

L'imagerie de précision au service de l'expérimentation terrain

Christophe Staub¹, Christophe Huau², Bérangère Pena-Arnaud², Philippe Faverdin³

Résumé. Les progrès technologiques réalisés dans les domaines de l'imagerie offrent de nouveaux outils transposables sur le terrain au service du phénotypage de précision, au niveau des élevages.

Mots-clés : échographie, scanner 3D, imagerie de précision, état corporel, analyse d'images

L'échographie

Introduction

C'est en 1880 que Pierre et Jacques Curie font la première démonstration de l'effet piézoélectrique (propriété d'un corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique). Ainsi, lorsque des cristaux de quartz ou de céramiques (appelés aussi éléments) sont stimulés mécaniquement, ils génèrent un courant électrique lui-même transformé en signal sonore. Ce phénomène est exploité dès 1916 pour la fabrication de sondes ultrasonores destinées à l'exploitation des fonds sous-marins. Basés sur ce même concept, c'est vers 1960 qu'apparaissent les premiers échographes pour l'exploration du corps humain. Depuis cette date, les progrès de l'informatique et de l'électronique ont permis d'améliorer la qualité des images et de diminuer le poids des appareils.

Le principe de l'échographie

Le principe de l'échographie est basé sur l'envoi, par une sonde à la fois émettrice et réceptrice, d'une onde ultrasonore et de l'analyse du signal réfléchi (appelé aussi écho). Les ultrasons sont définis par trois caractéristiques : la vitesse de propagation, la fréquence de vibration et l'intensité.

Contrairement à l'onde lumineuse, l'onde sonore ne se propage pas dans le vide mais dans les milieux solides, liquides et gazeux. La vitesse de propagation de l'onde est proportionnelle à la densité et à l'élasticité du milieu traversé (on parle aussi d'impédance acoustique d'un tissu donné). On peut retenir que l'onde sonore se propage 4 à 5 fois mieux dans l'eau (1480 m/s) et dans les tissus mous (1540 m/s) que dans l'air (330 m/s). L'épaisseur et la surface des cristaux d'une sonde définissent le diamètre du faisceau d'ultrasons. Ainsi, lorsqu'un faisceau d'ultrasons rencontre une limite nette de séparation entre deux tissus d'impédance acoustique différente, une partie d'entre eux est réfléchi (écho), l'autre partie est transmise, mettant en évidence une interface entre les deux tissus que l'appareil traduit en image.

La fréquence de vibration des cristaux (nombre d'oscillations par seconde) est exprimée en hertz (Hz). Plus la fréquence est élevée plus la résolution est bonne mais moins la pénétration de l'onde sonore est profonde (5 Mhz pénétration de 10 cm ; 10 MHz pénétration de 2-3 cm). L'échographie est donc un compromis entre résolution et profondeur explorée.

L'intensité des ultrasons utilisés à titre exploratoire est de l'ordre de 0,001 à 0,1 watt/cm², soit 100 fois inférieure à celle utilisée à titre chirurgical. Il est admis que les effets biologiques n'apparaissent qu'au-delà de 1 W par centimètre carré. L'intensité ultrasonore peut aussi s'exprimer en décibels.

L'échographie de type exploratoire est donc une technique d'imagerie non destructive pour les tissus visualisés et indolore pour l'animal.

1 UE Physiologie Animale de l'Orfrasière, Inra, 37380 Nouzilly, France

2 UMR Génétique Physiologie et Système d'Élevage, Inra, 31326 Castanet-Tolosan, France

3 UMR Physiologie Environnement et Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Élevage, Inra, 35590 Saint Gilles, France
christophe.staub@inra.fr

Conseils dans le choix des matériels

Il est difficile de faire une liste exhaustive des échographes portables compatibles avec l'analyse embarquée en élevage car le marché est régulièrement inondé de nouvelles marques d'appareils. Les prix varient de 2 500 € pour certains appareils de conception chinoise jusqu'à 25 000 €. Évidemment l'ergonomie des systèmes et la qualité des images sont proportionnelles au montant investi. En plus des systèmes classiques dotés d'un moniteur relié à une ou plusieurs sondes, de nombreuses innovations pratiques sont disponibles aujourd'hui : sondes sans fil reliées par bluetooth, écran tactile, système à commande vocale, système compatible avec téléphone portable, système pilotable à distance. L'utilisateur choisit les caractéristiques de son appareil en fonction de ses besoins.

Il existe quatre grands types de sondes, les sondes linéaires, convexes, sectorielles, et volumétriques.

Les sondes linéaires sont plates de longueur variables (2 à 18 cm) constituées d'un nombre d'éléments important (128 voire 192 pour les sondes récentes), elles sont souvent utilisées pour faire de l'imagerie de surface, elles permettent de générer des ultrasons avec des fréquences élevées (de 10 à 50 MHz). Les ondes ultrasonores à forte fréquence sont peu pénétrantes (de quelques mm à quelques cm) mais permettent de créer des images à très haute résolution (1 pixel pour 250 μ m). Les images générées ne sont pas déformées par l'architecture des sondes linéaires qui conviennent donc particulièrement bien à des mesures de longueur et de surface.

Les sondes convexes ou micro-convexes présentent comme leur nom l'indique, une surface bombée, elles sont constituées d'un nombre d'éléments important (128 ou 192), elles sont souvent utilisées pour faire de l'imagerie profonde ou endocavitaire. Elles permettent de générer des ultrasons avec des fréquences moyennes voire faibles (de 3 à 10 Mhz), ayant des distances de pénétrations importantes pour mettre en évidence des structures éloignées de la sonde (de quelques cm à plusieurs dizaines de cm). Les images sont moins résolutive et déformées par l'architecture des sondes convexes qui conviennent particulièrement bien à l'exploration des structures biologiques profondes (images grand-angle jusqu'à 180°).

Les sondes sectorielles (appelées aussi « phased array ») présentent un nombre d'éléments plus réduit (64 en général) concentrés sur une faible distance (1 à 2 cm). Le décalage temporel de l'émission des impulsions d'ultrasons par les différents éléments de la sonde permet d'orienter le faisceau d'ultrasons et de le focaliser sur une zone d'intérêt. Ce type de sondes est particulièrement utile lorsque les obstacles acoustiques n'offrent que des fenêtres d'observations très petites (échographie intercostale par exemple).

Enfin les sondes volumétriques sont munies d'éléments fixés sur une structure mobile qui va pouvoir effectuer une rotation en cours d'acquisition. Cette propriété va permettre de générer des images à différents plans. Les images sont traitées par des logiciels embarqués sur les appareils qui peuvent reconstruire une image tridimensionnelle (fixe ou en temps réel). Ces sondes existent de différentes formes (linéaire, convexe, micro-convexes) et sont particulièrement bien adaptées à la mesure de volumes.

Le post-traitement des images

Les appareils sont tous munis de logiciels permettant de faire des mesures simples, de distance, de surface voire de volume sur les images. L'avantage de travailler avec les logiciels inclus dans les appareils est qu'ils prennent en compte les échelles auxquelles les images ont été acquises. Bien sûr, il est possible d'exporter les images à différents formats graphiques en fonction des appareils (.jpg, .bmp, .tif, .dicom) pour faire des mesures plus complexes voire d'automatiser les analyses. Le logiciel Visilog™ est particulièrement adapté à l'analyse d'images exportées des systèmes échographiques mais nécessite de calibrer les outils de mesure en fonction des paramètres utilisés pendant l'acquisition des images.



L'estimation de la composition corporelle chez les bovins laitiers

L'estimation de la composition corporelle chez des bovins vivants est difficile à réaliser. Les mesures d'épaisseur de tissu adipeux sous-cutané sont réalisées dans les différentes Unités Expérimentales Inra du secteur animal mais aussi par les organismes de sélection des races bovines. Malheureusement, l'hétérogénéité des animaux étudiés, des matériels et des sites anatomiques au niveau desquels les mesures sont réalisées, rend difficile la comparaison des résultats entre les études.

Les résultats ci-dessous représentent la corrélation obtenue entre les mesures échographiques réalisées sur 40 vaches laitières Holstein au niveau de la vertèbre lombaire L4 et la note d'état corporelle (NEC) attribuée subjectivement par les animaliers du site de Méjusseume (**Figure 1**).

Cette mesure, permettant de standardiser l'estimation de la composition corporelle grâce à l'échographie, pourrait aujourd'hui être réalisée systématiquement chez les bovins laitiers.

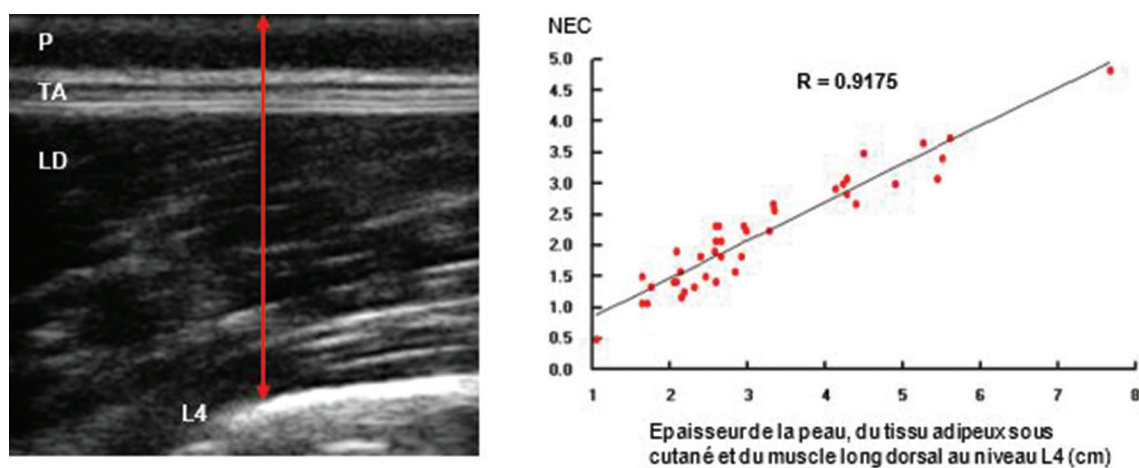


Figure 1. Image échographique (à gauche) réalisée au niveau de l'apophyse transverse de la 4^e vertèbre lombaire (L4) montrant l'épaisseur de la peau (P), du tissu adipeux sous-cutané (TA) et du muscle long dorsal (LD). La hauteur de ses trois structures réunies est significativement corrélée à la note d'état corporel (NEC) estimée sur 40 vaches ($R=0.9175$; $p<0.0001$). (Photo : C. Staub).

L'imagerie en haut débit

Introduction

Les nouvelles technologies en matière d'imagerie ont beaucoup progressé et se sont démocratisées ces dernières années, en particulier grâce au développement des jeux vidéo pour l'analyse des mouvements (Kinect de la Xbox par exemple). Elles ont en particulier apporté la possibilité de faire facilement l'acquisition de formes en trois dimensions à très faible coût et de permettre ainsi facilement des mesures à haut débit. Ces techniques ont été réutilisées à des fins professionnelles.

Dans le domaine de l'élevage, l'analyse de la morphologie de l'animal peut fournir de nombreuses informations et l'apparition de ces formes 3D va permettre de le faire de façon standardisée et d'être moins dépendant d'un « notateur ». Les enjeux associés à la morphologie relèvent de nombreux domaines comme le développement

squelettique, le développement musculaire et la prévision des valeurs bouchères, l'évaluation des réserves corporelles, le stress (interprétation des expressions faciales) ou encore la santé avec des anomalies de posture. Ces techniques peuvent être utilisées rapidement et de manière non invasives avec des animaux de grandes tailles pour lesquels peu d'alternatives existent à part des mesures à la toise ou au ruban.

Notation de l'état corporel

Une première application pour laquelle ces techniques sont utilisées concerne l'évaluation de l'état corporel des vaches laitières avec la possibilité de noter automatiquement les animaux à partir des formes en 3D de la zone du bassin. Le dispositif est basé sur une acquisition à l'aide d'une caméra 3D ASUS® Xtion pro live (**Figure 2**) basée sur le principe de lumière structurée. Une carte de profondeur est créée en analysant l'image de la scène éclairée par une grille de points générée par un projecteur infra-rouge. À partir des formes obtenues sur des vaches (**Figure 2**) qui ont été notées par ailleurs par des notateurs expérimentés pour l'évaluation de l'état corporel (notation sur une grille de 0 à 5), une phase d'apprentissage a été réalisée pour prédire les notes d'état corporel. Cette méthode est entièrement automatisée actuellement (acquisition des images, nettoyage des images, traitements des images) et permet de suivre des cinétiques journalières de l'état corporel de 150 vaches dans les installations expérimentales de Méjusseume. L'erreur de reproductibilité de la mesure automatisée est actuellement de l'ordre de 0,12 et les erreurs de prédiction sont voisines de 0,20. Le phénotypage à haut débit de l'état corporel est un enjeu fort sur les variations à court terme de l'état corporel.

Mesure de conformation des animaux

L'état corporel n'est pas le seul critère d'intérêt de la conformation d'un animal. Une seconde application autour de la morphologie des animaux est en cours de développement. L'objectif est de mettre au point un scanner capable de prendre en image la forme entière de l'animal (projets Crédit incitatif Phase, Casdar MORPHO3D et ANR Deffilait), ce qui est très complexe si l'on veut obtenir une bonne précision avec des animaux. Un scanner 3D a été réalisé par le bureau d'étude de la société 3D Ouest en positionnant cinq couples caméra/laser sur un portique mobile qui avance à une vitesse de 0,5 m/s, permettant l'acquisition de la totalité d'une forme de vache en 4-5 secondes environ (**Figure 3**). Chaque caméra est positionnée de façon décalée avec son faisceau laser associé et la distance de chaque point est calculée à partir du positionnement du faisceau laser dans l'image par une simple triangulation. Le système doit ensuite recalculer les différentes images des cinq caméras et des différentes mesures au cours du déplacement du portique. Les images obtenues avec ce système sont complètes et d'une très bonne résolution. Un logiciel dédié en cours de développement permettra d'analyser simplement les images. L'étape suivante va consister à apprendre à partir de ces nouvelles possibilités de mesures phénotypiques réalisées sur les animaux de façon totalement non invasives et non stressantes. Ces mesures permettront aussi des études à visées physiologiques (aptitudes à la dissipation de la chaleur par des rapports volume/surface ou rapport poids/volume pour estimer le taux de lipides par exemple) et prédictives des performances des animaux (poids de carcasse par exemple). Ces formes 3D présentent aussi l'intérêt de pouvoir être archivées pour une analyse *a posteriori* de phénotypes d'intérêt via la mise au point de nouveaux critères.



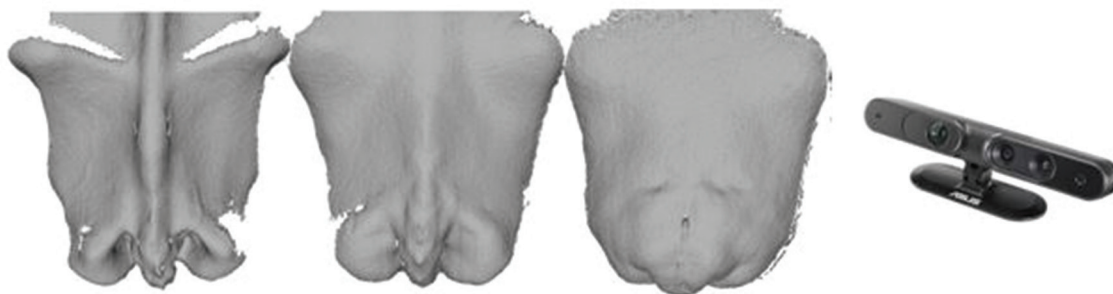


Figure 2. Exemple de formes du bassin de vaches laitières de plus en plus grasses (de gauche à droite) obtenues par un balayage à l'aide de la caméra ASUS® Xtion (image de droite) et utilisées pour la notation automatique de l'état corporel (photo : P. Faverdin).



Figure 3. Photo du scanner en train d'acquérir la forme d'une vache (à gauche) et le résultat du scan complet (à droite) visualisé et traité avec le logiciel Meshlab (<http://www.meshlab.net/>) (photo : P. Faverdin).

Calcul du taux de mue par analyse d'images : un chantier prêt à être automatisé !

Témoignage de Bérengère Pena-Arnaud

Introduction

Dans le contexte actuel, la laine n'est plus un produit valorisé ; elle l'est d'autant moins que la tonte coûte cher à l'éleveur. Dans le but de trouver une alternative à la tonte, un projet de sélectionner des ovins capables de muer naturellement a débuté en 2005 dans l'Unité de Génétique Physiologie et Système d'Élevage. Il n'y avait alors aucun outil pour calculer de façon objective le taux de mue, c'est-à-dire le rapport entre la surface du corps lainée et la surface totale du corps. En charge de la partie technique de ce projet, j'ai créé une méthode d'analyse qui s'articule autour de deux phases: le relevé des données sur animaux vivants en Unités Expérimentales avec des croquis, l'analyse d'image avec un programme informatique.

Collecte des données de perte de laine sur animaux vivants

The image shows an A4 sheet titled 'Enregistrement Observations mnes mouton' (Recording Observations of sheep). It contains 15 silhouettes of sheep arranged in a 5x3 grid. Each silhouette is numbered and has some areas filled with blue or green ink, representing wool loss. The numbers are: Row 1: 25116, 25117, 25118; Row 2: 25119, 25120, 25121; Row 3: 25122, 25123, 25124; Row 4: 25125, 25126, 25127; Row 5: 25128, 25129, 25130. At the bottom, there is a legend for the colors used: 'Attention: REMPLIR les silhouettes au crayon de mine.' (Attention: Fill the silhouettes with a pencil). The legend includes: 'COULEUR: Noir (traitement de la laine) = zone blanche = 0', 'Laine longue (traitement de la laine) = zone bleue = 1', 'Laine moyenne courte = zone verte = 2', 'Laine courte = zone rouge = 3', 'Laine très courte = zone double = 4'.

Feuille de phénotypage en ferme, document Inra

J'ai choisi de réaliser des croquis pour plusieurs raisons : c'est plus facile et plus rapide que de photographier des animaux vivants ; il n'y a pas besoin de contention sur animaux ; enfin, les croquis se font très facilement à raison d'environ 400 animaux par jour. Une feuille de format A4 contenant 15 silhouettes vierges de mouton nous permet de noter de façon schématique les zones du corps lainées ou en renouvellement de pelage pour chaque mouton (cf. photo ci-contre).

Création du programme

J'ai créé un programme informatique qui combine et regroupe différentes fonctions du logiciel d'analyse d'image comme : rechercher les contours, enlever les imperfections avec le seuillage, ajuster le contraste... Ce programme est utilisé dans notre Unité en routine pour analyser l'aptitude à la mue sur 1100 ovins chaque année.

Traitement des croquis

Après avoir transféré sous forme électronique ces croquis, je travaille sur le traitement des données numérisées à partir d'un logiciel de retouche photos afin d'améliorer les contours des zones délainées. Ensuite je traite ces données à l'aide de mon programme qui mesure la surface de peau couverte de laine par rapport à la surface totale de la silhouette d'ovins.

Conclusion

Les données étudiées depuis 11 ans montrent que cette méthode d'analyse est fiable et répétable d'une année sur l'autre. Nous disposons aujourd'hui d'une population d'ovins qui mue à plus de 95% par rapport à des ovins « classiques ». L'étape suivante de ce projet pourrait être l'automatisation sur le terrain de la saisie des zones délainées par le biais d'un scanner numérisant les animaux lors de leur passage au niveau d'un portique comme nous l'avons vu dans l'exemple précédent.