



Étourdissement des bovins au pistolet à tige perforante

Étude des dommages cérébraux provoqués par la tige perforante en fonction de la position du pistolet lors de l'étourdissement des bovins.

Mots clés : abattage, bovins, étourdissement mécanique, dommages cérébraux, inconscience

Auteurs : Frédéric Demota^{1,3}, Cécile Bourguet², Noémie Devriendt², Christophe Mallet³ et Claudia Terlouw^{3*}

¹ DDCSPP Cantal, Aurillac

² Bureau ETRE, Olby

³ Université Clermont Auvergne, INRAE, VetAgro Sup, UMR Herbivores Saint-Genès-Champanelle

* Auteure correspondante UMRH, INRAE Centre de Recherche Clermont-Auvergne-Rhône-Alpes, Route de Theix, 63122 Saint-Genès-Champanelle ; claudia.terlouw@inrae.fr

Différentes recommandations ont été proposées dans la littérature pour étourdir les bovins à l'aide d'une tige perforante. Dans certains cas, différentes interprétations de ces recommandations sont possibles. Dans cette étude les têtes de 19 bovins de races allaitantes ont été observées pour déterminer les résultats de certaines de ces recommandations. Les résultats montrent que certaines positions sont à éviter. D'autres en revanche ont une très forte probabilité d'induire l'inconscience.

Résumé

L'impact de la position du pistolet à tige perforante sur les dommages cérébraux a été étudié sur 19 bovins. L'objectif était de définir une méthode fiable pour léser le Système Réticulé Activateur Ascendant (SRAA) qui est fortement impliqué dans la conscience. Les positions testées ont été deux positions situées à l'intersection des diagonales entre l'œil de l'animal et la base de la corne opposée (positions Basse, Œil-corneB et Haute ; Œil-corneH) et deux positions situées au milieu d'une ligne entre le sommet de la tête et la ligne reliant les deux yeux de l'animal (positions Basse, MédianeB, et Haute, MédianeH). En utilisant la position Œil-corneB, la tige est passée le plus souvent sous le cerveau. Les positions Œil-corneB et Œil-corneH ont été influencées par la forme de la tête. Les positions MédianeB et Œil-corneH ont permis de léser le SRAA d'environ la moitié et les trois-quarts des animaux, respectivement. La position MédianeH a permis quant à elle de léser le SRAA de manière satisfaisante (dans la zone cible : 95% des animaux ; à la limite de la zone cible : 5% des animaux). Les inconvénients de cette position sont le risque d'un tir trop caudal et le fait que les canthi externes des yeux sont plus difficilement repérables. En conclusion, placer le pistolet 1 cm plus bas que la position MédianeH, ou environ 2 à 3 cm plus haut que les positions Œil-corneH ou MédianeB, maximise la probabilité de léser le SRAA, en limitant les risques d'un tir trop caudal.

Abstract: Captive bolt stunning of cattle. Effect of the position of the gun on the brain damage caused by the captive bolt when stunning cattle

The impact of the position of the stun gun brain damage was studied in 19 cattle. The aim was to define a reliable method of damaging the Ascending Reticular Activating System (ARAS), which is strongly involved in consciousness. The positions tested were two positions located at the intersection of the diagonals between the animal's eye and the base of the opposite horn (Low position: Eye-hornB; High position: Eye-hornH) and two positions located in the middle of the line going from the top of the head to the line connecting the animal's two eyes (Low position: MedianB; High position: MedianH). When using the Eye-HornB position, the bolt usually passed below the brain. The Eye-HornB and Eye-HornH positions were influenced by the shape of the head. The MedianB and Eye-HornH positions resulted in damage to the ARAS in approximately half and three-quarters of the animals, respectively. The MedianH position produced satisfactory damage to the ARAS (within the target zone: 95% of the animals; at the limit of the target zone: 5% of the animals). The disadvantages of the latter position are a potentially too caudal position in some animals and the greater difficulty to use outer canthi of the eyes as a landmark. In conclusion, placing the gun 1 cm lower than the MedianH position, or about 2 to 3 cm higher than the Eye-hornH or MedianB positions, maximises the probability of damaging the ARAS, while limiting the risk of a too caudal position.

I. INTRODUCTION

L'étourdissement préalable à la mise à mort en abattoir a pour but d'induire l'inconscience afin que les animaux ne ressentent ni stress, ni douleur lors du hissage et de la saignée (Terlouw *et al.*, 2021a). Cette inconscience doit être maintenue jusqu'à la mort de l'animal qui est provoquée par la saignée.

La conscience peut être décrite comme un « état d'esprit dans lequel l'individu a une connaissance de sa propre existence et de l'existence de son environnement » (Damasio, 2010). Elle a une composante qualitative : la conscience de soi et de l'environnement, également appelée le « contenu de la conscience », et une composante quantitative : le niveau de vigilance ou d'éveil. Le contenu de la conscience fait référence à la connaissance et à la

compréhension qu'un individu a de son environnement et de l'état de son corps. Elle nécessite une intégration des informations sensorielles en provenance du corps et de l'environnement, de ses émotions et de sa mémoire (Le Neindre *et al.*, 2017). Le cortex a un rôle important dans cette fonction (Encadré 1). Le niveau d'éveil détermine le niveau d'activité du cortex. Le niveau d'éveil (et donc, de conscience) est par exemple faible pendant le sommeil lent (non-REM ; Saper *et al.*, 2005). Le niveau d'éveil est régulé par le Système Réticulé Activateur Ascendant (SRAA ; Encadré 1). La conscience n'est donc pas binaire, elle se caractérise par un continuum où coexistent différentes formes et niveaux de conscience (Terlouw *et al.*, 2015). Une lésion du SRAA entraîne une perte d'éveil et rend l'animal inconscient (Encadré 1).

Encadré 1. Le cerveau et les composantes qualitative et quantitative de la conscience

Le cortex cérébral, structure cérébrale externe d'apparence plissée, est la partie périphérique des hémisphères cérébraux. Il est le siège de la composante qualitative de la conscience : il permet de savoir, comprendre et donner un sens à ce qui est perçu (Terlouw *et al.*, 2021a). Les différentes parties du cortex ont des fonctions différentes. Les cortex primaires reçoivent les informations provenant des nerfs périphériques et réalisent un premier décryptage de ces informations. On peut citer les cortex visuel, auditif, gustatif, olfactif et somatosensoriel. Le cortex somatosensoriel traite différentes sensations en provenance du corps, dont la douleur. Le cortex moteur fait également partie des cortex primaires et permet d'exécuter les mouvements. Les cortex associatifs conceptualisent et intègrent l'information dans un contexte plus large, puis planifient la réponse appropriée. Ils permettent de traiter et d'interpréter les informations reçues par les cortex primaires.

Le Système Réticulé Activateur Ascendant (SRAA) se trouve dans le tronc cérébral et est responsable du niveau d'éveil, c'est-à-dire de la composante quantitative de la conscience (Terlouw *et al.*, 2021a). Les corps cellulaires du SRAA sont localisés aux niveaux du mésencéphale et de la partie rostrale du pont. Trois voies nerveuses en émanent et transitent jusqu'au cortex permettant de l'activer (Figure 1). Une de ces voies transite par le thalamus, une structure rostrale par rapport au tronc cérébral. Le thalamus est en charge d'un premier traitement des informations visuelles, auditives, gustatives, somatosensorielles (y compris la douleur) et motrices avant de les transmettre au cortex. Ces transmissions d'informations augmentent l'activité du cortex (Fuller *et al.*, 2011). Une deuxième voie transite par l'hypothalamus, pour atteindre la face basale du télencéphale (Fuller *et al.*, 2011). Cette zone du télencéphale stimule également le cortex (Saper et Fuller, 2017). Une troisième voie stimule directement le cortex (Fuller *et al.*, 2011 ; Brown *et al.*, 2012). Une lésion du SRAA entraîne une perte d'éveil et rend impossible le traitement des informations sensorielles par le cortex ; l'animal est donc inconscient. Cet état est équivalent à l'état comateux (Parvizi et Damasio, 2003).

Figure 1 : Représentation des zones impliquées dans la conscience à partir d'une coupe sagittale de tête de bovin.



Le cortex (zone jaune) est impliqué dans le contenu de la conscience. Le système réticulé activateur ascendant (SRAA) (zone rouge et flèches) est impliqué dans le niveau d'éveil. Les corps cellulaires du SRAA se trouvent dans le mésencéphale et dans la partie rostrale du pont (zone rouge). Il comprend trois voies principales : 1. via le thalamus (flèches oranges), 2. via l'hypothalamus et le télencéphale basal (flèches vertes), ou 3. par voie directe (flèche bleue). TB=Télencéphale Basal, Th=Thalamus, Hypo=Hypothalamus, Més=Mésencéphale, P=Pont, BR = Bulbe Rachidien, Coll=collicules, Cerv=Cervelet. Crédit photo : C.Terlouw, F. Demota et C. Mallet.

Les différentes techniques d'étourdissement ont pour objectif de rendre dysfonctionnelles les structures neurologiques impliquées dans la conscience (Figure 1). Dans le cadre de l'abattage des bovins, l'étourdissement mécanique est la méthode habituelle (EFSA, 2004). L'objectif est de rendre dysfonctionnel le SRAA afin que le cortex ne soit plus activé et que l'animal soit inconscient (Terlouw *et al.*, 2021a). Un pistolet tubulaire renfermant une tige métallique creuse dont l'extrémité est munie de bords tranchants est utilisé pour perforer le crâne de l'animal et léser le SRAA (Finnie, 1993 ; Terlouw *et al.*, 2021a). L'énergie nécessaire à la propulsion de la tige à travers ce dispositif est apportée soit par de l'air comprimé (pistolet pneumatique), soit par une amorce de type cartouche à blanc (pistolet thermique). La puissance des amorces (pistolets thermiques) et la pression utilisée (pistolets pneumatiques) doivent être adaptées au gabarit des animaux abattus (Kamenik *et al.*, 2019 ; Gibson *et al.*, 2015). De manière générale, le pistolet doit être bien entretenu, équipé d'une tige de 10 cm ou plus, et utilisé avec des amorces permettant une sortie de tige d'au moins 10 cm (Gibson *et al.*, 2015 ; Grist *et al.*, 2019).

Le tir du pistolet à tige perforante provoque plusieurs perturbations du fonctionnement normal du cerveau (Kamenik *et al.*, 2019 ; Terlouw *et al.*, 2021a) :

- La percussion de la tige sur le crâne est à l'origine d'une onde de choc qui se propage à l'ensemble du cerveau ; elle peut provoquer des déchirures et des lésions des tissus cérébraux, et une dépolarisation des cellules nerveuses (Finnie, 2001). Cette onde de choc entraîne une diminution

voire une suppression de l'état de conscience de façon souvent temporaire.

- Une destruction mécanique des tissus par la tige perforante. Le passage de la tige perforante et de fragments osseux liés à la perforation du crâne est à l'origine de compressions, de déchirures et de ruptures des tissus. Par un mécanisme d'aspiration, le retrait de la tige endommage également des tissus cérébraux et des vaisseaux sanguins. Les structures du SRAA (thalamus, hypothalamus, mésencéphale et/ou pont rostral) sont ciblées lors du tir. Si elles sont directement atteintes par la tige, l'inconscience provoquée est irréversible.

- Des hémorragies secondaires à la destruction mécanique sont responsables d'une augmentation de la pression intra crânienne, à l'origine d'un dysfonctionnement des structures cérébrales par manque d'apport sanguin. Selon les zones atteintes, des hémorragies étendues peuvent provoquer une inconscience irréversible (Weisberg, 1990 ; Oliveira *et al.*, 2018 ; Terlouw *et al.*, 2021a).

Ainsi, la tige peut provoquer une inconscience durable si le SRAA est lésé et/ou s'il en résulte des hémorragies étendues dans certaines parties du cerveau (Weisberg, 1990 ; Oliveira *et al.*, 2018 ; Terlouw *et al.*, 2021a). Pour un étourdissement satisfaisant, le pistolet doit être placé perpendiculairement au front de l'animal, directement au contact de la peau couvrant le crâne. La localisation recommandée actuellement pour le tir se situe au niveau de l'intersection de deux lignes imaginaires reliant le centre de la base des cornes à l'œil controlatéral (EFSA, 2020).

Sur le terrain, on constate un certain nombre de cas où les bovins présentent des indicateurs de risque de conscience, même si ces cas restent minoritaires (ANSES, 2021). En effet, si la lésion se produit ailleurs que dans le SRAA, sans présence d'hémorragie ou avec des hémorragies insuffisantes, l'animal est blessé mais risque de rester conscient, ou d'être inconscient pendant seulement une

courte durée car les effets de l'onde de choc sont souvent réversibles (Terlouw *et al.*, 2021a). Pour minimiser le risque d'échec d'étourdissement, il faut maximiser la probabilité de léser le SRAA. La présente étude a pour objectif d'étudier différentes positions de tirs sur la tête des bovins afin d'identifier celles qui permettent de léser le SRAA de manière la plus fiable possible.

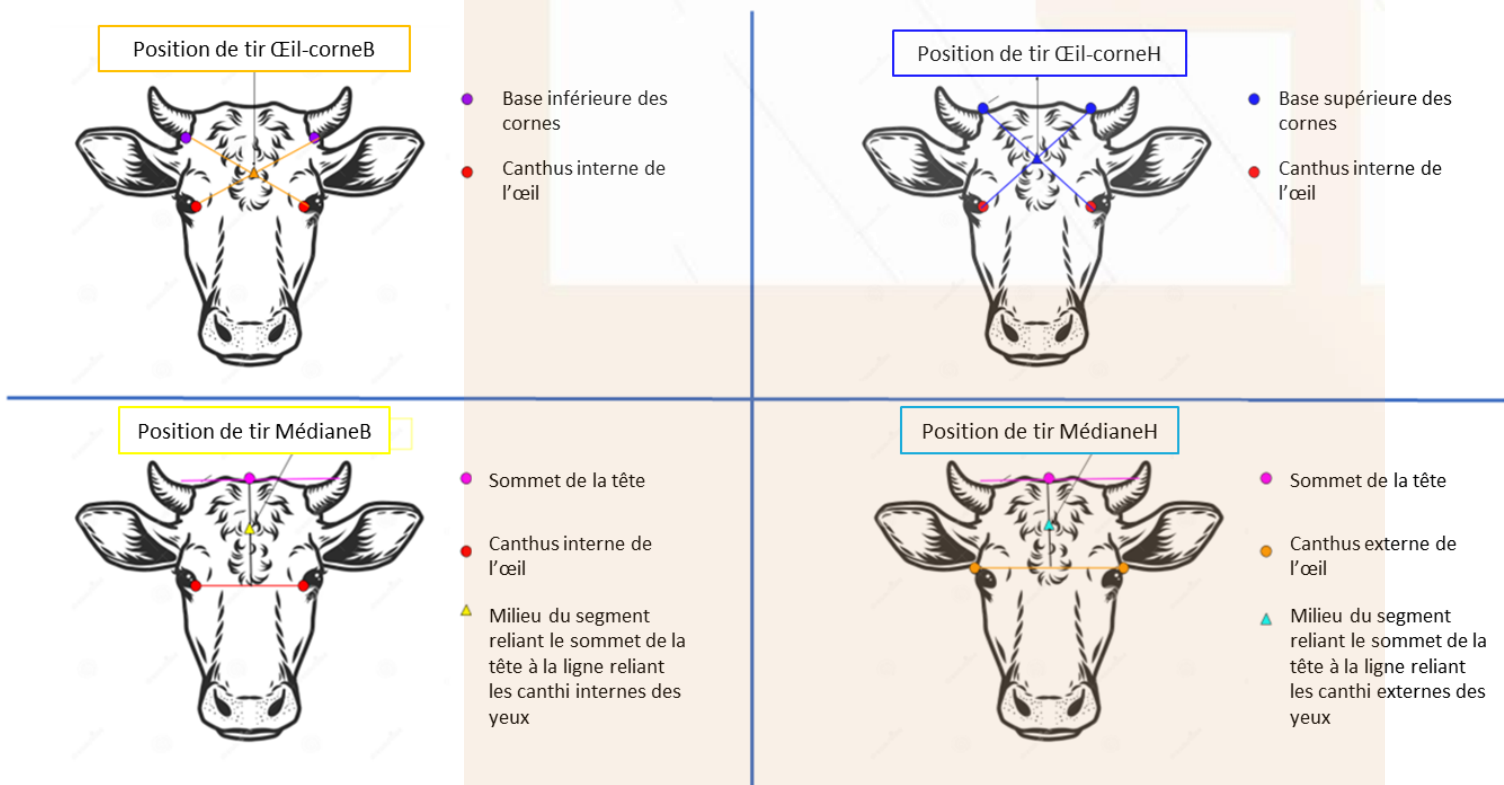
II. MATERIEL ET METHODES

Les conséquences de quatre positions du pistolet à tige perforante sur la tête de bovins allaitants adultes ont été évaluées (Figure 2) :

1. Le pistolet est positionné à l'intersection des diagonales qui relient l'œil de l'animal à la base de la corne opposée (EFSA, 2020). Deux variantes ont été testées : la position Basse (intersection des diagonales entre le canthus interne de l'œil et la base inférieure des cornes ; Œil-corneB) et la position Haute (le canthus interne de l'œil et la base supérieure des cornes ; Œil-corneH).

2. Le pistolet est positionné au milieu d'une ligne séparant le sommet de la tête à la ligne reliant les deux yeux de l'animal. Deux repères anatomiques ont été testés pour les yeux : la position basse (une ligne reliant les canthi internes ; MédianeB) et la position haute (une ligne reliant les canthi externes ; MédianeH). Cette dernière position est préconisée dans d'autres publications (Gilliam *et al.*, 2016 ; Baier et Willson, 2020).

Figure 2 : Représentations schématiques des quatre positions de tir testées : Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB et MédianeH :



Position Œil-corneB : intersection des lignes reliant les canthi internes et la base inférieure de la corne opposée.

Position Œil-corneH : intersection des lignes reliant les canthi internes et la base supérieure de la corne opposée.

Position MédianeB : milieu du segment séparant le sommet de la tête à la ligne reliant les canthi internes des yeux.

Position MédianeH : milieu du segment séparant le sommet de la tête à la ligne reliant les canthi externes des yeux.

II.1. Animaux

L'étude a été conduite au cours d'abattages de routine dans un abattoir expérimental de l'INRAE et dans un

abattoir commercial de proximité de petit tonnage (2000 Tonnes/an). Dix-neuf bovins de plus de douze mois (4

mâles et 15 femelles) et de type allaitant (différentes races et âges) ont été observés (Tableau 1). Trois d'entre eux étaient dépourvus de cornes.

Tous les bovins ont été étourdis à l'aide d'un pistolet d'abattage Matador SS3000 (Termet) qui est un dispositif d'étourdissement thermique à tige perforante de 100 mm de long et de 12 mm de diamètre. Lors de cette étude, des amorces rouges de modèle standard, destiné à tous les animaux de plus de 450kg ont été utilisées. Selon la notice du fabricant, l'utilisation de ces amorces assure une

longueur de sortie de la tige de 85 mm, une vitesse de sortie de tige de 54 m/s et une énergie dégagée de 400 Joules ($\pm 10\%$) ce qui correspond aux paramètres conseillés pour un étourdissement efficace des vaches adultes (Daly *et al.*, 1987 ; Oliveira *et al.*, 2017 ; Gibson *et al.*, 2015 ; Grist *et al.*, 2020). Pour procéder à l'étourdissement, les animaux ont été placés dans un box de contention. L'étourdissement a été réalisé par un opérateur expérimenté dès que l'animal s'était immobilisé dans une position adéquate.

N° bovin	Race	Age (mois)	Sexe	Poids avant saignée (Kg)	Poids après saignée (Kg)	Longueur tête (cm) ¹	Largeur de la tête (cm) ²	Présence de corne
1	Charolais*salers	38	F	594	574	46	25	Non
2	Charolais	16	F	575	556	51.2	25.8	Oui
3	Highland	50.5	M	555	538	50	25	Oui
4	Highland	49.5	M	540	496	49.5	25	Oui
5	Ferrandaise	114	F	704	683	54.2	27.5	Oui
6	Limousine	47	F	599	579	48.8	26.2	Oui
7	Charolais*salers	17	F	585	566	45.5	23.2	Oui
8	Charolais*salers	39	F	842	807	56.3	25.9	Oui
9	Charolais*salers	39	F	790	767	54.7	26.8	Oui
10	Aubrac	27	F			49.7	23.4	Oui
11	Aubrac	37	F			53	25.3	Oui
12	Aubrac	23	M			49.5	26	Oui
13	Croisé* limousine	16	M			53	26.7	Oui
14	Salers	44	F			52.3	25.1	Oui
15	Aubrac	27	F			49.3	23.1	Oui
16	Charolais*salers	18	F	494	479	46.2	22.5	Non
17	Charolais*salers	18	F	536	520	46.5	23.3	Non
18	Charolais*salers	43	F	617	598	50.7	22.9	Oui
19	Ferrandaise	60	F	698	675	53.6	24.9	Oui

Tableau 1. Caractéristiques des animaux expérimentaux.

¹distance entre le sommet de la tête et l'extrémité du museau.

²distance entre les canthi externes des yeux.

Après récupération de la tête, une tige en téflon de 10 mm de diamètre et de 25 cm de long a été introduite dans la trajectoire du tir et des photographies de face et de profil ont été réalisées afin de visualiser l'orientation du tir. La

tige a été ensuite sectionnée au niveau de l'interface avec le cuir et laissée en place afin de visualiser le trajet réel de la tige après la section du cerveau.

II.2. Evaluation de l'inconscience après l'étourdissement.

Les indicateurs de conscience et d'inconscience définis par Terlouw *et al.* (2021b) ont été observés et enregistrés à différents moments post-étourdissement (Tableau 2) sans interférer avec le déroulement du travail effectué par les opérateurs : T1 Immédiatement après le tir : l'animal est dans le piège ; T2 Affalage : l'animal est affalé sur le sol dans le piège ; T3 Accrochage : L'opérateur passe l'élingue autour de la patte postérieure de l'animal ; T4 Début du

hissage : Le corps de l'animal commence à être soulevé du sol par l'éleveur; T5 Fin du hissage : l'animal est suspendu sur le rail de saignée ; T6 Au moment de la saignée : l'opérateur réalise la première incision rétro-maxillaire ; T7 En cours de saignée ; T8 En fin de saignée : Arrêt des écoulements continus de sang (filet de sang). La position du tir et le nombre de tirs ont été également notés.

Tableau 2 : Indicateurs relevés à différents moments après l'étourdissement (d'après Terlouw *et al.*, 2021b)

Indicateur	Moments post-étourdissement
Perte instantanée et permanente de la posture debout sans tentative de redressement	T1, T2, T3, et T4
Tentatives de redressement coordonnées de la tête ou du corps	T1 à T8
Vocalisation spécifique à l'espèce	T1 à T8
Poursuite oculaire	T1 à T8
Rotation du globe oculaire et/ou nystagmus	T1 à T8
Clignements spontanés répétés	T1 à T8
Réflexe cornéen	T1 à T8
Respiration rythmique	T1 à T8

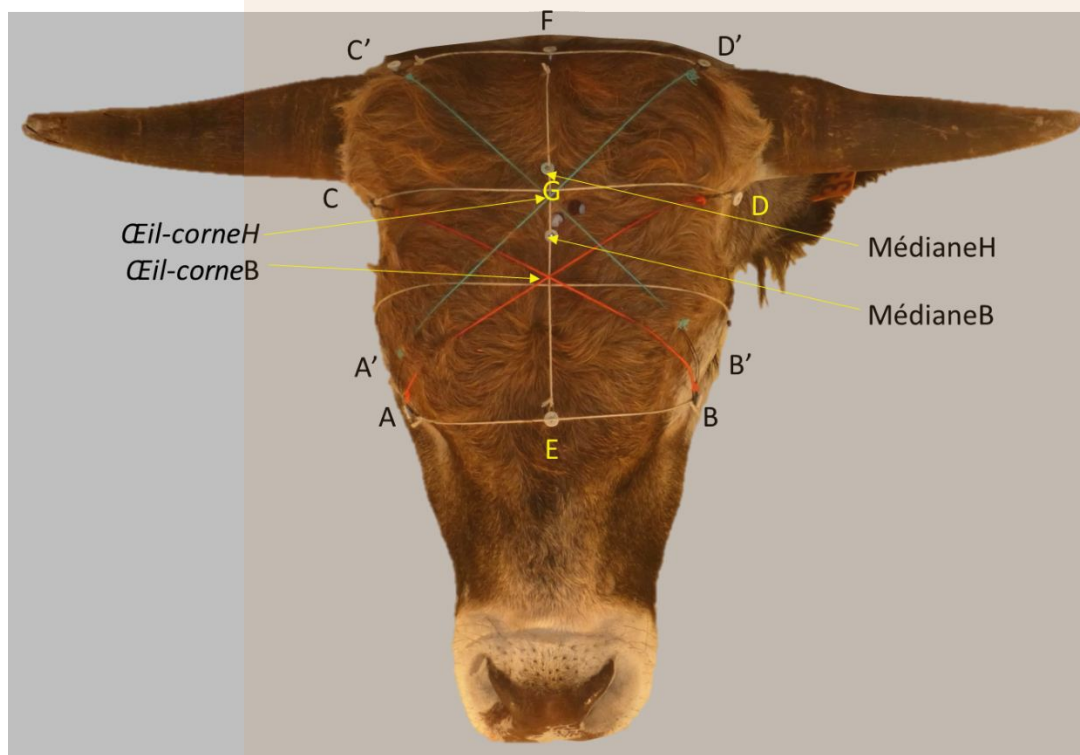
II.3. Matérialisation et enregistrement des positions de tirs Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB et MédianeH sur les têtes entières.

Les positions de tir Œil-corneB et Œil-corneH ont été matérialisées par le croisement de fils de couleur tendus entre les yeux et les cornes, puis par un poinçonnage du cuir permettant de les repérer pour la suite de l'expérimentation. Les positions de tir MédianeB et MédianeH ont été matérialisées par la pose de vis. Des mesures ont été réalisées pour chaque bovin. Elles ont porté à la fois sur des distances entre les repères anatomiques choisis et sur des distances entre le sommet de la tête et les quatre positions de tir théoriques évaluées (Fig. 3). La position du tir réelle a également été enregistrée. En raison

de l'emplacement des canthi externes des yeux sur le côté de la tête, l'emplacement souhaité des ficelles comme repère a été plus difficile à déterminer visuellement pour la position MédianeH, que pour les autres positions.

Des mesures de la longueur et de la largeur de la tête, et des distances entre les repères anatomiques latéraux ont été réalisées à l'aide d'un pied à coulisse. Les mesures des repères localisés sur la ligne médiane ont été réalisées à l'aide d'un mètre rigide.

Figure 3 : Exemple d'une préparation de tête pour matérialiser les positions de tir théoriques (Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB, MédianeH) et les distances à mesurer (AB, A'B', CD, C'D', EF, F-Œil-corneB, F-Œil-corneH, F-MédianeB, F-MédianeH). A, B : canthi internes ; A', B' : canthi externes ; C, D : bases inférieures des cornes, C', D' : bases supérieures des cornes, E : milieu de AB, G : milieu de CD, F : sommet de la tête.



Des photographies ont été réalisées à l'aide d'un appareil photographique Panasonic DMC-FZ-200 équipé d'un objectif avec zoom T 2.8 25-600mm avec une ouverture de diaphragme de 7.1. Des vues de face ainsi que

des vues frontales (axe du front parallèle à l'axe de l'appareil photo) ont été prises pour chaque animal, après matérialisation des positions théoriques de tir Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB et MédianeH (cf. Fig. 4).

II.4. Réalisation de coupes sagittales des têtes et analyse des trajectoires des tirs pour les positions Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB et MédianeH.

Après l'identification des quatre positions théoriques de tir, les têtes ont été congelées, puis coupées dans le plan sagittal à l'aide d'une scie à ruban. Les localisations des tirs Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB et MédianeH sont reportées sur les plans de section (Figure 4).

Les épaisseurs du cuir et de l'ensemble os frontal/sinus frontal ont été enregistrées pour les différentes positions de tir. La distance entre la limite rostrale du cerveau et le sommet de la tête a également été enregistrée (noté F-lim.cerv).

II.5. Analyse des trajets théoriques des tirs pour chaque position Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB et MédianeH

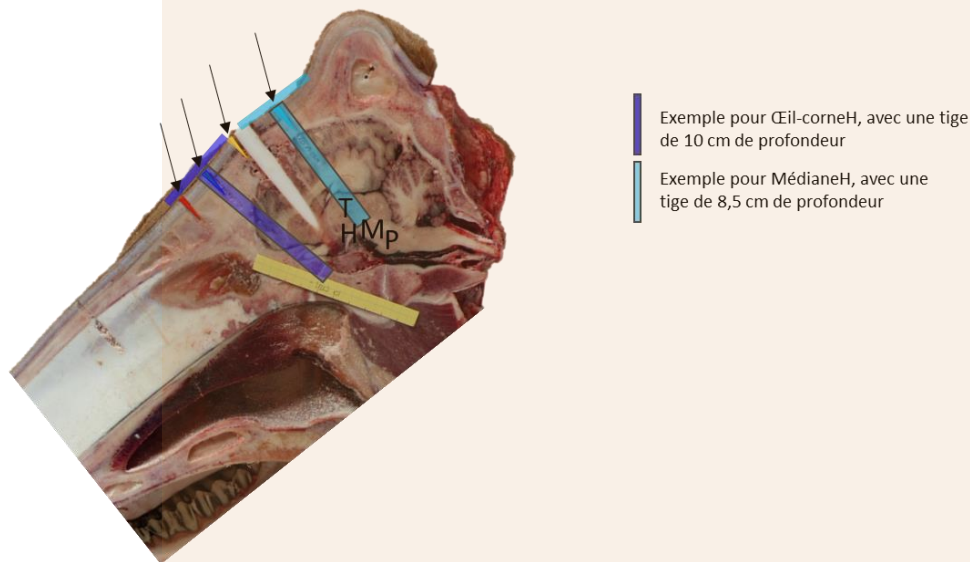
En partant du principe qu'un tir sur la ligne médiane est perpendiculaire à l'os du crâne de l'animal, les structures anatomiques présentes sur le trajet théorique de la tige ont été identifiées, pour des longueurs de tiges de 8,5 cm, qui est la profondeur d'enfoncement minimale de la tige indiquée par le fabricant, et pour une longueur de tige de 10 cm, qui est la profondeur moyenne des tirs observés dans cette étude.

Pour les tirs réels excentrés de plus d'un centimètre de la ligne médiane, une coupe paramédiane (parallèle à la

Plusieurs séries de photographies des plans de sections sagittaux droits et gauches ont été réalisées en plaçant les têtes horizontalement par rapport au sol. Un appareil photographique Canon EOS 250 D-NU équipé d'un objectif EF-S 24/2.8 STM (diamètre d'ouverture du diaphragme de 7.1) a été utilisé. Ce dernier était fixé sur une potence permettant de positionner l'appareil parallèlement au sol et donc au plan de section à photographier.

coupe médiane) a été réalisée, traversant la tige en téflon, afin de réaliser des photographies. Ces photographies ont été utilisées pour identifier les structures anatomiques d'intérêt (thalamus, hypothalamus, mésencéphale, pont) atteintes. Pour ce faire, pour chacune des positions, les tiges ont été dessinées dans la photographie, avec les 2 profondeurs étudiées (8,5 et 10 cm) (cf. Fig. 4). La profondeur de chaque tir réel a été déterminée en mesurant la longueur d'enfoncement de la tige en téflon.

Figure 4 : Illustration de la méthode d'analyse. Coupe sagittale de la tête d'un des bovins, avec un gabarit (en carton jaune) de 10 cm comme référence.



Des marqueurs colorés sur la tranche du crâne (indiqués par les flèches) désignent les positions Œil-corneB (rouge), Œil-corneH (bleu foncé), MédianeB (jaune) et MédianeH (bleu clair). L'image illustre l'approche utilisée pour déterminer si les structures ciblées (T=Thalamus, H=Hypothalamus, M=Mésencéphale, P=Pont) sont atteintes, avec 2 exemples : les positions Œil-corneH (pour une longueur de tige de 10 cm) et MédianeH (pour une longueur de tige de 8,5 cm). On remarque que les positions Œil-corneH et MédianeH n'ont pas la même inclinaison, à cause de la forme du crâne. Cet exemple, y compris l'inclinaison plus rostrale pour la position MédianeH par rapport à Œil-corneB, Œil-corneH et MédianeB, sont représentatifs de ce qui a été observé dans la majorité des têtes de cette étude.

II.6. Analyses descriptives et statistiques

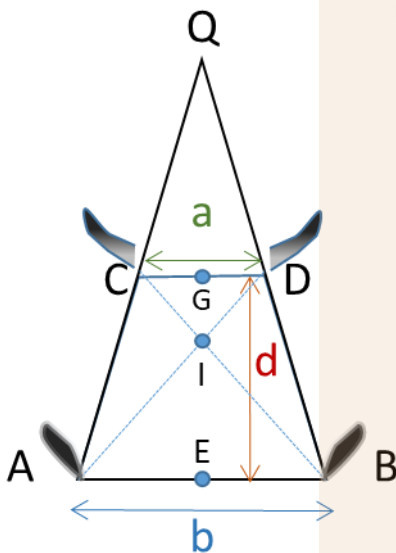
Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel Addinsoft XLstat, version 2020.5.1. Pour chaque position Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB et MédianeH, les moyennes, les écart-types et les coefficients de variation ($CV = \text{écart-type}/\text{moyenne}$) des distances par rapport au sommet de la tête des positions de tirs ont été calculés afin de déterminer leurs emplacements et la variabilité de ces emplacements, par rapport à un point fixe (le sommet de la tête). Les coefficients de variation ont été comparés à l'aide du test statistique de Forkman (Forkman, 2009 ; MedCalc Version 22.009). Les écarts interquartiles (différence entre le quartile supérieur et le quartile inférieur) ont été utilisés pour décrire la variabilité entre individus pour chaque position. Cet indicateur donne l'étendu (fourchette) des mesures en excluant les 25% des valeurs les plus basses et les 25% des valeurs les plus élevées. Les épaisseurs d'os et de peau aux différentes positions Œil-corneH, MédianeB et MédianeH ont été comparées à l'aide de tests de Student appariés.

L'effet de la forme de la tête sur les 4 positions a été évalué. Premièrement, des corrélations de Pearson ont été calculées entre les différentes distances afin d'étudier les liens entre les positions de tir Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB et MédianeH et les caractéristiques morphologiques des têtes. Deuxièmement, pour caractériser les différentes formes des têtes, les distances entre les canthi internes des yeux ont été soustraites des distances entre les bases des cornes. Cette approche a permis de caractériser les formes globales des têtes en termes de trapèze (distance entre canthi internes plus large

qu'entre les bases des cornes), de rectangle (distances entre canthi internes et entre les bases des cornes similaires), ou de trapèze inversé (distance entre canthi internes moins large qu'entre les bases des cornes). En utilisant des calculs géométriques et trigonométriques, il a été anticipé que la forme de la tête influence la distance des positions Œil-corneB et Œil-corneH par rapport au sommet de la tête (encadré 2 ; Fig. 5). Il a été anticipé que ce ne serait pas le cas pour les positions MédianeB et MédianeH qui devraient être essentiellement liées à la distance entre la ligne entre les yeux et le sommet de la tête (segment EF ; Fig. 5). Afin de déterminer quelles caractéristiques morphologiques influencent le plus les différentes positions, des régressions multiples ont été réalisées, pour identifier le modèle optimal avec un maximum de 3 variables explicatives retenues. Si le modèle a retenu plusieurs variables explicatives, le R2 ajusté est indiqué comme mesure de la variabilité entre les individus expliqués par le modèle ainsi que la significativité (valeur de p) du modèle. Si seule une variable a été retenue par le modèle, ces valeurs ne sont pas données puisque les corrélations simples sont déjà présentées : la valeur du r de Pearson au carré représente la variabilité entre les individus expliqués par la corrélation.

Enfin, la capacité à atteindre les zones cibles a été évaluée en déterminant le nombre de têtes pour lesquelles chaque position Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB et MédianeH, permet d'atteindre les différentes structures anatomiques identifiées comme cibles (thalamus, hypothalamus, mésencéphale, pont ; cf. Fig. 4).

Encadré 2. Approche géométrique décrivant l'emplacement de Œil-corneB et Œil-corneH selon la morphologie de la tête.



Le trapèze ABCD représente une tête de bovin. L'exemple concerne la position Œil-corneB. Le même raisonnement s'applique à la position Œil-corneH.

Le segment CD a une longueur « a », le segment AB a une longueur « b », la hauteur du trapèze est « d ». Le point G est le milieu du segment CD et le point E est le milieu du segment AB. Le point I représente l'intersection des diagonales (emplacement théorique du pistolet).

Selon le théorème de Thalès :

$$QC/QA = QD/QB = CD/AB \text{ et } GI/IE = GD/EA \rightarrow GI/GD = IE/AE$$

$$D'où GI = GD \times (IE/AE)$$

$$\text{Or, } IE = d - GI \text{ et } CD = 2 \times GD \text{ et } AB = 2 \times AE \rightarrow GI = GD \times (d - GI)/AE$$

$$D'où GI = d \times CD/(AB + CD)$$

$$\rightarrow GI = (d \times a)/(a + b).$$

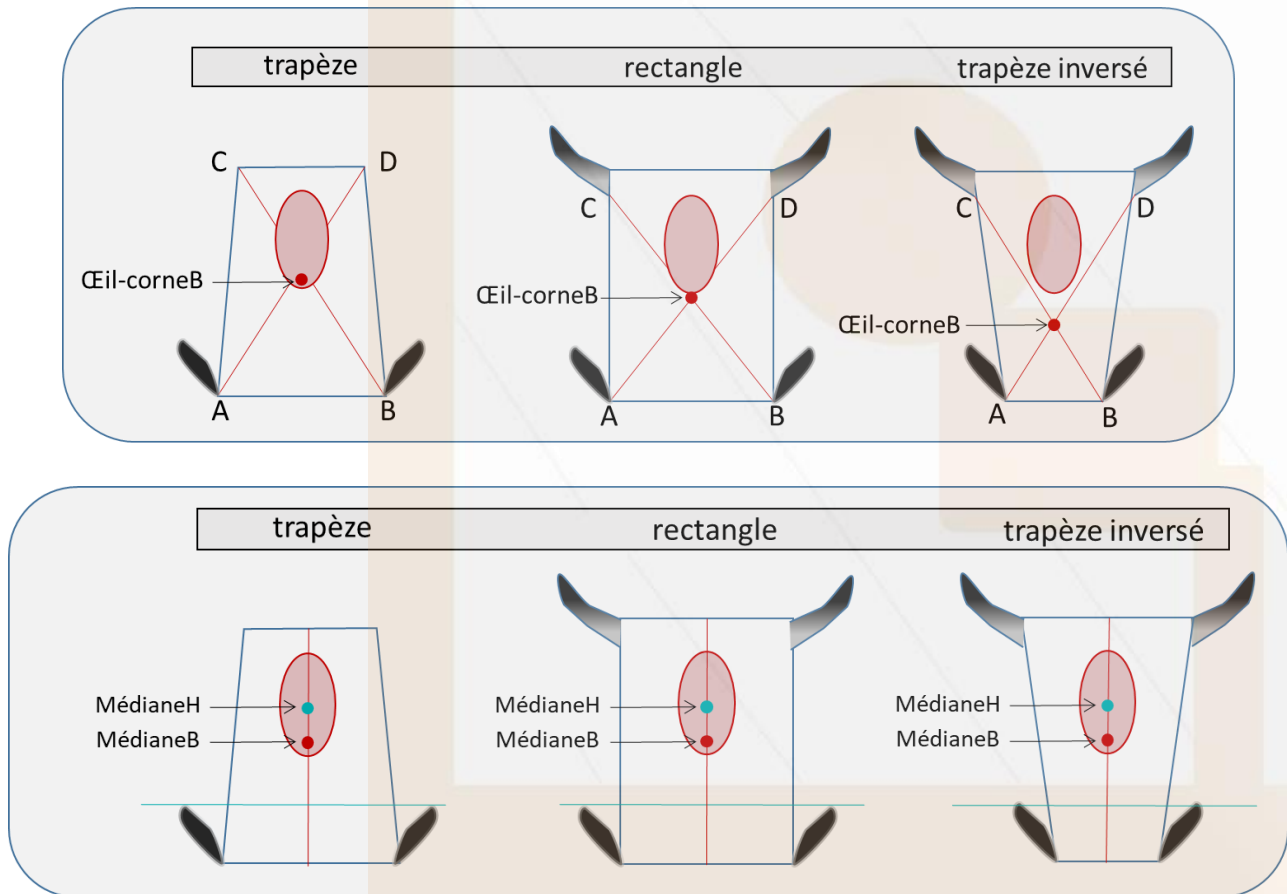
Conclusion : La hauteur de l'intersection dépend du rapport entre la largeur du haut de la tête et la largeur entre les yeux. Ecrit autrement : $GI = d/(1 + b/a)$.

Conclusion, pour une valeur de d donnée :

- plus le rapport b/a est grand (sommet de la tête étroit par rapport à la distance entre les yeux), plus l'emplacement préconisé de tir sera localisé haut par rapport au sommet de la tête (Fig. 5).
- plus le rapport b/a est petit (sommet de la tête large par rapport à la distance entre les yeux), plus l'emplacement préconisé de tir sera localisé bas par rapport au sommet de la tête (Fig. 5).

Figure 5 (haut) : Représentation schématique des différentes formes de têtes observées. Le cerveau est représenté par un ovale rose. Seules les distances A-B et C-D varient, ainsi que la présence/absence de cornes (avec une largeur C-D moindre en cas d'absence des cornes). Plus le sommet est large par rapport à la distance entre les yeux, plus le tir sera bas en utilisant la position Œil-corneB ou Œil-corneH.

Figure 5 (bas) : Représentation schématique de l'absence d'effet de la largeur entre les cornes et entre les yeux pour les positions de tirs MédianeB et MédianeH. Le cerveau est représenté par un ovale rose. Mathématiquement, il est attendu que les positions de tir MédianeB et MédianeH varient uniquement en fonction de la distance entre la ligne entre les yeux et le sommet de la tête.



III. RESULTATS

Dix-huit animaux sur 19 ont présenté tous les indicateurs d'inconscience relevés après le premier tir. Seul un animal a reçu deux tirs, lié à une mauvaise orientation du premier tir en raison d'un mouvement brusque de la tête

de l'animal. Le second tir a été réalisé immédiatement après l'apparition des indicateurs de risque de conscience et a été efficace en provoquant la disparition de tous les indicateurs de risque de conscience.

III.1. Emplacement des positions des tirs Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB et MédianeH sur la tête des bovins

Pour chaque tête, la position de tir MédianeH était la plus caudale (la plus proche du sommet de la tête) et la position de tir Œil-corneB la plus rostrale (la plus proche du museau ; Tableau 3 ; Fig. 6). Les positions de tir Œil-corneH et MédianeB étaient intermédiaires par rapport aux autres positions. La position Œil-corneH était plus haute que MédianeB chez 6 des 19 animaux. Chez deux animaux, les positions Œil-corneH et MédianeB étaient identiques. La distance moyenne entre les positions de tir MédianeB et MédianeH était de $3,7 \pm 0,12$ cm et entre Œil-corneH et

MédianeH de $3,4 \pm 0,29$ cm. Le coefficient de variation de MédianeB était significativement plus bas que pour Œil-corneB (Forkman : $p=0,01$) et Œil-corneH (Forkman : $p<0,03$). La position Œil-corneB pouvait se trouver jusqu'à 4 cm en dessous de la limite rostrale du cerveau (Fig. 6). Pour la distance à l'extrémité rostrale du cerveau, les écarts interquartiles étaient de 1,40 ; 1,45 ; 0,85 et 1,15 cm pour les positions Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB et MédianeH, respectivement.

Figure 6 : Boîtes à moustaches illustrant les distances entre les différentes positions Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB et MédianeH et le sommet de la tête et la limite rostrale du cerveau. Les boîtes vertes représentent les écarts interquartiles (contenant 50% des animaux). Le trait horizontal indique la médiane ; la croix rouge indique la moyenne. Les rhomboïdes indiquent les valeurs extrêmes. Les moustaches indiquent l'étendu des mesures représentatives selon Tukey ($Q3 + 1,5 \times (Q3-Q1)$ et $Q1 - 1,5 \times (Q3-Q1)$).

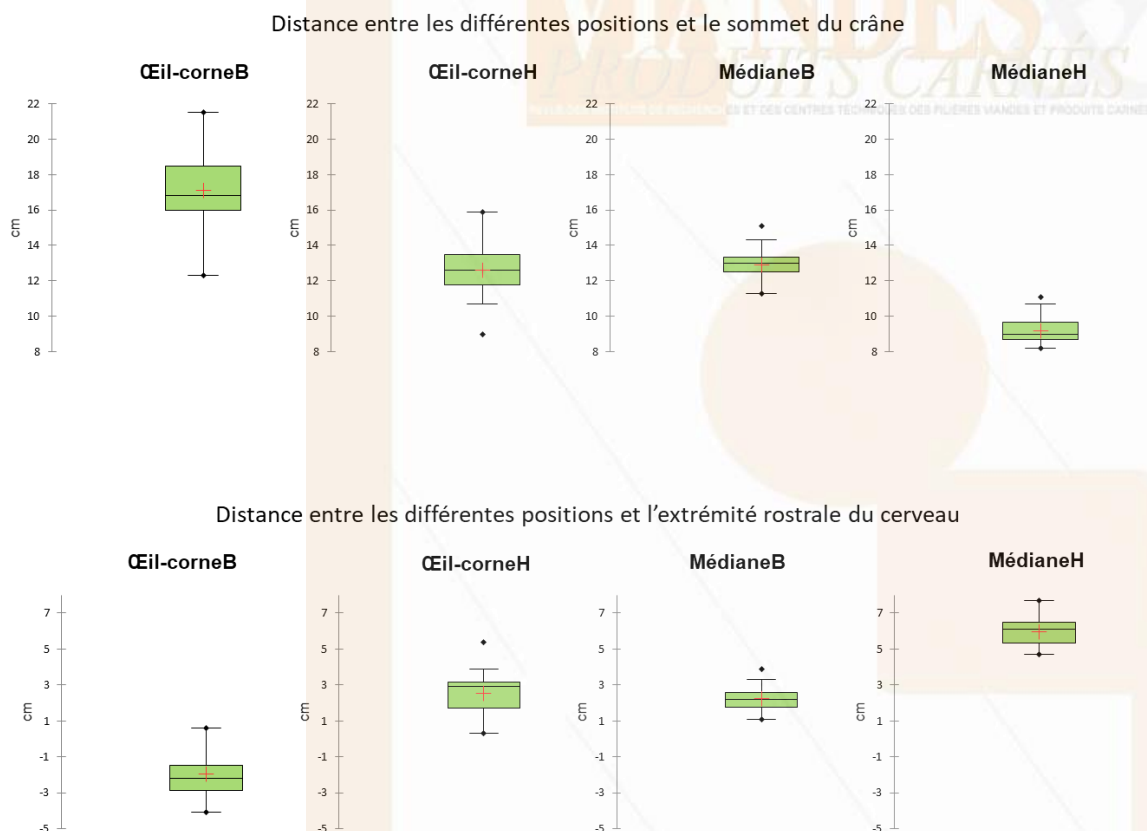


Tableau 3 : Distances moyennes et écart-types des positions de tir Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB et MédianeH par rapport au sommet de la tête des bovins.

Position de tir →	Œil-corneB	Œil-corneH	MédianeB	MédianeH
Distance moyenne par rapport au sommet (cm)	17,10	12,60	12,92	9,17
Ecart-type de la moyenne (cm)	0,50	0,36	0,21	0,19
Écarts interquartiles (cm)	2,5	1,75	0,85	0,95
Coefficient de variation	0,13	0,12	0,07	0,09

III.2. Caractéristiques morphologiques des têtes

Les distances entre les bases inférieures (segment CD) et supérieures des cornes (segment C'D') étaient les plus variables entre les individus, comme en témoignent les coefficients de variation (Tableau 4). Les corrélations entre les mesures de la tête étaient significatives, à part la distance entre les milieux de la ligne reliant les yeux et celle reliant les bases inférieures des cornes (segment EG ; Tableau 5).

La limite rostrale du cerveau était située en moyenne à $15,1 \pm 0,3$ cm du sommet de la tête. La distance entre la

limite rostrale du cerveau et le sommet de la tête était significativement corrélée à toutes les autres caractéristiques morphologiques, sauf à la distance entre les milieux de la ligne reliant les yeux et celle reliant les bases inférieures des cornes (EG ; Tableau 5). La corrélation entre la limite rostrale du cerveau et la distance séparant la ligne entre les canthi des yeux du sommet de la tête (EF) était particulièrement forte (Tableau 5 ; Figure 7).

Tableau 4 : Statistiques portant sur les longueurs des différents segments (en cm) (Figure 3).

Segment entre :	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type de la moyenne	Coefficient de Variation	Valeur de p (Forkman) ¹
Les canthi internes des yeux (AB)	18,2	22,5	19,9	0,3	0,06	a
Les canthi externes des yeux (A'B')	22,5	27,5	24,9	0,3	0,06	a
Les bases inférieures des cornes (CD)	14,4	26,2	21,7	0,7	0,14	b
Les bases supérieures des cornes (C'D')	12,9	25,2	19,6	0,8	0,18	b
Les milieux de la ligne reliant les yeux et celle reliant les bases inférieures des cornes (EG)	15,3	20,5	17,4	0,3	0,07	a
La ligne entre les canthi internes des yeux et le sommet de la tête (EF)	22,8	29,8	25,8	0,4	0,07	a
Le sommet de la tête et la limite rostrale du cerveau (F-lim.cerv)	12,9	17,4	15,1	0,3	0,08	a
Extrémité rostrale du cerveau et la ligne soustrait de EF)	9,5	12,4	10,7	0,2	0,08	a

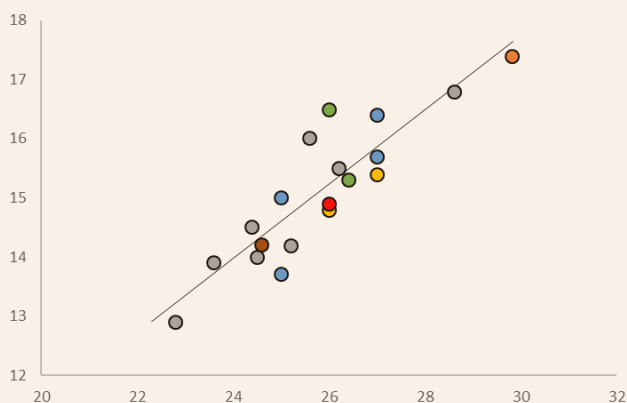
1 : Dans cette colonne, si les lettres sont différentes (a, b), les CV sont différents : $p < 0,01$

Tableau 5. Corrélations (valeurs de r de Pearson) entre les longueurs des différents segments ; *, **, * et **** : $p < 0,05$; $< 0,01$; $< 0,001$; $< 0,0001$**

Segment entre :	les canthi internes des yeux (AB)	A'B'	CD	C'D'	EG	EF	F-lim.cerv
Les canthi externes des yeux (A'B')	0,91****						
Les bases inférieures des cornes (CD)	0,52*	0,68**					
Les bases supérieures des cornes (C'D')	0,47*	0,52*	0,78****				
Les milieux de la ligne reliant les yeux et celle reliant les bases inférieures des cornes (EG)	0,14	0,14	-0,29	-0,35			
La ligne entre les canthi des yeux et le sommet de la tête (EF)	0,69**	0,70***	0,76***	0,68**	0,14		
Le sommet de la tête et la limite rostrale du cerveau (F-lim.cerv)	0,65**	0,71***	0,83****	0,78****	-0,05	0,89****	
Longueur de la tête	0,73***	0,65**	0,47*	0,51*	0,01	0,78****	0,63**

Figure 7 : Relation entre la distance de la limite rostrale du cerveau et le sommet de la tête (F-lim.cerv), et la distance séparant la ligne reliant les yeux du sommet de la tête (EF ; cf Tableau 5). Aubrac : bleu ; Charolais et Charolais*Salers : gris ; Ferrandaise : jaune ; Highland : vert ; Croisé Limousine : orange ; Salers : rouge ; Limousine : marron. L'échantillon était trop petit pour analyser les effets statistiques du sexe ou de la race.

Distance séparant la limite rostrale du cerveau du sommet du crâne (cm)



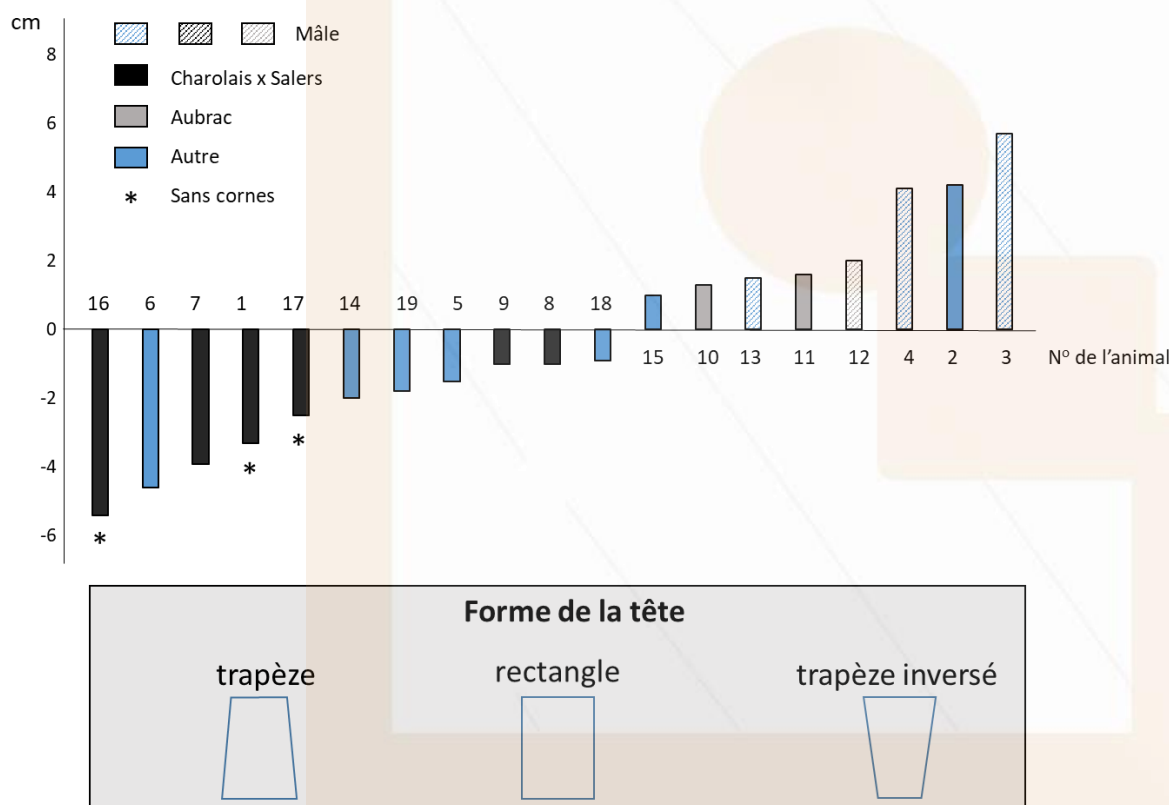
Distance séparant la ligne entre les yeux du sommet du crâne (cm)

Afin de caractériser les formes des têtes (trapèze, rectangle ou trapèze inversé), les distances entre les canthi internes des yeux ont été soustraites aux distances entre les bases des cornes. Les différences entre ces distances étaient de $1,83 \pm 0,6$ cm (min. -3,9 ; max. 6,6 cm) et $-0,34 \pm 0,7$ cm (min. -5,4 ; max. 5,7 cm) pour les bases inférieures et supérieures, respectivement. En moyenne, par rapport à la distance entre les yeux, la distance était donc plus élevée entre les bases inférieures des cornes et moins élevée entre

les bases supérieures. Cependant, il y avait une grande variabilité entre les individus (Fig. 8). L'échantillon était trop petit pour analyser les effets statistiques du sexe ou de la race. Toutefois, dans notre échantillon, les mâles avaient des sommets de tête plus larges que la médiane. A l'inverse, les croisés Charolais*Salers sans cornes avaient des sommets de tête moins larges que la médiane.

Figure 8 : Caractérisation des formes globales des têtes des bovins calculées en soustrayant la distance entre les canthi internes des yeux de la distance entre les bases inférieures des cornes.

Les animaux à gauche du graphique ont le sommet de la tête relativement étroit (trapèze), ceux à droite ont le sommet de la tête relativement large (trapèze inversé). Cf. Tableau 1.



III.3. Influence de la forme et de la longueur de la tête sur les emplacements des positions Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB, et MédianeH

Les distances entre le sommet de la tête et les positions de tirs Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB et MédianeH étaient corrélées avec la majorité des caractéristiques morphologiques (Tableau 6). Des régressions multiples ont été réalisées testant tous les segments et la longueur de la tête comme variables explicatives potentielles. Le nombre maximal de variables était fixé à trois. Les modèles optimaux indiquent que pour la position Œil-corneB la distance entre les bases inférieures des cornes (segment CD ; $p=0,01$) et la longueur de la tête ($p=0,03$) expliquent 86,7% de la variabilité entre les individus ($p<0,0001$). Pour la position Œil-corneH, la distance entre les bases supérieures des cornes (segment C'D' ; $p<0,001$) et la distance entre les milieux de la ligne reliant les yeux et celle reliant les bases inférieures des cornes (segment EG ; $p=0,04$) expliquaient 59,1 % ($p<0,001$) de cette variabilité. Pour les positions MédianeB et MédianeH, la distance entre la ligne entre les canthi des yeux et le sommet de la tête (segment EF ; $p<0,0001$) expliquaient 93,6 ($p<0,0001$)

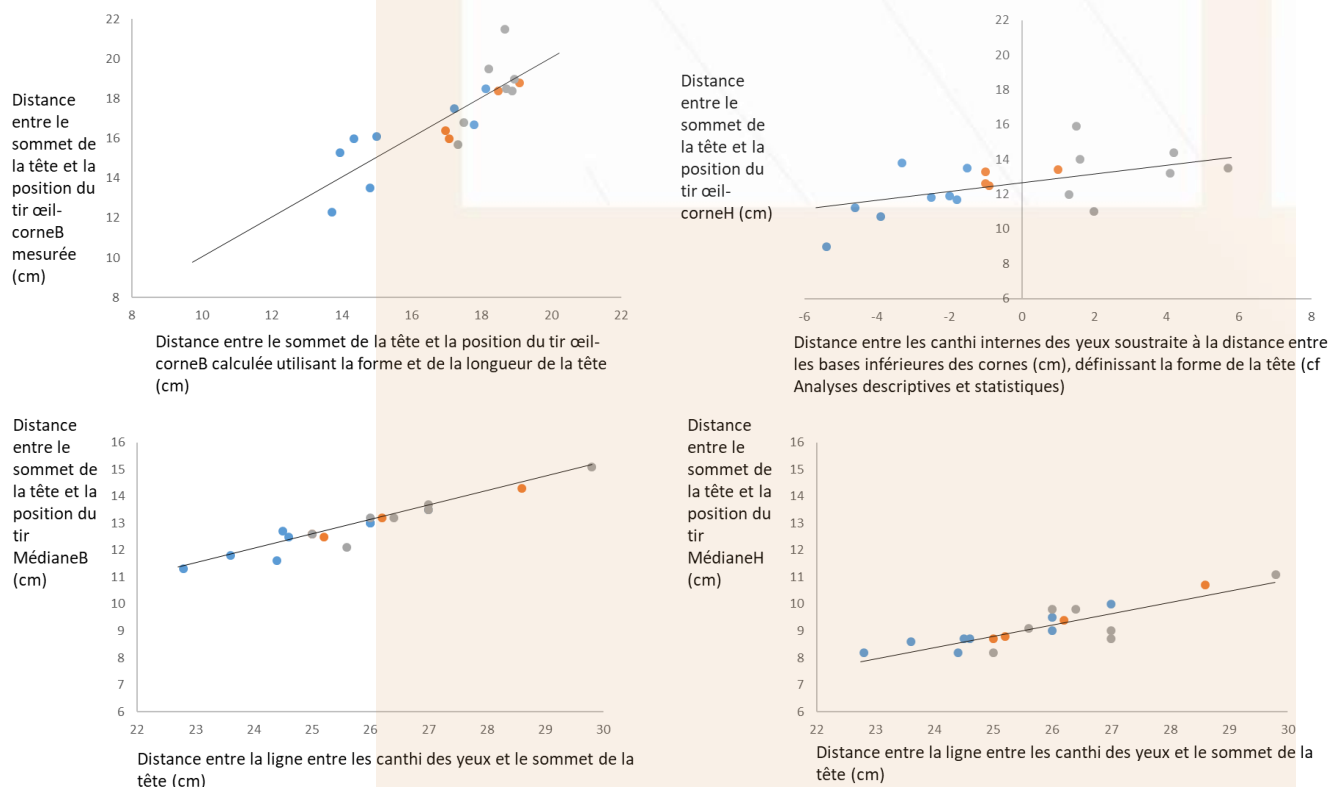
et 74,4 % ($p<0,0001$), respectivement, de la variabilité entre les individus (Fig. 9).

Comme anticipé (encadré 2), les positions de tir Œil-corneB et Œil-corneH dépendaient de la forme de la tête (distance entre les canthi internes des yeux soustraite de la distance entre les bases inférieures des cornes ; Tableau 6). Une régression multiple utilisant la forme et la longueur de la tête comme variables explicatives a indiqué que la distance entre le sommet de la tête et la position Œil-corneB dépendait de la forme de la tête ($p=0,004$) mais aussi de sa longueur ($p=0,001$; Fig. 9), expliquant 65,9% de la variabilité entre les individus (R^2 ajusté ; $p<0,0001$). Le même modèle a montré que la position du tir Œil-corneH dépendait uniquement de la forme de la tête ($p=0,02$; cf Tableau 6) et pas de sa longueur ($p=0,11$; Fig. 9). En utilisant les mêmes variables explicatives, la régression multiple a indiqué que la forme de la tête n'influait pas les positions MédianeB ($p=0,18$) et MédianeH ($p=0,32$). La longueur de la tête était en revanche significative dans le modèle (cf Tableau 6).

Tableau 6. Corrélations (valeurs de r de Pearson) entre la distance entre le sommet de la tête et les différentes positions de tir d'une part et les caractéristiques morphologiques de la tête, d'autre part (* : p<0,01 ; ** : p<0,0001).

Distance entre :	Distance entre le sommet de la tête et la position			
	Œil-corneB	Œil-corneH	MédianeB	MédianeH
Les canthi internes des yeux (AB)	0,65*	0,42	0,59*	0,65*
Les canthi externes des yeux (A'B')	0,73*	0,49*	0,62*	0,62*
Les bases inférieures des cornes (CD)	0,86**	0,59*	0,71*	0,59*
Les bases supérieures des cornes (C'D')	0,80**	0,68*	0,59*	0,56*
Les milieux de la ligne reliant les yeux et celle reliant les bases inférieures des cornes (EG)	-0,16	0,11	0,17	0,21
La ligne entre les canthi des yeux et le sommet de la tête (EF)	0,86**	0,68*	0,96**	0,86**
Le sommet de la tête et la limite rostrale du cerveau (F-lim.cerv)	0,87**	0,65*	0,82**	0,75*
caractéristiques :				
Longueur de la tête	0,70*	0,47*	0,72*	0,71*
Forme de la tête	0,64*	0,59*	0,43	0,37

Figure 9 : Exemples de corrélations et de régressions multiples pour les différentes positions de tir en tenant compte de la forme de la tête (Œil-corneB et Œil-corneH) et de la distance entre la ligne entre les canthi des yeux et le sommet de la tête (MédianeB et MédianeH).



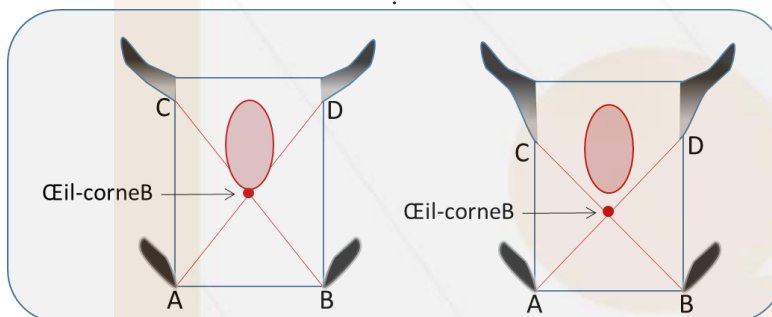
Dans la régression multiple utilisant la forme et la longueur de la tête comme variables explicatives, la position Œil-corneB était corrélée à la fois avec la longueur et la forme de la tête selon l'algorithme : distance « sommet de la tête - Œil-corneB » = $-2,2+0,4*longueur\ tête+0,3*forme\ de\ la\ tête$ ($r=0,81$; $p<0,0001$). La position Œil-corneH était corrélée avec la forme de la tête (cf Tableau 6), mais pas avec sa longueur. Les positions MédianeB et MédianeH dépendaient essentiellement de la distance entre la ligne entre les canthi des yeux et le sommet de la tête (cf Tableau 6). Les têtes en trapèze (symbole bleu), rectangle (symbole orange) et trapèze inversé (symbole gris) ont été définies selon la valeur obtenue après la soustraction de la distance entre les canthi internes des yeux, de la distance entre les bases inférieures des cornes ; entre -5,4 et -1,5 cm ; -1,0 et 1,0 cm ; et 1,3 et 5,7 cm, respectivement.

D'autres traits morphologiques peuvent augmenter la variabilité des positions de tir qui utilisent les diagonales. Par exemple, bien que non étudié dans cette étude, plus les bases inférieures des cornes se rapprochent des yeux (bases des cornes épaisses, par exemple), plus la position de tir

Œil-corneB sera basse (Fig. 10). La position Œil-corneH ne dépendra pas de l'épaisseur des cornes, à condition que la distance entre les yeux et le sommet de la tête ne soit pas influencée par l'épaisseur des cornes.

Figure 10 : Représentation de l'effet de l'épaisseur des cornes sur une tête de forme rectangulaire.

Le cerveau est représenté par un ovale rose. En utilisant la méthode Œil-corneB, plus les cornes sont épaisses, plus le tir sera bas



III.4. Comparaisons entre les trajectoires de tirs dans le cerveau pour les positions théoriques Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB, et MédianeH

Avec une tige de 10 cm, la position MédianeH aurait permis de pénétrer la zone cible chez 18 animaux (95% ; Tableau 7 et Figure 12). Chez un animal (animal No 2), seule l'extrême limite de la zone cible, proche des collicules, aurait été touchée, la tige passant caudalement au mésencéphale et s'arrêtant dorsalement au thalamus (Figure 1). Pour la position Œil-corneB, dans quasiment tous les cas (95%), la tige (8,5 ou 10 cm) serait passée sous le cerveau. Le tir aurait touché le bord de la zone cible dans un seul cas. Utilisant la position Œil-corneH, une tige de 10 cm aurait touché la zone cible chez 74% des animaux (Tableau 7 ; Fig. 12). Chez les animaux restants, la tige aurait atteint le lobe frontal du cortex. Pour la position MédianeB, une tige de 10 cm aurait été dans la cible chez 53% des animaux, et juste en dehors de la zone cible chez 21%. Chez les animaux restants, la tige aurait atteint le cortex sans atteindre la zone cible.

Pour une sortie de tige de 8,5 cm, les résultats des positions Œil-corneH, MédianeB et MédianeH sont moins bons que par rapport à une tige de 10 cm. Pour la position Œil-corneH, une tige de 8,5 cm aurait touché la zone cible chez seulement 7 animaux. Notamment, l'hypothalamus n'aurait pas été atteint chez la majorité d'entre eux. Pour la position MédianeB, par rapport à une sortie de tige de 10 cm, une tige de 8,5 cm aurait touché le thalamus et/ou l'hypothalamus chez seulement 4 animaux. Pour la position MédianeH, une tige de 8,5 cm aurait permis de toucher le mésencéphale chez seulement les 4 animaux avec les positions de tir les plus caudales (Tableau 7).

Les épaisseurs d'os et de sinus, ainsi que l'épaisseur totale (Tableau 8) étaient moindres ($p < 0,001$) au niveau de la position MédianeH, par rapport à celles observées pour les positions Œil-corneH et MédianeB. Les données n'ont pas été relevées pour la position Œil-corneB, car le passage de la tige était trop éloigné du cerveau.

Tableau 7. Sur les 19 cas étudiés, nombres de cas avec des lésions dans des structures de la zone cible, en fonction de la position et de la longueur de la tige.

position	Œil-corneB		Œil-corneH		MédianeB		MédianeH	
	8,5 cm	10 cm	8,5 cm	10 cm	8,5 cm	10 cm	8,5 cm	10 cm
Longueur tige								
Zone cible lésée (N°)	1	1	7	14	4	10	15	18
Zone cible lésée (%)	5	5	37	74	21	53	79	100
Structure de la zone cible lésée								
Thalamus	0	0	4	4	2	3	15	15
Hypothalamus	1	1	6	14	3	9	0	0
Mésencéphale	0	0	0	1	0	0	4	18

Tableau 8. Epaisseur (minimums, maximums, moyennes et écart-type de la moyenne ; cm) de cuir, d'os et de sinus en fonction de la position sur la tête. (Pour a et b, et pour x et y : des différentes lettres indiquent une différence de $p < 0,001$). NS = non-significatif.

position de tir	épaisseur	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type de la moyenne	résultat Student apparié
Œil-corneH	Cuir	0,6	2,0	0,98	0,08	NS
MédianeB		0,6	2,0	0,98	0,08	NS
MédianeH		0,6	1,7	0,96	0,06	NS
Œil-corneH	Os et sinus	1,2	3,7	2,31	0,16	a
MédianeB		1,3	3,1	2,27	0,11	a
MédianeH		1,0	3,0	1,71	0,14	b
Œil-corneH	total	2,2	4,5	3,29	0,17	x
MédianeB		2,3	4,0	3,25	0,13	x
MédianeH		0,8	4,2	2,58	0,18	y

Figure 11: Structures atteintes par les positions de tir Œil-corneB, Œil-corneH, MédianeB, et MédianeH pour des profondeurs de tir de 10 cm. Les nombres indiquent le nombre d'animaux concernés par ces lésions. Les gabarits indiquent l'échelle de 10 cm. La zone rose indique la zone ciblée.



IV. DISCUSSION

La zone Thalamus-Hypothalamus-Mésencéphale-Pons du cerveau contient les corps cellulaires du SRAA et leurs axones qui stimulent le cortex ; leur dysfonctionnement provoque l'inconscience (Parvizi et Damasio, 2003 ; Taran *et al.*, 2023 ; Terlouw *et al.*, 2021a). La présente étude a eu pour but d'identifier la position de tir qui a la plus grande probabilité de provoquer une lésion dans cette zone afin de garantir l'inconscience de l'animal.

Les corrélations entre la plupart des longueurs des segments dans notre étude reflètent que si la tête est plus grande, les segments sont plus longs (à l'exception du segment EG) et que l'emplacement du cerveau est proportionnel aux dimensions de la tête. Notamment, plus les yeux sont éloignés du sommet de la tête (segment EF plus grand), plus la limite rostrale du cerveau est éloignée du sommet de la tête également, pour l'ensemble des animaux. Cette distance est donc un repère utile pour estimer l'emplacement du cerveau.

Comme postulé, l'étude montre que les positions des tirs par rapport au sommet de la tête varient en fonction des repères extérieurs utilisés sur la tête de l'animal. La position Œil-corneB a été systématiquement la plus rostrale, la position MédianeH systématiquement la plus caudale et les positions Œil-corneH et MédianeB intermédiaires. La trajectoire du tir en position Œil-corneB passe sous le cerveau pour quasiment toutes les têtes. Dans ce cas, elle ne provoque pas de lésion dans la zone cible, et pas d'hémorragie dans le cerveau. Cette position n'est donc pas recommandable. Avec la position de tir Œil-corneB, Gilliam *et al.* (2016) rapportent cependant une atteinte du tronc cérébral pour 7 sur 14 bovins adultes malgré le fait que, comme dans notre étude, leurs tirs Œil-corneB aient été placés à la limite rostrale du cerveau (selon leurs images obtenues par tomodensitométrie). Dans leur étude, la zone cible a possiblement été atteinte chez certains animaux suite à une orientation non-perpendiculaire du pistolet sur la tête de l'animal. L'orientation était potentiellement influencée par des formes de têtes différentes, comme leur étude n'a pas utilisé les mêmes races que la présente étude (Gilliam *et al.*, 2016). Dans notre étude, la position de tir Œil-corneH a donné de meilleurs résultats que la position Œil-corneB mais est néanmoins globalement trop rostrale pour atteindre de façon fiable les zones cibles. Ces résultats confirment les observations de Gilliam *et al.* (2012 ; 2016) qui rapportent une position de tir trop rostrale avec cette méthode. Il faut donc positionner le pistolet plus caudalement (plus proche du sommet de la tête ; Terlouw *et al.*, 2021b).

La position MédianeB est en moyenne légèrement plus rostrale que la position Œil-corneH et a de moins bonnes performances en termes de lésion de la zone cible. En revanche, et en accord avec d'autres rapports scientifiques (Grandin, 2009 ; Gilliam *et al.*, 2016), la position MédianeH a une bonne capacité pour léser la zone cible, à condition que la tige sorte sur une distance d'au moins 10 cm. Ceci implique non seulement que le pistolet soit muni d'une tige suffisamment longue, mais également que la puissance de l'amorce ou la pression (en cas de pistolet pneumatique) permette sa sortie sur cette longueur (Gibson *et al.*, 2015 ; Kamenik *et al.*, 2019). La position MédianeH aurait permis de faire pénétrer la tige dans la zone cible chez 95% des animaux de l'étude. La position MédianeH était également la seule des quatre positions à atteindre le

mésencéphale chez la majorité des animaux. De plus, à la position MédianeH, les os et sinus avaient une épaisseur moindre par rapport aux autres positions étudiées, permettant une meilleure pénétration de la tige dans le cerveau.

Cependant, avec la position MédianeH, la tige aurait été à la limite de la zone cible chez un animal (No 2 ; représentant 5% des têtes étudiées). Chez cet animal, la tige aurait essentiellement atteint les collicules sans pénétrer dans la zone cible. Ce cas nécessite une attention particulière, car des tirs encore plus caudaux (plus proche du sommet de la tête) pourraient atteindre les structures postérieures du cerveau (cervelet, voire pont caudal) sans occasionner de lésion au niveau de la zone cible. En l'absence d'hémorragies étendues, des tirs trop caudaux risquent de ne pas provoquer l'inconscience (Terlouw *et al.*, 2021b). Une localisation de tir située 1 cm plus rostral (vers le museau) par rapport à la position de tir MédianeH permettrait de limiter ce risque tout en garantissant l'atteinte des zones cibles.

Un autre inconvénient de la position MédianeH est la difficulté d'utiliser, visuellement, les canthi externes des yeux comme repères, comme constaté lors de la fixation des ficelles sur les têtes des bovins dans la présente étude. Les canthi externes ont une position très latérale, sous le bourrelet orbitaire, rendant difficile la visualisation de la ligne reliant ces repères par l'opérateur en charge de l'étourdissement. Pour surmonter la difficulté liée à l'utilisation des canthi externes, il est possible d'utiliser la position MédianeB et de placer le pistolet de manière plus caudale afin de s'approcher de la position MédianeH. La position MédianeH se trouvait en moyenne à 3,7 cm au-dessus de la position MédianeB. Comme expliqué ci-dessus, une position de 1 cm en dessous de la position MédianeH peut être préférable pour éviter des tirs trop caudaux. Il s'agirait donc de placer le pistolet environ 2,7 cm au-dessus de la position MédianeB, qui elle repose sur l'identification des canthi internes, plus faciles à repérer. De la même manière, une autre possibilité serait de placer le pistolet environ 2,4 cm au-dessus de la position Œil-corneH, repère actuellement très rependu sur le terrain.

La distance entre le sommet de la tête et les positions de tirs Œil-corneB et Œil-corneH était relativement variable, comme indiqué par leurs coefficients de variation et leurs écarts interquartiles. Spécifiquement, pour une longueur de tête donnée, les caractéristiques du crâne, notamment le rapport des largeurs de la tête (au niveau des yeux et au sommet de la tête), influencent les positions Œil-corneB et Œil-corneH. Cette variabilité est expliquée par le fait que les diagonales suivent les lois trigonométriques (cf encadré 2). Elle se traduit par une plus grande variabilité des trajectoires de la tige dans le cerveau pour ces tirs. À la différence de la position Œil-corneB, la position Œil-corneH permet d'atteindre la zone cible chez une partie des animaux mais l'utilisation des diagonales entre les yeux et les cornes pour identifier la position exacte du pistolet entraîne une imprécision à cause de la variabilité des formes des têtes. En effet, plus l'écartement entre les bases des cornes est grand par rapport à l'écartement des yeux (forme de trapèze inversé), plus la position de tir s'éloigne indûment du sommet de la tête. Les positions MédianeB et MédianeH sont en revanche moins variables que les positions Œil-corneB et Œil-corneH, car elles dépendent

principalement de la distance qui sépare la ligne des yeux du sommet de la tête (segment EF).

Les positions MédianeB et MédianeH, mais aussi Œil-corneB et Œil-corneH, étaient corrélées avec la longueur de la tête. Ainsi, pour des têtes plus longues, la distance entre la position du pistolet et le sommet de la tête sera plus grande. Ceci est cohérent avec le fait que pour des têtes plus longues, la limite rostrale du cerveau était plus éloignée par rapport au sommet de la tête, pour l'ensemble des animaux de cette étude.

Enfin, il est à noter que lorsque la zone cible n'est pas atteinte, des hémorragies cérébrales causées par le tir peuvent aussi induire une perte de conscience immédiate et durable. Pour cela, le tir doit être dans le cerveau (éviter la position Œil-corneB). Par contre, les liens entre la trajectoire de la tige dans le cerveau et sa capacité de provoquer des hémorragies ne sont actuellement pas connus.

Encadré 3. Différentes propositions pour maximiser la probabilité de léser la zone cible en conditions de terrain :

- 1 : Placer le pistolet 1 cm en dessous du milieu du segment séparant la ligne des canthi externes du sommet de la tête : 1 cm en dessous de la position MédianeH,
- 2 : Placer le pistolet 2 à 3 cm plus haut que le milieu du segment séparant la ligne des canthi internes du sommet de la tête : 2 à 3 cm en au-dessus de la position MédianeB
- 3 : Placer le pistolet 2 à 3 cm plus haut que l'intersection des lignes reliant les canthi internes des yeux à la base supérieure de la corne opposée : 2 à 3 cm en au-dessus de la position Œil-corneH.

V. PERSPECTIVES

Des échantillons plus importants seront nécessaires pour évaluer en particulier les effets de la race, en incluant des races laitières et mixtes, du sexe, de l'âge et de la présence ou non de cornes, en tenant compte des raisons de l'absence de cornes : génétique, ébourgeonnage ou écornage (ablation des cornes à un âge plus avancé). La

forme de la surface du crâne (variabilités dans l'épaisseur, formant des bosses) peut jouer un rôle important dans l'orientation des tirs à l'intérieur du cerveau. La variabilité dans la forme de cette surface et son impact sur l'efficacité du tir restent à être évalués.

Remerciements

Nous remercions les responsables et les opérateurs des abattoirs qui nous ont accueillis et qui ont rendu cette étude possible. Nous remercions le Département PHASE de l'INRAE pour le financement de l'étude. Nous remercions également M. Cisco Bosma, étudiant en Mathématiques/Physiques en Classe Préparatoire aux Grandes Ecoles du Lycée La Fayette/Université d'Auvergne, pour la démonstration de l'Encadré 2. Nous remercions enfin les deux relecteurs anonymes pour leurs commentaires pertinents. Cette étude a eu lieu dans le cadre l'obtention du Certificat d'Etudes Approfondies Vétérinaires en Santé Publique Vétérinaire de l'ENSV (Marcy l'Etoile) par Frédérique Demota.

Références bibliographiques :

- Anses 2021, Surveillance des bonnes pratiques d'étourdissement des bovins en abattoir Protocoles d'échantillonnage Avis révisé de l'Anses, Rapport révisé, d'expertise collective <https://www.anses.fr/fr/system/files/SABA2018SA0256Ra.pdf>
- Baier, F., & Willson, D. (2020). Basics of captive bolt stunning of cattle and other animals. In: Grandin T. Cockram M. (editors), "The slaughter of farmed animals: practical ways of enhancing animal welfare" (pp. 145-158): CABI Wallingford UK. ISBN: 978-1-78924-057-3
- Brown, R. E., Basheer, R., McKenna, J. T., Strecker, R. E., & McCarley, R. W. (2012). Control of sleep and wakefulness. *Physiol Rev*, 92(3), 1087-1187. doi: 10.1152/physrev.00032.2011
- Daly C., Gregory N., Wotton S. (1987). Captive bolt stunning of cattle: effects on brain function and role of bolt velocity. *British Veterinary Journal* 143, 574-80.
- Damasio A.R. (2010). *Self comes to mind: constructing the conscious brain* (1st Ed.). New York: Pantheon Books, 2010.
- EFSA (2004). Welfare aspects of the main systems of stunning and killing the main commercial species of animals; Opinion of the scientific panel on Animal Health of Welfare (AHAW) on a request from the Commission related to welfare aspects of the main systems of stunning and killing the main commercial species of animals (n° EFSA-Q- 2003-093)
- EFSA (2020). Health EPoA, Welfare, Nielsen SS, et al.: Welfare of cattle at slaughter. *EFSA journal*. 2020, 18:e06275.
- Finnie J.W. (1993) Brain damage caused by a captive-bolt pistol. *Journal of comparative Pathology*, vol 109; issue 3; 253-258.
- Finnie J.W. (2001) Animal models of traumatic brain injury: a review. *Aust. Vet. J.* Vol 79; n°9; 629-633.
- Forkman J. (2009) Estimator and tests for common coefficients of variation in normal distributions. *Communications in Statistics. Theory and Methods* 38; 233-251.

- Fuller, P., Sherman, D., Pedersen, N. P., Saper, C. B., & Lu, J. (2011). Reassessment of the structural basis of the ascending arousal system. *Journal of Comparative Neurology*, 519(5), 933-956.
- Gibson T.J., Mason C.W., Spence J.Y., Barker H. & Gregory N.G. (2015). Factors affecting penetrating captive bolt gun performance. *Journal of Applied Animal Welfare Science* 18, 222-38.
- Gilliam J.N., Shearer J.K., Bahr R.J., Crochik S., Woods J., Hill J., Reynolds J. Taylor J.D. (2016). Evaluation of brainstem disruption following penetrating captive bolt shot in isolated cattle head: comparison of traditional and alternative shot-placement landmarks. *Animal welfare*, 25, 347-353.
- Gilliam J.N., Shearer J.K., Woods J., Hill J., Reynolds J., Taylor J.D., Bahr R.J., Crochik S., Snider T.A. (2012). Captive-bolt euthanasia of cattle: determination of optimal-shot placement and evaluation of the Cash Special Euthanizer Kit for euthanasia of cattle. *Animal welfare* 21 (S2), 99-102.
- Grandin, T. (2009). Recommended captive bolt stunning techniques for cattle. Fort Collins. <http://www.grandin.com/humane/cap.bolt.tips.html>
- Grandin, T. (2021). Recommended animal handling guidelines and audit guide. American Meat Institute Foundation, Washington, DC.
- Gregory N.G., Grandin T. (2007). *Animal welfare and meat science*. CABI Pub. Wallingford, UK.
- Grist A., Lines J.A., Bock R., Knowles T.G., Wotton S.B. (2019) An examination of the performance of blank cartridges used in captive bolt devices for the pre-slaughter stunning and euthanasia of animals. *Animals* 9, 552.
- Grist A., Bock R., Knowles T.G., Wotton S.B. (2020) Further Examination of the Performance of Blank Cartridges Used in Captive Bolt Devices for the Pre-Slaughter Stunning of Animals. *Animals* 10, 2146.
- HSA, Humane Slaughter Association (1999). Humane killing of livestock using firearms. (Guidance notes n. 3, p. 11). Wheathampstead: Humane Slaughter Association, The Old School, Brewhouse Mill.
- Kamenik J., Paral V., Pysko M., Voslarova E. (2019). Cattle stunning with a penetrative captive bolt device: a Review. *Japanese Society of animal Science*; 1-10.
- Le Neindre, P, Bernard, E, Boissy, A, Boivin, X, Calandreau, L, Delon, N, Deputte, B, Desmoulin-Canselier, S, Dunier, M, Faivre, N, Giurfa, M, Guichet, J-L, Lansade, L, Larrère, R, Mormède, P, Prunet, P, Schaal, B, Servièrre, J, Terlouw, C, 2017. Animal consciousness. EFSA supporting publication 2017: 14(4):EN-1196. 165 pp. doi: 10.2903/sp.efsa.2017.EN-1196
- MedCalc Version 22.009 Software Ltd. Comparison of Coefficients of Variation calculator. https://www.medcalc.org/calc/comparison_of_coefficientsofvariation.php (Version 22.009; accessed July 12, 2023).
- Oliveira S.E., Dalla Costa F.A., Gibson T.J., Dalla costa O.A., Coldebella A., Gregory N.G. (2018). Evaluation of brain damage resulting from penetrating and non-penetrating stunning in Nelore Cattle using pneumatically powered captive bolt guns. *Meat science* 145, 347-351.
- Oliveira S.E., Gregory N.G. Costa F.A., Gibson T.J., da Costa M.J. (2017) Efficiency of low versus high airline pressure in stunning cattle with a pneumatically powered penetrating captive bolt gun. *Meat Science* 130, 64-68.
- Parvizi J., Damasio A.R. (2003) Neuroanatomical correlates of brainstem coma. *Brain*, 126, 1524-1536.
- Saper, C. B., Scammell, T. E., & Lu, J. (2005). Hypothalamic regulation of sleep and circadian rhythms. *Nature*, 437(7063), 1257-1263.
- Saper, C. B., & Fuller, P. M. (2017). Wake–sleep circuitry: an overview. *Current opinion in neurobiology*, 44, 186-192.
- Taran S., Gros P., Gofton T., Boyd G., Briard J.N., Chassé M., Singh J.M. (2023) The reticular activating system: a narrative review of discovery, evolving understanding, and relevance to current formulations of brain death. *Canadian Journal of Anesthesia/Journal canadien d'anesthésie*, 1-8.
- Terlouw, C., Bourguet, C., Deiss, V. (2015). La conscience, l'inconscience et la mort dans le contexte de l'abattage. Partie I. Mécanismes neurobiologiques impliqués lors de l'étourdissement et de la mise à mort. *Viandes et Produits Carnés*, 31 (2-2), 1-20.
- Terlouw, C. Ducreux, B. Bourguet, C. (2021a) Abattage avec et sans étourdissement : conscience et induction de l'inconscience. Particularités neurobiologiques des différentes techniques d'abattage. (partie 1). *Viandes et Produits Carnés VPC* 3725 ;1-11.
- Terlouw, C. Ducreux, B. Bourguet, C. (2021b). Abattage avec et sans étourdissement : évaluation pratique de l'inconscience partie 2 : Spécificités des indicateurs de conscience et d'inconscience selon les méthodes d'abattage. *Viandes et Produits Carnés VPC* 3725 ;1-10.
- Weisberg, L. A. (1990). How to identify and manage brain hemorrhage. *Postgraduate Medicine*, 88(3), 169-175.