



Impact de l'utilisation d'un exosquelette "dos" sur les conditions de travail lors de la vaccination de porcelets

Caroline DEPOUDENT (1), Marie RANNOU (2), Isabelle CRENN (2), Claudie GUYOMARC'H (3), Alexandre GIRAULT (4)

(1) *Chambres d'agriculture de Bretagne, 24 route de Cuzon, 29322 Quimper Cedex, France*

(2) *MSA Armorique, 3 rue Hervé de Guébriant, 29412 Landerneau Cedex, France*

(3) *Chambres d'agriculture de Bretagne, Crécom, 22480 Saint Nicolas du Pelem, France*

(4) *AGB Solutions, 33 allée Galilée, 74700 Sallanches, France*

caroline.depouident@bretagne.chambaqri.fr

Impact de l'utilisation d'un exosquelette « dos » sur les conditions de travail lors de la vaccination de porcelets

Afin d'élargir le panel de solutions proposées aux éleveurs de porcs pour préserver leur dos, nous avons évalué l'impact de l'utilisation d'un exosquelette "dos" sur les conditions de travail lors des vaccinations de porcelets. L'étude repose sur la comparaison de trois modalités : sans exosquelette, avec l'exosquelette A, et avec l'exosquelette B. Dans un premier temps, les exosquelettes ont été testés dans des conditions contrôlées (ramassage et déplacements de poids) sur un échantillon de quatre personnes. Dans un second temps, des tests ont été réalisés lors de la vaccination des porcelets, sur un échantillon de huit personnes. Durant ces deux phases, nous avons mesuré la fréquence cardiaque, les postures et angles articulaires, le ressenti des utilisateurs et les efforts musculaires, au niveau des muscles suivants : multifide, longissimus, droit antérieur, biceps fémoral, trapèze supérieur et deltoïde antérieur. Dans des conditions contrôlées, l'utilisation des deux dispositifs diminue significativement la sollicitation des muscles extenseurs du rachis (dos), avec une diminution comprise entre -4% et -19% en fonction du modèle utilisé, et n'entraîne pas de variation du coût cardiaque à l'effort. Lors des vaccinations, l'utilisation des deux dispositifs augmente de manière significative la sollicitation des muscles extenseurs du rachis (dos - longissimus) : +16% à +37% selon le modèle utilisé. Elle augmente également significativement la sollicitation des muscles extenseurs et fléchisseurs de la jambe : +47% à +75% selon le modèle utilisé. Dans les deux situations, le temps de travail est augmenté, mais les postures sont peu impactées. En conclusion, les exosquelettes testés apportent un bénéfice léger en conditions contrôlées. En revanche, ils sont davantage source de contraintes que de bénéfices lors de la vaccination des porcelets, sans doute en raison de la diversité des plans dans lesquels se déroule la tâche.

Impact of using two passive trunk-supporting exoskeletons on working conditions during piglet vaccination

To provide more solutions to pig farmers to protect their backs, we assessed the impact of using a passive trunk-supporting exoskeleton on working conditions during piglet vaccinations. The study was based on comparing three conditions: no exoskeleton, exoskeleton A and exoskeleton B. First, the exoskeletons were tested under controlled conditions (picking up and moving weights) with a sample of four people (two men and two women). Second, tests were performed under real working conditions, during piglet vaccination, with a sample of eight people (six men and two women). During these two phases, we measured heart rate, postures and joint angles (using motion capture), user feedback and muscular effort in the following muscles: multifidi, longissimus, rectus femoris, biceps femoris, upper trapezius and anterior deltoid. Under controlled conditions, the use of either device significantly reduced the load on the erector spinae muscles (-4 % to -19 % according to the exoskeleton) but did not change the cardiac cost during exercise. During vaccination, the use of either device significantly increased the load on the erector spinae muscles (+16 % to +37 % according to the exoskeleton) and the extensor and flexor muscles of the leg (+47 % to +75 % according to the exoskeleton). Under both conditions, working time increased, but postures changed little. In conclusion, the exoskeletons tested provided a slight benefit under controlled conditions, but they were more of a source of constraints than benefits when vaccinating piglets, likely because of the variety of planes in which the task takes place.

INTRODUCTION

En élevage porcin, les problèmes de dos sont une problématique majeure pour les éleveurs. Dans une enquête réalisée en 2013 par la MSA Portes de Bretagne auprès d'éleveurs de porcs d'Ille-et-Vilaine et du Morbihan, 93 des 135 éleveurs interrogés disaient souffrir ou avoir souffert de problèmes de dos (MSA, 2015). Parmi ces 93, 71 estimaient que ces problèmes de dos étaient liés au travail. Les tâches associées sont, d'une part, le port ponctuel de charges lourdes (sacs d'aliment, cadavres), d'autre part le port de nombreuses petites charges à un rythme soutenu. C'est notamment le cas lors des soins aux porcelets à la naissance ou lors des vaccinations de porcelets autour du sevrage. Ainsi, pour un élevage de 252 truies conduit en sept bandes et sevrant à 28 jours 13 porcelets par truie et par portée, une séance de vaccination demande de manipuler 468 porcelets d'environ 7,5 kg, soit un poids cumulé d'environ 3,5 tonnes.

Les problèmes de dos ont un impact sur la vie professionnelle et privée des personnes concernées. En effet, 73 % des maladies professionnelles du dos (Tableaux A57 et A57bis du régime agricole : affections chroniques du rachis lombaire provoquées par des vibrations de basses et moyennes fréquences transmises au corps entier et port de charges) entraînent des séquelles (MSA, 2023). Ces problèmes ont également un coût. En effet, un Trouble Musculo-Squelettique (TMS) du dos coûte en moyenne 56 290 € au régime agricole, contre 26 300 € pour la moyenne des TMS (données 2000-22 pour les salariés du régime agricole). Au total, cela représentait 8 millions d'euros en 2021.

Pour réduire les efforts au niveau du dos, différentes solutions ont été développées par des éleveurs (ponts, fosses de vaccination) ou des fournisseurs de matériel (caisses de vaccination réglables en hauteur). Cependant, leur usage reste limité, soit parce que les utilisateurs craignent de perdre du temps, soit parce leur vétérinaire préconise une contention individuelle des porcelets lors de la vaccination.

Les exosquelettes connaissent un fort développement en France depuis 2015, en se positionnant comme une aide au port de charge. Ils sont utilisés dans l'industrie. En élevage, leur utilisation a été testée au moment de la traite de vaches laitières (Collet, 2022). Un exosquelette est « un système mécanique ou textile revêtu par une personne et visant à lui apporter une assistance physique dans l'exécution d'une tâche, par une compensation de ses efforts et/ou une augmentation de ses capacités motrices (augmentation de la force, assistance des mouvements, etc.) » (Theurel *et al.*, 2018). Les exosquelettes sont des Nouvelles Technologies d'Assistance Physique (NTAP) impliquant une contention. L'INRS (2023) différencie deux types d'exosquelettes : les Dispositifs d'Assistance Physique (DAP), qui sont mécaniques, et les Robots d'Assistance Physique (RAP), qui sont automatisés.

Concernant les DAP, l'INRS fait la distinction entre les exosquelettes « actifs » ou motorisés (l'assistance se fait principalement par des moteurs ou systèmes alimentés) et les exosquelettes « passifs » ou non motorisés (l'assistance se fait par des systèmes d'accumulation/restitution d'énergie, comme la déformation d'un élastique par exemple). L'étude s'intéresse ici à deux modèles passifs.

Cette étude vise à évaluer l'impact de deux modèles d'exosquelettes « dos » sur les conditions de travail lors de séances de vaccination de porcelets. Les aspects suivants des conditions de travail seront évalués : temps de travail, organisation du travail, confort de travail ressenti par l'utilisateur et acceptabilité, intensité de l'effort global (investiguée par l'intermédiaire de l'activité cardiaque), intensité des efforts musculaires au niveau du dos, des membres inférieurs et des membres supérieurs et stratégies de mouvement.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Choix des modèles

Les modèles étudiés ont été choisis parmi les technologies disponibles sur le marché français au second semestre 2021. Commercialisés dans les secteurs de la santé et du bâtiment, ces modèles n'étaient pas développés spécifiquement pour l'élevage. Les modèles choisis devaient être utilisables en prévention, ce qui excluait les dispositifs médicaux, plutôt destinés à un maintien en emploi. Les autres critères de choix étaient la possibilité d'activer et désactiver l'assistance sans enlever l'exosquelette, la possibilité de les laver et désinfecter, et l'assistance pour la position « torse fléchi à plus de 45 degrés ».

Les deux modèles retenus sont le Liftsuit (A) d'Auxivo, et le Hapo (B) d'Ergosanté (Tableau 1). Le A a été acheté en taille unique (v1) et en taille 1 (v2), la taille 2 (v2) s'étant révélée après essai trop grande même pour des personnes de 1,80 m et plus. Le B a été acheté en tailles S et M. Les sept premières mesures sur le modèle B ont été réalisées avec la v1, qui présente des passants sous les bras, et les suivantes avec la v2 (sans passants sous les bras), suite à une casse sur les premiers modèles achetés.

Après la livraison, les deux modèles ont été présentés à l'équipe de la station expérimentale de Crécom. Après avoir appris à enfiler, activer, désactiver et enlever les deux modèles, les personnes de l'équipe les ont utilisés ponctuellement pendant quelques semaines, pour des tâches impliquant du port de charge (ex : soins aux porcelets) ou des efforts des muscles du dos. Aucun problème de solidité du matériel ou de sécurité n'ayant été relevé durant cette période, l'étude s'est poursuivie.

Tableau 1 - Comparatif des deux exosquelettes utilisés dans l'étude

Modèle	A	B
Points d'ancrage	Epaules Taille Haut des cuisses	Epaules Hanches Au-dessus des genoux
Dispositif de compensation des efforts	Elastiques croisés dans le dos	Fibres carbone allant du côté des cuisses à l'avant des épaules
Poids, g	900	1 100

1.2. Evaluation en conditions contrôlées

Une première évaluation de l’impact de l’exosquelette sur les conditions de travail a été réalisée en conditions contrôlées, hors tâches en élevage, auprès d’un échantillon de quatre personnes.

1.2.1. Panel impliqué

Le panel était composé de quatre techniciens de la station expérimentale de Crécom, deux hommes et deux femmes. Les âges étaient compris entre 23 et 52 ans, les tailles entre 1,62 m et 1,80 m. Une personne pressentie pour participer à l’essai a été exclue de l’échantillon car aucun des exosquelettes testés n’était réglable à sa morphologie (personne de petit gabarit). Un questionnaire de santé confidentiel et un entretien avec une conseillère en prévention des risques professionnels ont été réalisés afin de vérifier, en lien avec le médecin du travail suivant l’étude, l’absence de contre-indication médicale au port des exosquelettes étudiés. En effet, une chirurgie récente du dos, de l’épaule ou du genou constitue une contre-indication stricte ; des antécédents cardiaques, des problématiques de peau telles que l’eczéma, une grossesse ou le fait d’être en croissance (mineurs) amènent à une plus grande vigilance.

1.2.2. Description du contenu du test

Le principal objectif de cette phase d’étude préalable était d’investiguer les effets associés à l’utilisation des différents modèles d’exosquelettes sélectionnés dans des conditions stables et reproductibles, sur des phases d’efforts proches de ceux nécessaires à la réalisation des tâches de travail réelles en exploitation agricole. Pour ce faire, les participants ont été invités à réaliser deux types d’exercices avec et sans dispositifs afin d’observer les effets de ces derniers, dans différentes conditions, sur les différents paramètres mesurés. Ainsi, les exercices réalisés comportaient une phase statique de ramassage répété de charges de différentes masses (3 kg, 6 kg, 8 kg, 12 kg), avec 10 opérations par masses comprenant : flexion pour ramassage de la masse, extension pour retour à la position érigée, masse tenue avec les deux mains au niveau du nombril, flexion pour déposer de la masse au sol, retour à la position érigée "à vide". Ils comportaient également une phase dynamique comprenant le déplacement de charges de différentes masses (3 kg, 6 kg, 8 kg, 12 kg) sur de faibles distances (10 m). Les participants réalisaient un parcours de 2x10 m par masse comprenant : flexion pour prélèvement de la masse au sol, maintien de la masse tenue avec les deux mains au niveau du nombril, déplacement de la masse sur 10 m, déposer de la masse sur un support à hauteur des hanches, déplacement "à vide" pour revenir à la position initiale, déplacement "à vide" sur 10 m vers la masse, récupération de la masse à hauteur des hanches, déplacement de la masse sur 10 m, tenue avec les deux mains au niveau du nombril, flexion pour déposer de la masse au point de départ, et extension pour retour à la position érigée au point de départ. Les trois

modalités (sans exosquelette, exosquelette A, exosquelette B), étaient réalisées dans un ordre aléatoire.

1.2.3. Mesures réalisées

L’entretien d’inclusion des participants s’appuyait sur un questionnaire visant à évaluer le niveau de douleur pour 21 parties du corps. Pour cela, nous avons utilisé une Echelle Visuelle Analogique (EVA). Cette réglette dispose d’un curseur mobile, et de deux côtés différents. Du côté « enquêté », des couleurs matérialisent le côté « sans douleur » et le côté « douleur maximale ». De l’autre, figurent des graduations de 0 à 100. Les correspondances entre les scores et les niveaux de douleur figurent dans le Tableau 2 (Haute Autorité de Santé, 2022). Pour chaque partie du corps, l’enquêté devait positionner le curseur en fonction de l’intensité de la douleur ressentie (le curseur étant initialement en position médiane). L’enquêteur relevait alors le score figurant de l’autre côté.

Tableau 2 - Correspondances entre les scores de la réglette EVA et le niveau de douleur

Score EVA	Niveau de douleur
0	Pas de douleur
1-39	Faible
40-59	Modérée
60-79	Forte
80-100	Insupportable

Source : Haute Autorité de Santé, 2022

Les personnes de l’échantillon ont été équipées d’un cardiofréquencemètre, de 17 capteurs inertiels (visant à analyser les stratégies posturales), et d’électrodes permettant l’enregistrement des signaux neuromusculaires (électromyographie : EMG). Ces capteurs étaient placés sur six muscles (Tableau 3 et Figure 1). La fréquence cardiaque de repos était mesurée avant le début de la séquence de travail après un repos de 10 minutes en position assise dans un endroit calme et silencieux. La fréquence d’acquisition des données d’EMG et de posture était de 1000 Hz. Les séquences de test étaient intégralement filmées afin de pouvoir, *a posteriori*, corréler les résultats aux déterminants du travail observé.

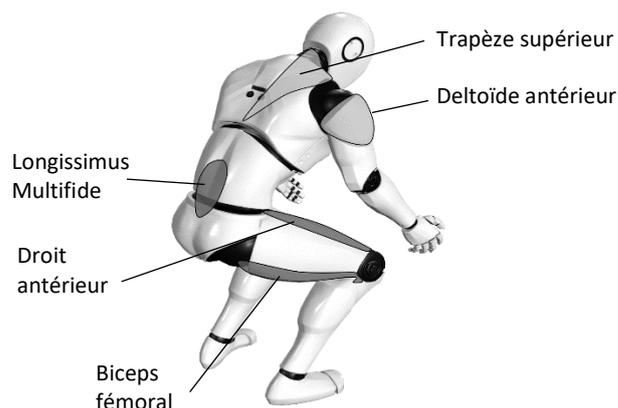


Figure 1 - Emplacement des muscles dont l’activité est étudiée

Tableau 3 – Emplacement des capteurs EMG et valorisation des données associées

Emplacement des capteurs EMG	Posture / mouvement étudié	Impact étudié
Multifide Longissimus	Stabilité statique et dynamique de la colonne vertébrale / mouvements d’extension du tronc	Assistance physique du dispositif sur les muscles posturaux et érecteurs du rachis
Droit antérieur Biceps fémoral	Extension de la jambe / flexion de la hanche Flexion de la jambe / extension de la hanche	Absence de report de charge sur les membres inférieurs / sollicitation accrue
Trapèze supérieur Deltoïde antérieur	Mouvements d’élévation, d’adduction et de stabilisation de la scapula Mouvements d’abduction et de stabilisation de l’épaule	Absence d’impact du dispositif sur la stabilité de la scapula et de l’épaule (sangles), changement de stratégies opératoires (membres supérieurs)

Lors de la remise de l'exosquelette, et à la suite de la réalisation des mesures, les enquêtés devaient remplir un questionnaire d'acceptabilité de l'exosquelette, en cochant des réponses sur cinq niveaux (de très insatisfait à très satisfait).

1.3. Evaluation en situation de travail (vaccination de porcelets)

1.3.1. Panel impliqué

Suite à cette première évaluation, des mesures en situation de travail ont été réalisées dans trois élevages de porcs finistériens, auprès de huit exploitants agricoles et salariés d'élevage, six hommes et deux femmes. Tous avaient plus de deux ans d'expérience, et l'ancienneté moyenne était de 20 ans. Les âges étaient compris entre 23 et 56 ans, avec une moyenne à 46 ans. Les tailles étaient comprises entre 1,63 m et 1,84 m. Les poids allaient de 68 à 118 kg.

Les exploitations participant à l'étude ont été choisies sur la base de l'intérêt du chef d'exploitation pour ce sujet. Un questionnaire de santé confidentiel et un entretien avec une conseillère en prévention des risques professionnels ont été réalisés afin de vérifier, en lien avec le médecin du travail suivant l'étude, l'absence de contre-indication médicale au port des exosquelettes étudiés.

1.3.2. Remise des exosquelettes

Dans les trois exploitations, une séquence de remise des exosquelettes a été organisée afin d'expliquer l'étude, de former les participants à l'utilisation des exosquelettes (habillage / déshabillage, activation / désactivation), de déterminer la taille adaptée à chacun pour chaque modèle, et de réaliser le questionnaire médical confidentiel. La première séquence de mesures était réalisée plusieurs jours plus tard, afin que les participants puissent s'habituer à porter les exosquelettes dans l'intervalle dans leur milieu de travail habituel.

1.3.3. Tâche étudiée

La tâche étudiée était la tâche de port des porcelets lors de leur vaccination en début de post-sevrage. Les personnes impliquées dans l'échantillon présentaient une diversité de pratiques. Dans une exploitation (deux personnes), la vaccination était réalisée dans le couloir par une personne qui attrapait et vaccinait les porcelets. Dans les deux autres exploitations (six personnes), la vaccination était réalisée dans les cases de post-sevrage. Les porcelets étaient bloqués par un panneau dans un angle de la case ; deux personnes les attrapaient et les présentaient à une troisième personne qui les vaccinait. Les séquences de vaccination observées duraient environ une heure. Durant ces séquences, la personne équipée de capteurs portait, dans un ordre aléatoire, les trois modalités d'équipement (sans exosquelette, modèle A, modèle B) pendant 15 à 20 minutes chacune. La consigne était, pour la personne, de travailler comme à son habitude en termes de rythme, de posture, de modes opératoires, etc.

1.3.4. Mesures réalisées

Les mesures réalisées étaient les mêmes que pour l'évaluation en situation contrôlée (Tableau 1). La fréquence cardiaque de repos était mesurée avant le début de la séquence de travail après un repos de 10 minutes en position assise dans un endroit calme et silencieux.

1.4. Analyses statistiques

Les données de fréquence cardiaque ont été exprimées en % du coût cardiaque relatif (% CCR). Le CCR est une mesure qui tient

compte de l'âge et permet d'apprécier l'adaptabilité individuelle du cœur au travail ou à l'activité physique. Il correspond à l'augmentation de la fréquence cardiaque (FC) entre le repos et sa valeur moyenne pendant la tâche. En d'autres termes, le CCR évalue la capacité du cœur à répondre aux besoins de l'organisme pendant une activité, en prenant en considération l'âge de la personne. Cette mesure est utile dans la gestion du risque lié à l'activité physique, en particulier au travail, pour s'assurer que les individus sont en mesure de supporter la charge de travail sans compromettre leur santé cardiaque.

Les données EMG (moyenne quadratique, amplitude, aire sous la courbe) ont été exprimées en % des efforts maximaux observés en situation standard (sans exosquelette) après traitement des signaux (redressement, filtrage, lissage) et les données posturales en % de temps passé à différents niveaux d'angulation articulaire. Après vérification de la normalité des distributions (test de Shapiro-Wilk, R version 4.2.3) et de l'homogénéité des variances (test de Fisher réalisé sous Excel), l'effet du port d'exosquelette et du modèle a été testé statistiquement par analyse des variances (Anova à un facteur sous Excel ou test de Kruskal-Wallis en fonction des résultats aux tests de Shapiro-Wilk et de Fisher ; le test T de Student a été réalisé avec BiostaTGV, de l'Inserm, fonctionnant sous R version 4.2.3). L'effet « élevage » n'a pas été étudié, les stratégies posturales étant davantage influencées par des facteurs individuels (taille, force, douleurs) que par la configuration du lieu de vaccination.

2. RESULTATS

2.1. Résultats en conditions contrôlées

L'ensemble des participants à cette première phase d'étude présente des douleurs chroniques importantes au niveau du rachis lombaire. Ainsi, le niveau moyen de douleur est de 74,8/100 au niveau des lombaires, avec trois personnes présentant un niveau de douleur forte, et une un niveau de douleur insupportable. Le niveau de douleur moyen est de 6,1 au niveau des dorsales, et de 14,5 au niveau des cervicales.

L'utilisation des exosquelettes A et B n'a pas d'impact sur le CCR lors de l'exercice statique (Tableau 4). On observe une légère réduction du coût cardiaque lors de l'utilisation du modèle B pour l'exercice dynamique ($P < 0,05$).

L'utilisation des deux exosquelettes augmente le temps de réalisation de la tâche (+22 % avec A, +32 % avec B). L'utilisation des exosquelettes réduit significativement ($P < 0,001$) la sollicitation des muscles du dos, le multifide et le longissimus, en exercice statique (respectivement -4 % et -5 % pour A, et -19 et -14 % pour B), et en exercice dynamique (respectivement -13 % et -9 % pour A, et -15 % et -7 % pour B). L'utilisation des exosquelettes n'a pas d'impact sur l'activité des muscles élévateurs de la scapula et de l'épaule en exercice statique. En exercice dynamique, le modèle A réduit significativement de 13 % l'activité du deltoïde, tandis que le B l'augmente significativement de 4 %. Concernant les muscles des cuisses, l'impact est différent selon les modèles. Le modèle A augmente significativement la sollicitation du droit antérieur (+30 % en statique, +18 % en dynamique) et diminue significativement la sollicitation du biceps fémoral (-3 % en statique, -9 % en dynamique). Le modèle B, quant à lui, diminue significativement la sollicitation du droit antérieur (-30 % en statique, -23 % en dynamique), et augmente significativement la sollicitation du biceps fémoral (+5 % en statique, +3 % en dynamique).

En termes de posture, on observe avec le port d'exosquelettes une augmentation forte, mais non significative ($P = 0,12$) de la proportion de temps passé avec le dos formant un angle inférieur à 0° (c'est-à-dire avec une position légèrement penchée vers l'arrière) : ainsi, celle-ci passe de 2,0 % (sans) à 24,2 % (A) et 18,4 % (B).

Le port des exosquelettes entraîne ici un certain redressement du tronc à l'exercice, et donc une diminution du temps passé en flexion (vers l'avant). En dehors de ce point, l'utilisation des deux exosquelettes n'entraîne pas de modification significative des postures et des stratégies de mouvements.

Tableau 4 – Impact du port des deux exosquelettes (Modèles A et B) étudiés sur le coût cardiaque et les efforts musculaires lors des mesures en conditions contrôlées

	Sans exosquelette	Modèle A	Modèle B	Significativité ¹
% du Coût Cardiaque Relatif (% CCR)				
Exercice statique	28,89	30,06	26,73	<i>ns</i>
Exercice dynamique	29,84 ^a	30,80 ^a	27,67 ^b	*
Sollicitation musculaire (exercice statique) : (en % des efforts maximaux « sans exo »)				
Trapèze	62,06	64,68	57,70	<i>ns</i>
Deltoïde	82,57	87,48	79,75	<i>ns</i>
Multifide	81,09 ^a	77,79 ^b	66,02 ^c	***
Longissimus	82,55 ^a	78,70 ^b	70,75 ^c	***
Droit antérieur	84,51 ^a	110,27 ^b	59,16 ^c	***
Biceps fémoral	77,61 ^a	75,44 ^a	81,22 ^b	***
Sollicitation musculaire (exercice dynamique) : (en % des efforts maximaux « sans exo »)				
Trapèze	78,24	81,90	83,42	<i>ns</i>
Deltoïde	86,70 ^a	75,32 ^b	89,91 ^c	***
Multifide	83,21 ^a	72,29 ^b	71,06 ^b	***
Longissimus	84,45 ^a	76,52 ^b	78,51 ^c	***
Droit antérieur	67,31 ^a	79,44 ^b	51,83 ^c	***
Biceps fémoral	77,57 ^a	70,75 ^b	79,96 ^c	**

¹Effet du modèle d'exosquelette. *ns* : $P > 0,05$; * : $P < 0,05$; ** : $P < 0,01$; *** : $P < 0,001$. Sur une même ligne, des lettres différentes indiquent une différence statistique à $P < 0,05$.

2.2. Résultats en situation de travail

La plupart des participants à cette deuxième phase d'étude présentent des douleurs chroniques importantes au niveau du rachis lombaire. Ainsi, le niveau moyen de douleur est de 58,9/100 au niveau des lombaires, avec trois personnes présentant un niveau de douleur intense, et quatre un niveau de douleur insupportable. Le niveau de douleur moyen est de 23,3 au niveau des dorsales (deux personnes avec une douleur intense), et de 21,1 au niveau des cervicales (une personne avec une douleur intense).

2.2.1. Effort physique

Lors d'une des séances de vaccination, une des deux tiges du modèle B a été cassée par un utilisateur sur les deux tailles de

ce modèle. L'exosquelette a été remplacé pour la suite de l'étude, ce qui a amené le passage de la version 1 à la version 2.

L'utilisation des exosquelettes A et B n'a pas d'impact sur le coût cardiaque moyen lors des séquences de vaccination (Tableau 5).

L'utilisation des deux exosquelettes augmente numériquement le temps de réalisation (+21 % avec A, +16 % avec B), mais l'écart n'est pas significatif.

L'utilisation des exosquelettes n'a pas d'effet significatif sur l'activité du multifide, mais elle augmente significativement l'activité du longissimus (+16 % pour A, +37 % pour B). Au niveau des épaules, le port des exosquelettes augmente significativement l'activité du trapèze avec B (+18 %), et réduit significativement celle du deltoïde.

Tableau 5 – Impact du port des deux exosquelettes (Modèles A et B) étudiés sur le coût cardiaque et les efforts musculaires lors des vaccinations en élevage

	Sans exosquelette	Modèle A	Modèle B	Significativité ¹
Coût cardiaque (% Coût Cardiaque Relatif moyen)				
Exercice statique	31,62	30,80	34,68	<i>ns</i>
Exercice dynamique	35,59	31,01	36,84	<i>ns</i>
Sollicitation musculaire : (en % des efforts maximaux « sans exo »)				
Trapèze	70,45 ^a	72,91 ^a	83,15 ^b	*
Deltoïde	65,48 ^a	36,63 ^b	56,60 ^c	***
Multifide	88,95	87,16	78,59	<i>ns</i>
Longissimus	89,74 ^a	103,90 ^b	122,91 ^c	***
Droit antérieur	79,97 ^a	139,82 ^b	132,41 ^b	***
Biceps fémoral	79,97 ^a	117,90 ^b	118,86 ^b	**

¹Effet du modèle d'exosquelette. *ns* : $P > 0,05$; * : $P < 0,05$; ** : $P < 0,01$; *** : $P < 0,001$. Sur une même ligne, des lettres différentes indiquent une différence statistique à $P < 0,05$.

Au niveau des cuisses, l'activité des deux muscles étudiés est fortement et significativement augmentée, avec respectivement +75 % et +66 % pour le droit antérieur, et +47 % et +49 % pour le biceps fémoral.

2.2.2. Acceptabilité par les utilisateurs

Les questionnaires d'acceptabilité montrent des valeurs positives (>2,5/5) pour tous les items, avec peu d'écart entre les modèles. Les participants disent réussir à mettre et enlever seuls les deux modèles (note entre 4 et 5). La facilité et la rapidité d'habillage, l'adaptation aux mouvements, l'absence de gêne et l'absence de frottements ont des notes comprises entre 3 et 4. A l'issue de l'essai, une seule personne a répondu positivement à la question : « souhaiteriez-vous vous équiper ? ».

3. DISCUSSION

3.1. Pertinence de l'échantillon

L'étude a été réalisée afin d'évaluer l'intérêt d'exosquelettes « dos » dans une démarche de prévention, c'est-à-dire avant la survenue de problèmes de dos. Les entretiens d'inclusion révèlent que, parmi les 12 participants, un seul ne souffre pas de manière intense ou insupportable du dos. Il n'est donc pas possible de considérer cet échantillon comme un public destinataire potentiel d'actions de prévention primaire. Néanmoins, la prévalence des problèmes de dos étant très élevée en élevage porcin, nous considérons que ce public est représentatif de la population travaillant dans les élevages porcins bretons.

3.2. Intérêt des exosquelettes « dos » lors des vaccinations de porcelets

Les mesures réalisées en situation de travail montrent que l'utilisation des exosquelettes « dos » A et B n'a pas d'impact bénéfique sur l'activité musculaire au niveau du dos. Au contraire, les contraintes augmentent au niveau du longissimus, du trapèze, et des muscles des cuisses. Ceci s'explique sans doute par le fait que la vaccination des porcelets ne s'effectue pas dans le seul plan sagittal, comme c'est le cas pour les exercices en conditions contrôlées. La vaccination exige en effet un déplacement haut/bas, mais aussi des torsions du tronc qui mobilisent des muscles que les exosquelettes testés ne soulagent pas. Dans une démarche de prévention des problèmes de dos, ou de soulagement de problèmes de dos existants, les solutions techniques évitant de porter les porcelets (pont et fosse de vaccination, éleveur) sont donc à privilégier, tout en travaillant sur l'ensemble du poste de travail.

L'exosquelette arrive en fin de raisonnement lorsqu'on mobilise les neuf principes de prévention primaire définis dans l'article L4121-2 du Code du travail. Il ne peut pas être considéré comme un équipement de protection individuelle car les caractéristiques de la personne (morphologie, état de santé), l'environnement de travail et l'organisation de la tâche peuvent réduire, voire annuler, son bénéfice. Aussi, en cas d'utilisation, il est nécessaire d'être très à l'écoute du ressenti de l'utilisateur.

Alors que la population impliquée dans l'étude était a priori intéressée par les exosquelettes, et que les exploitants de plusieurs élevages envisageaient de s'équiper, les intentions d'équipement à l'issue de l'essai sont faibles. Ces résultats s'expliquent sans doute par le manque d'assistance ou les efforts (physiques, cognitifs, organisationnels) supplémentaires à fournir. Ils sont cohérents avec ceux d'autres études réalisées dans le milieu agricole, qui montrent des interruptions d'études faute d'adhésion des participants (Jakob *et al.*, 2023), ou des contraintes trop importantes par rapport aux bénéfices, dans le cas de la traite par exemple (Collet, 2022).

3.3. Intérêt des mesures en situation de travail

Alors que les tests en conditions contrôlées montraient une réduction des efforts musculaires au niveau du dos avec les exosquelettes, les résultats en situation de travail montrent au contraire une absence de bénéfice, et une augmentation des contraintes. En effet, attraper des porcelets au sol puis les maintenir au niveau de la poitrine demande de travailler dans plusieurs plans, avec une « charge » mobile, remuante, dont la contention demande davantage d'efforts qu'un objet du même poids. Cet écart montre l'intérêt d'évaluer l'impact d'équipements sur le travail en situation réelle, afin de prendre en compte l'ensemble des contraintes de la tâche.

CONCLUSION

En conditions contrôlées, les exosquelettes réduisent l'activité des muscles du dos. En revanche, ce n'est pas le cas dans la situation de travail observée. Cela s'explique par les contraintes de la tâche, liées à l'environnement de travail et surtout au fait de manipuler des animaux vivants et donc mobiles. Les exosquelettes « dos » testés ne semblent pas, dans leur version actuelle, permettre d'améliorer les conditions de travail lors de séances de vaccination. Des solutions de prévention primaire, visant à réduire les risques à la source, restent pour l'instant à privilégier.

Cette étude a bénéficié du soutien financier de France 2030 « Territoires d'innovations » et du Programme Régional pour le Développement Agricole et Rural.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BiostaTGV, Inserm – Université Santé Sorbonne. <https://biostatgv.sentiweb.fr/>.
- Collet C., 2022. Projet Exotraite : test de 3 exosquelettes à la traite en Normandie. 5èmes Rencontres Nationales Travail en agriculture, Clermont-Ferrand, France, 1 p.
- Haute Autorité de Santé, 2022. Liste des échelles acceptées pour mesurer la douleur, 5 p.
- INRS, 2023. Dossier Exosquelettes. En ligne. <https://www.inrs.fr/risques/exosquelettes/ce-qu-il-faut-retenir.html>
- Jakob M., Balaguier R., Park H., Trask C., 2023. Addressing exoskeleton implementation challenges: case studies of non-acceptance in agriculture. *J Agromedicine*, 28(4), 784-796. <https://doi.org/10.1080/1059924X.2023.2236605>
- MSA, 2015. Prévention du mal de dos en maternité porcine – Deux nouveaux chariots de soins aux porcelets pour moins d'efforts. Dossier technique Santé Sécurité au Travail, 75 p.
- MSA, 2023. Base sinistralité ATMP salariés 2000-2022
- R - The R Project for Statistical Computing – Version 4.2.3 - The R Foundation for Statistical Computing - c/o Institute for Statistics and Mathematics, Wirtschaftsuniversität Wien, Welthandelsplatz 1, 1020 Vienna, Austria
- Theurel J., Atain-Kouadio J-J, Desbrosses K., Keranguéven L., Duval C., 2018. 10 idées reçues sur les exosquelettes. INRS, 17 p.