differently affects feed intake, body condition, and lipid and glucose metabolism in high-yielding dairy cows. *Journal of Dairy Science, 96*(1), 165-180. https://doi.org/10.3168/jds.2012-5574

Wurtz, K., Camerlink, I., D'Eath, R. B., Fernandez, A. P., Norton, T., Steibel, J., & Siegford, J. (2019). Recording behaviour of indoor-housed farm animals automatically using machine vision technology: A systematic review. *PLOS ONE, 14*(12), e0226669. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226669

Xavier, C., Le Cozler, Y., Depuille, L., Caillot, A., Lebreton, A., Allain, C., Delouard, J. M., Delattre, L., Luginbuhl, T., Faverdin, P., & Fischer, A. (2022a). 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), 4508-4519. https://doi.org/10.3168/jds.2021-21337

Xavier, C., Driesen, C., Siegenthaler, R., Dohme-Meier, F., Le Cozler, Y., & Lerch, S. (2022b). Estimation of empty body and carcass chemical composition of lactating and growing cattle: Comparison of imaging, adipose cellularity, and rib dissection methods. *Translational Animal Science, 6*(2). https://doi.org/10.1093/tas/txac066

Xavier, C., Morel, I., Dohme-Meier, F., Siegenthaler, R., Le Cozler, Y., & Lerch, S. (2023). Estimation of carcass chemical composition in beef-on-dairy cattle using dual-energy X-ray absorptiometry (DXA) scans of cold half-carcass or 11th rib cut. *Journal of Animal Science, 101*, skad380. https://doi.org/10.1093/jas/skad380

Xavier, C., Morel, I., Siegenthaler, R., Dohme-Meier, F., Dubois, S., Luginbühl, T., Le Cozler, Y., & Lerch, S. (2024). Three-dimensional imaging to estimate *in vivo* body and carcass chemical composition of growing crossbred bulls. *Animal, 18*(6), 101174. https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101174

Yang, G., Xu, X., Song, L., Zhang, Q., Duan, Y., & Song, H. (2022). Automated measurement of dairy cows body size via 3D point cloud data analysis. *Computers and Electronics in Agriculture, 200*, 107218. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107218

Yue, C., Zhang, X., Zhang, Y., Jiang, H., & Miao, H. (2025). Automatic and accurate measurement of cattle body based on a lightweight YOLOv8-Pose model and 3D point cloud. *Machine Learning with Applications, 20*, 100662. https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2025.100662

Yukun, S., Pengju, H., Yujie, W., Ziqi, C., Yang, L., Baisheng, D., Runze, L., & 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), 10140-10151. https://doi.org/10.3168/jds.2018-16164

Zhao, K., Bewley, J. M., He, D., & Jin, X. (2018). Automatic lameness detection in dairy cattle based on leg swing analysis with an image processing technique. *Computers and Electronics in Agriculture, 148*, 226-236. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.014

Zheng, Z., Zhang, X., Qin, L., Yue, S., & 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*, 107618. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107618

Zwertvaegher, I., Baert, J., Vangeyte, J., De Vliegher, S., Genbrugge, A., & Van Weyenberg, S. (2010). *2D vision based measuring device for teat morphology in dairy cows* [Communication]. 14th International conference on Production Diseases in Farm Animals, Ghent, Belgique. http://hdl.handle.net/1854/LU-1057193

## Résumé

Les technologies basées sur l'imagerie non pénétrante connaissent un essor important depuis plusieurs années dans les élevages, particulièrement en élevages bovins. Utilisées pour le suivi des animaux en croissance ou en lactation, elles permettent, à partir d'images en deux ou trois dimensions, d'avoir accès à de nombreux indicateurs précoces pour le suivi des états corporels (morphologie et composition corporelle), de santé et de bien-être (boiterie, comportement…), afin d'adapter si besoin les conduites d'élevages. Le poids vif, les principaux critères morphologiques usuels tels que le tour de poitrine, la hauteur au garrot, la largeur des hanches ou encore le volume, la surface et la posture des animaux, les épaisseurs et la typologie des tissus sous-cutanés sont ainsi déterminés sur des images, sans risques liés à la manipulation des animaux. Ces outils se développent également en abattoir pour estimer les qualités de la carcasse et de la viande produite ou la composition tissulaire, depuis l'imagerie à rayons X jusqu'aux applications sur smartphone par exemple. Le développement de ces outils et leur optimisation se poursuivent, grâce notamment à l'arrivée de nouvelles méthodes d'analyses de grands ensembles de données, basées sur les outils d'intelligence artificielle. Cela permet d'inclure de nouveaux phénotypes à haut débit dans les programmes de sélection mais les filières bovines laitières et allaitantes sont confrontées au défi de la gestion et de l'archivage des données collectées, afin de limiter le coût et l'empreinte environnementale liés à la gestion des data centers.

**Mots clés :** nouvelles technologies ; numérique ; phénotypage haut débit ; élevage de précision ; bovins ; abattoir

## Abstract

### *Morphological phenotyping using 2D and 3D optical or X-ray imaging: what is its interest for ruminant research and livestock production?*

*The use of non-invasive imaging-based technologies has grown significantly in animal farming over the past decades, especially in cattle farming. Used to monitor growing or lactating animals, these technologies provide access to numerous indicators from two- or three-dimensional images. These indicators include monitoring of body condition (morphology and body composition), health and welfare (lameness, behavior, etc.), which allow adjustments to farming practices as needed. Body weight, key morphological criteria such as chest circumference, height at the withers, hip width, as well as the volume, surface area, posture of the animals, thickness and type of subcutaneous tissues are thus determined from such images, without any risks associated with animal handling. Such an approach has also been developed in slaughterhouses, assess carcass and meat*

*quality, as well as tissue composition, from the use of X-ray imaging to smartphone applications, for example. The development and optimization of these tools are still ongoing, thanks to new methods for analyzing large datasets, based on artificial intelligence use. This makes it possible to include new, high-throughput phenotypes in breeding programs, but the dairy and beef sectors are faced with the challenge of managing and archiving the collected data in order to limit the cost and environmental footprint associated with data center management.*

**Keywords:** *New technologies; Digital; High-throughput phenotyping; Precision livestock farming; Cattle; Slaughterhouse*

LE COZLER, Y., XAVIER, C., MEUNIER, B., DE LA TORRE, A., PIRES, J., DUDOUIT, E., TIERCIN, A., LEBRETON, A., LERCH, S., & BONNET, M. (2026). Le phénotypage morphologique par imagerie 2D et 3D optique ou à rayons X : quel intérêt pour la recherche et l'élevage des ruminants ? *INRAE Productions Animales*, *39*(3), 9995.
https://doi.org/10.20870/productions-animales.2026.39.3.9995

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0).
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fr
La citation comme l'utilisation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, les pages et le DOI en respectant les informations figurant ci-dessus.