

L'étourdissement est une inconscience provoquée, obligatoire avant la mort de l'animal, (directive 93/119/CE) pour des raisons de respect de l'animal et pour le confort et la sécurité des opérateurs. À ce jour, pour le porc, deux systèmes coexistent : l'étourdissement électrique ou électronarcose, et l'étourdissement gazeux au gaz carbonique (CO₂).

L'effet de l'électronarcose est basé sur l'induction massive d'un état épileptique du cerveau, due à la décharge des neurones par le courant qui traverse le cerveau. Les neurones ne fonctionnent plus jusqu'à leur repolarisation. L'intérêt du système d'anesthésie électrique réside dans sa brièveté d'application. Le système est souvent automatisé. Ce système présente des inconvénients du point de vue du bien-être animal. L'utilisation de l'anesthésie électrique nécessite la séparation des porcs au plus tard à l'entrée du restrainer. La séparation contrarie l'instinct grégaire de l'espèce porcine. Souvent, les animaux se chevauchent dans les couloirs étroits, ce qui provoque des griffures. Le bruit engendré par les cris des animaux est pénible pour eux comme pour le personnel. Le positionnement automatique des électrodes se fait parfois incorrectement, à cause des variations de taille et de forme des porcs et le passage du courant peut alors être insuffisant et douloureux. Ce système est très fréquemment usité en Amérique du Nord et dans la majorité des pays en Europe.

En France, l'anesthésie au CO₂ était très développée dans les années 70 avant d'être concurrencée par l'anesthésie électrique automatique qui répond mieux à des cadences élevées. Depuis quelques années, de nouveaux développements techniques ont permis son utilisation dans différents pays européens (Suède, Danemark, Pays-Bas) à une cadence élevée (400-800 porcs/h ; 1 ; 2).

Anesthésie gazeuse des porcs

Réponses physiologiques et comportementales à différents mélanges gazeux

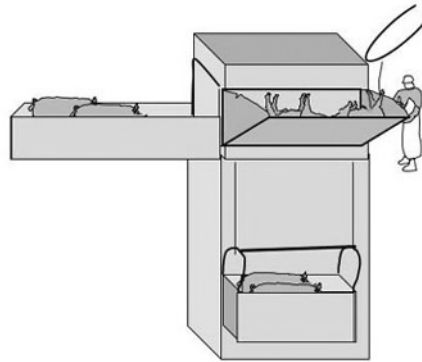
Dans cette étude sont décrites et comparées les réactions comportementales et physiologiques des porcs lors de leur immersion dans différents mélanges de gaz contenant du CO₂. L'objectif est d'apporter une aide à la décision concernant l'utilisation de ces différents mélanges pour induire une inconscience respectueuse du bien-être des animaux et maintenir cette inconscience suffisamment longtemps pour garantir la sécurité des opérateurs.

DEISS V., ASTRUC T., FERREIRA C., TERLOUW C.

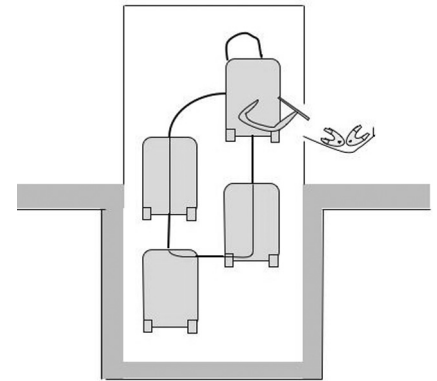
Biochimie et protéines musculaires — Qualités des produits animaux
Inra de Theix
63122 ST-GENÈS-CHAMPANELLE

Cette étude a été financée par OFIVAL (N°Réf. SIVAL NL : 2003-0920)

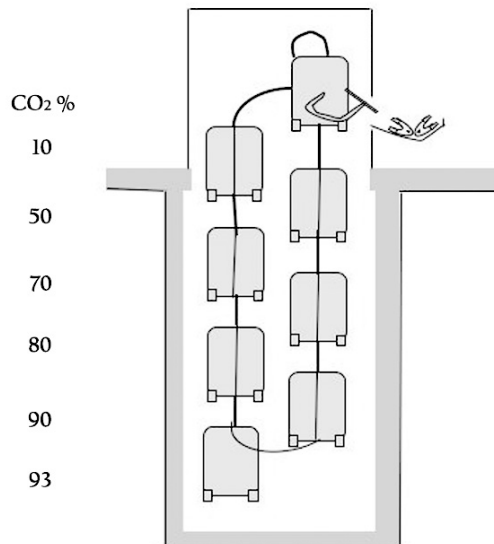
Figure 1 : PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DE PUIITS À ÉTOURDISSEMENT PAR GAZ



Dans le système dip-lift, les porcs sont directement descendus dans le fond du puits.



Dans le système à nacelle les porcs sont descendus dans le puits en faisant des arrêts, pendant lesquels une nacelle suivante est remplie de porcs et une précédente vidée sur le tapis.



Le principe du gradient de CO_2 dans un puits dans les systèmes dip-lift et à nacelles est représenté dans le schéma ci-contre. Le CO_2 , plus lourd que l'air, est introduit au fond du puits. La concentration est donc plus élevée au fond, et diminue graduellement à mesure que l'on remonte vers la surface. Les valeurs exactes dépendent de l'équipement et de la concentration paramétrée pour le fond du puits.

Le poste de narcose au CO_2 est un puits de 7 à 8 mètres de profondeur où les porcs sont descendus dans une nacelle, soit individuellement, soit en groupe de deux à six individus. Le CO_2 , qui est un gaz lourd avec une densité d'environ 1,5 fois celle de l'air, se dépose au fond du puits. Un des intérêts du système est la possibilité de modifier le mode de conduite des animaux par une amenée et une anesthésie des animaux en groupe (figure 1). En France, un seul abattoir a adopté le procédé en groupe (système à nacelle). Les autres, cinq sur environ trente-cinq grands abattoirs qui sont équipés avec le système d'anesthésie au CO_2 ont aménagé le système électrique (système dip-lift), maintenant la conduite individuelle des animaux.

Actuellement, le système utilise au moins 70 % de CO_2 dans de l'air. L'anesthésie résulte de l'action acidifiante du sang par le CO_2 , et par conséquent du liquide céphalorachidien. L'acidification du liquide céphalorachidien perturbe le fonctionnement normal des neurones du cerveau qui conduit à une perte de connaissance et de motricité (3 ; 4 ; 5). Le pH normal du liquide céphalorachidien est de 7,4. Un pH de 7,1 et de 6,8 conduisent respectivement à une analgésie et une anesthésie (6). L'efficacité de l'anesthésie a été largement démontrée par l'analyse d'électroencéphalogrammes, montrant que le cerveau n'enregistre aucun signal extérieur et donc que l'animal est inconscient (4 ; 7 ; 8). Toutefois, l'étourdissement par gaz n'est pas

instantané. À une concentration de 70 % de CO_2 , la phase d'induction (le délai jusqu'à la perte de conscience) dure, selon les études, entre 20 et 30 s et à 85 et à 90 % elle est de 22 et 15 s, respectivement (9 ; 10 ; 11 ; 12). Au niveau du bien-être animal, l'inconvénient principal est que pendant la phase d'induction, on observe une excitation inhabituelle des animaux avec des réactions de fuite, d'agressivité du porc envers ses congénères, des mouvements de la tête et d'ouverture de la gueule et des signes de souffrance respiratoire intense (7 ; 13 ; 10 ; 11 ; 14). La durée et la forme de ces réactions dépendent de la concentration en CO_2 . La majorité des porcs immergés dans des concentrations entre 40 et 70 % de CO_2 montre des réactions de fuite (11). À des concen-

trations plus élevées, la rapidité de la perte de posture réduit probablement les réactions de fuite, toutefois la majorité des porcs refuse d'entrer dans une pièce contenant 90 % de CO₂ dans de l'air, malgré la présence d'une récompense (10; 11). Chez l'homme, l'inhalation de CO₂ peut induire une sensation asphyxiant et piquante pour les muqueuses (15). À l'heure actuelle, il n'existe pas de consensus sur le fait de savoir si le

porc perd conscience avant ou après les signes de détresse (4; 7; 16; 8; 17). Le maintien de l'inconscience dépend de la durée d'immersion des porcs dans le CO₂. Au-delà de 130 s. d'immersion, 90 % des porcs ne présentent pas de sensibilité à la douleur 30 s. après leur étourdissement, alors que pour une immersion de 91 s., les porcs sont conscients et sensibles (18) Les développements de l'application de ce procédé d'étourdissement dépendront largement de son effica-

cité dans l'induction et le maintien de l'inconscience et de l'impact qu'il aura sur les qualités des carcasses et des viandes. La littérature rend compte de l'excitation comportementale des porcs, mais il n'existe pas à ce jour une description détaillée de celle-ci. L'objectif de la présente étude était d'évaluer et de comparer les réponses comportementales et physiologiques de porcs à une sur-concentration de CO₂ mélangé à de l'air ou d'autres gaz. Une seconde étude évalue l'effet de l'étourdissement au gaz, par rapport à l'électro-narcose sur certaines qualités objectives des viandes de porcs (19).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Animaux

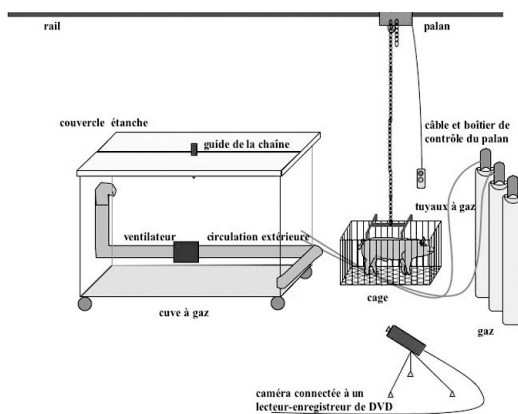
Trente-quatre porcs (croisés de père Duroc et de mère Landrace x Large White), d'un poids compris entre 80 et 90 kg ont été achetés (SELPA, Isle et Bardais, Allier) en trois séries de 10 à 12 porcs (25 femelles, 9 mâles castrés). Les porcs étaient maintenus dans des groupes de 5 à 6 porcs dans des loges sur paille (3 x 4,5 m) dans la même animalerie (11 x 6,5 m). Les loges étaient régulièrement nettoyées et les porcs recevaient environ 2,5 kg d'aliment (à base de céréales) par porc et par jour dans des nourrisseurs. L'eau était dispensée à volonté à l'aide de tétines. La lumière était artificielle, allumée de 8 à 20 h.

Salle expérimentale

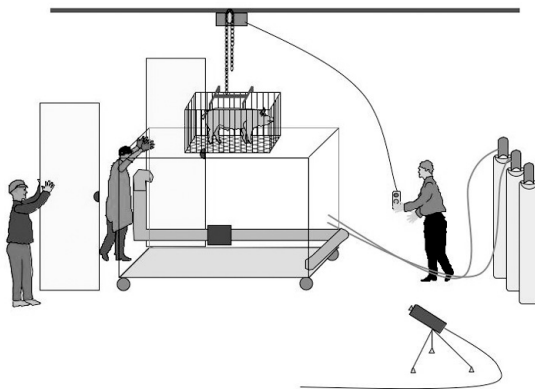
La salle était conçue de manière à pouvoir descendre un porc maintenu dans une cage ajourée (sol et parois) dans une cuve à gaz à l'aide d'un palan fixé sur un rail (figure 2).

La cuve à gaz (1 x 2 x 1,50 m) construite en Plexiglass transparent d'1 cm d'épaisseur était montée sur roulettes. Le sol était en PVC. Pour un bon fonctionnement, le couvercle devait s'enlever et se remettre en place facilement. À cette fin, il consistait en deux plaques de taille similaire de polystyrène extrudé. Les deux plaques rainurées-bouvetées se rejoignaient et s'enclenchaient sur la ligne médiane au-dessus de la cuve assurant ainsi l'étanchéité du système. Sur chaque moitié de couvercle, au milieu du bord intérieur, un demi-tube (coupé en sa longueur) en PVC (diamètre 5 cm, longueur 10 cm) servait de guide pour la chaîne du palan qui supportait la cage contenant le

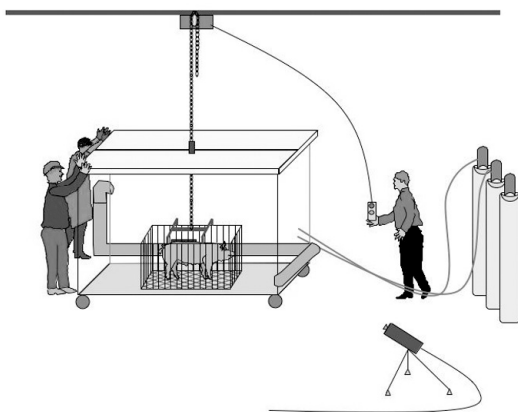
Figure 2 : INSTALLATION EXPÉRIMENTALE



Disposition du matériel



Introduction du porc dans le caisson d'étourdissement rempli de gaz



Étourdissement du porc

porc. Le tube était bouché quand la cuve contenait du gaz, entre les séances (c'est-à-dire en absence de porc dans la cuve). Une gorge de 1,5 cm de profondeur et de largeur, proche des bords externes du couvercle assurait l'étanchéité entre celui-ci et les parois de la cuve qui s'emboîtaient dans la gorge. À 30 cm du sol, et à 10 cm d'un angle se trouvaient deux manchons sur lesquels des tuyaux à gaz se connectaient lors du remplissage de la cuve.

Pour assurer l'homogénéité des mélanges gazeux composés de molécules de poids différents, en limitant les flux à l'intérieur de la cuve, une circulation en circuit fermé, externe à la cuve, a été mise en place. Un tube en PVC de 10 cm de diamètre était fixé externe à la cuve et avait une ouverture à l'intérieur de la cuve à 15 cm du sol dans une des parois de la largeur, et une autre à 97 cm du sol, dans l'angle diagonalement opposé. Un ventilateur (Systemair, Skinnskatteberg, Suède) à faible débit permettait l'aspiration du mélange par l'ouverture du bas, vers laquelle était orienté le porc pendant les séances, et sa restitution par l'autre ouverture.

Une caméra vidéo était installée à un angle de 45° degré par rapport à l'axe du porc et les images ont été enregistrées en continu sur un lecteur de DVD (Samsung Electronic France).

Procédure

Après 3 à 5 jours d'habituation à leurs nouveaux locaux d'hébergement, les porcs étaient soumis à la procédure expérimentale en 1 séance par jour pendant 3 jours (habituation). Après un repos de 2 ou 3 jours, avait lieu la séance témoin, puis le lendemain le test avec le mélange de gaz. Un seul mélange était testé quotidiennement (3 ou 4 porcs par jour). Chaque porc était testé avec un seul mélange et les 3 mélanges étaient testés sur chaque série de porc. L'ordre des mélanges testés variait pour chaque série.

Pour l'habituation, le porc était sorti de sa loge d'élevage et introduit dans une loge d'attente (1,5 x 1 m), attenante à la loge d'élevage. Une sangle thoracique était fixée sur l'animal, afin de l'habituer à la procédure d'enregistrement de fréquence cardiaque prévu pour les séances ultérieures. Après 10 min, le porc était introduit dans une cage spécialement conçue, équipée de roulettes munie de portes

guillotines et d'un fond détachable maintenu par des attaches rapides (122 x 44 x 88 cm) et transportée sur 6,5 m jusqu'à la salle d'expérimentation. La cage était accrochée au palan, levée de 2 mètres, et l'ensemble était déplacé sur le rail pour être amené juste au-dessus de la cuve. La cage était descendue dans la cuve qui était immédiatement refermée (durée de la procédure depuis l'accrochage 57 s). La cage contenant le porc restait 75 s posée sur le sol de la cuve, puis était sortie et posée sur le sol de la salle. La cage était ouverte et le porc était guidé à pied à une loge de récupération (1,5 x 1,5 m) dans une 2e animalerie identique à la première, contenant d'autres porcs pour éviter des effets de stress dû à l'isolement. Le porc restait au moins 20 min dans la loge de récupération, avant d'être reconduit dans son groupe.

Les séances 'témoin' suivaient la même procédure, à l'exception de l'ajout de mesures de fréquence cardiaque. Pour les séances 'test', la fréquence cardiaque était enregistrée comme pour la séance témoin. De plus, une prise de sang était effectuée dès la sortie de la cuve à gaz. Le porc restait en observation pendant 10 min après l'immersion et après cette période appelée 'réveil', il était conduit à la loge de récupération. Pour les séances 'témoin' et 'test', les porcs étaient filmés (magnétoscope Thomson) dans leur loge de récupération pendant 20 min.

Pour obtenir la fréquence cardiaque, pendant l'attente dans la loge, un cardiofréquencemètre (Polar, Monitor, Anglet) était fixé sur le porc à l'aide d'une sangle thoracique (7 cm de large environ). L'émetteur était plat et intégré dans la sangle, le receveur-enregistreur avait la taille d'une montre, l'ensemble du système n'occasionnant pas ou peu de gêne à l'animal. La fréquence cardiaque était mesurée en continu et enregistrée par intervalles de 5 s. L'enregistrement démarrait dès la pose, permettant d'obtenir la fréquence cardiaque pendant au moins 10 min dans la loge d'attente et continuait jusqu'à son enlèvement dans la loge de récupération. Un repère temporel était enregistré dans le fichier de la fréquence cardiaque à chaque étape clé (enlèvement de la loge d'attente, début de la montée avec le palan, à la sortie de la cuve, avant et après le déplacement jusqu'à la loge de récupération), afin de pouvoir identifier les différentes

étapes sur la courbe.

Dès la pose de la cage, les crochets du fond étaient défaits et le haut de la cage enlevé. Le porc restant couché sur le sol, partiellement ou complètement inconscient, la prise de sang était réalisée dans une veine de l'oreille et immédiatement injectée dans un analyseur de sang (IRMA SL blood analysis system, diametrics medical Inc) afin de déterminer le pH et les pressions partielles du CO₂ et de l'O₂.

Durant les séances 'témoin' et 'test', le lecteur-enregistreur DVD était en marche afin d'enregistrer le comportement du porc pendant toute la procédure.

Les mélanges et les durées d'exposition étaient les suivants :

- Mélange 1. 80 % de CO₂ dans de l'air pendant 1 min 30
- Mélange 2. 40 % de CO₂ et de 30 % de O₂ pendant 3 min
- Mélange 3. 70 % de N₂O et 30 % de O₂ pendant 5 min
- Mélange 4. 70 % de N₂O et 30 % de CO₂ pendant 1 min 30.

Les durées d'exposition ont été déterminées grâce à des études bibliographiques suivies de tests sur des porcs d'essais (même élevage, même poids) qui ont eu lieu avant l'expérimentation. À l'aide d'observations directes nous avons déterminé, pour chaque mélange, une durée d'exposition permettant la perte de posture et une apparente perte de conscience, sans a priori, provoquer la mort de l'animal. Les essais ont montré que pour le mélange 3, les porcs restaient conscients même après 12 min d'exposition. Il a alors été décidé de tester ce mélange seulement sur 4 porcs, avec 5 min d'exposition.

Le trajet de descente et de montée à l'intérieur de la cuve durait environ 15 s au total. Cette durée était prise en compte pour déterminer le moment de remonter le porc. Ainsi, pour les mélanges 80 % de CO₂ dans de l'air, et 70 % de N₂O et 30 % de CO₂, le porc restait 75 s posé sur le sol de la cuve, pour les mélanges 40 % de CO₂ et de 30 % de O₂, et 70 % de N₂O et 30 % de O₂, ces durées étaient de 165 s et de 285 s, respectivement. La durée relativement stable du trajet aérien entre la cuve et le sol de la salle était comprise entre 29 et 31 s (29,8 s en moyenne),

Exploitation des données et analyses statistiques

À la relecture des DVD, séparément pour les deux périodes, pendant l'immersion et pendant le réveil, étaient déterminées les durées, fréquences et/ou les latences des comportements suivants :

- posture (latences, durées — debout, assis pattes avant tendues ou pliées, couché sur le ventre, sur le flanc ou en contorsion),
- position de la tête (durées — tête relevée, tête basse, tête droite),
- sursauts (durées),
- détresse respiratoire (latences, durées — suffocation, gueule ouverte, ouverture et fermeture de la gueule, mâchonnements),
- vocalisations (cris aigus: durées, fréquences),
- tentatives de se lever, (latences, durées),
- déplacement (latences et durées — marche stable ou instable),
- chutes (durées).

Le comportement pendant l'immersion était uniquement évalué pendant la période où la cage était posée sur le sol de la cuve pour éviter de prendre en compte des réactions liées au déplacement de la cage pendant le trajet aérien. Les durées et fréquences ont été rapportées à des secondes et au nombre d'occurrences par minute, sauf pour les vocalisations pour lesquelles les durées et fréquences totales sont aussi rapportées (75 ou 165 s selon le mélange). Pour la période de récupération, la posture (debout, assis, couché sur le flanc, couché sur le thorax) du porc a été relevée toutes les minutes pendant 20 min.

Pour la séance témoin, la moyenne de la fréquence cardiaque a été déterminée pour différentes étapes : 1./ les 5 dernières minutes dans la loge d'attente, 2./ la minute avant de lever la cage, 3./ les 75 s pendant lesquelles la cage était posée sur le sol de la cuve, 4./ la minute après avoir posé la cage sur le sol de la salle expérimentale, et 5./ sur 10 min, commençant 5 min après l'introduction du porc dans la loge de récupération.

Pour la séance test, les moyennes indiquées sous les points 1, 2, 4 et 5 étaient également déterminées. Du aux mouvements abrupts des porcs dans les gaz, pendant l'immersion, le signal cardiaque était le plus souvent perdu pour tous les mélanges sauf

pour le N₂O/O₂, et la fréquence cardiaque n'a pas pu être analysée. Dès la sortie de la cuve, le signal était rétabli, permettant d'établir la latence de récupération d'une activité cardiaque normale (variabilité voisine de celle pendant le repos, moyenne non évolutive). La vitesse de rétablissement représentant la pente de la courbe était calculée (moyenne pendant le rétablissement, divisée par la durée). À partir du rétablissement de l'activité cardiaque normale, les moyennes étaient déterminées sur la minute suivante, puis sur la période restante jusqu'à ce que le porc soit emmené dans la loge de récupération.

Le pH, pO₂ et pCO₂ ont été analysés par les capteurs chimiques de l'analyseur de sang. A partir des valeurs, d'autres teneurs ont pu être calculées :

1. HCO₃⁻: calcul basé sur l'équation d'Henderson-Hasselbalch :

$$\text{pH} = \text{pK} + \log \left(\frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]} \right)$$
 À ce point, le pK de l'acide carbonique dans le plasma est de 6.1 et la solubilité du CO₂ dans le plasma est de 0,0307 mmol/litre Hg ;
2. TCO₂: teneur total en dioxyde de carbone, c'est la somme du CO₂ dans les bicarbonates et du CO₂ dissout ;
3. BEb (l'excédent de bases dans le sang, c'est-à-dire la quantité de bases titrables dans le sang) :

$$\text{BEb} = [1 - 0.014 * \text{Hb}] * ([\text{HCO}_3^-] - 25 + (1.43 * \text{Hb} + 7.7) (\text{pH} - 7.4))$$
 où Hb est le taux d'hémoglobine entré ;
4. BEecf (l'excédent de bases du liquide extracellulaire ; cette quantité ne reflète que la composante non respiratoire des troubles du pH) :

$$\text{BEecf} = [\text{HCO}_3^-] - 25 + 16.2 (\text{pH} - 7.4) ;$$
5. O₂Sat (saturation en oxygène ; la quantité d'oxyhémoglobine dans une solution exprimée en fraction de la quantité totale d'hémoglobine capable d'absorber de l'oxygène (oxyhémoglobine plus désoxyhémoglobine) :

$$\text{O}_2\text{sat} = \text{O}_2 \text{ sur HB} / \text{capacité totale} \times 100 ; \text{tHb} (\text{hémoglobine totale évaluée à partir de l'hématocrite}) ; \text{tHb} = \% \text{Hct} * \text{CMHH} / 100$$
 où CMHH (concentration moyenne en hémoglobine des hématies) est estimée à 37g/dl.

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel Crunch (version 4, Crunch Software Cooperation, Oakland, Etats-Unis). Les données

ont été soumises à des analyses de variance avec un facteur de variation inter-individuel (mélange) et un facteur intra-individuel (jour : témoin vs test), auquel s'ajoutait un deuxième pour les analyses de la fréquence cardiaque (différentes étapes). Des corrélations ont été effectuées après une rectification pour les effets de l'ébourdissement (" Pooled Pearson "). Le mélange N₂O/O₂ a été exclu de l'analyse de variance pour raison d'effectif insuffisant.

RÉSULTATS

Deux porcs sont morts dans les 2 minutes suivant la sortie de la cuve contenant 80 % de CO₂, et 40 % de CO₂ et 30 % d'O₂, vraisemblablement dû à des arrêts cardiaques.

Comportement

Pendant l'immersion dans le mélange CO₂/O₂, les porcs restaient plus longtemps debout, étaient plus souvent en contorsion et montraient plus souvent des signes de détresse respiratoire (mais plus tardivement) que les porcs immergés dans les autres mélanges (tableau 1a). En particulier ces porcs avaient plus souvent (p < 0,001) la posture debout ayant la tête relevée (7,6 ± 1,6), que les porcs dans le CO₂ (1,4 ± 0,7) ou dans le N₂O/CO₂ (1,6 ± 0,9). Les signes de détresse respiratoire plus élevés chez les porcs dans le mélange CO₂/O₂ étaient l'ouverture de la gueule (p < 0,05) et les mâchonnements (p < 0,05) par rapport aux deux autres groupes. Par contre, pendant l'immersion dans le mélange CO₂/O₂, les porcs faisaient plus tardivement des bonds. Les vocalisations étaient des grognements ou des soupirs audibles, à l'exception d'un porc poussant des cris (CO₂/O₂). Après la sortie de la cuve, on a observé des signes de détresse respiratoire chez une partie des porcs (tableau 1). La majorité s'est relevée spontanément en moins de 10 min. Le délai de reprise de la posture debout ne dépendait pas du gaz utilisé. Toutefois, après immersion dans du CO₂/O₂, moins de porcs tendaient à tomber après la reprise de la posture debout (Chi-carré = 5,65 ; p < 0,10). Au cours de la phase de récupération (tableau 2), les porcs étaient plus souvent et plus rapidement couchés sur le flanc (p < 0,0001) et le thorax (p = 0,0008 et p = 0,0014) après les séances 'test' qu'après les séances

Tableau 1a
MOYENNES DES DURÉES DES ACTIVITÉS (S/MIN) OBSERVÉES
PENDANT L'IMMERSION (CAGE POSÉE) ET AU COURS DU RÉVEIL¹

Activité	80 % CO ₂	40 % CO ₂ /30 % O ₂	30 % CO ₂ /70 % N ₂ O	p
Immersion				
Debout	2,42 ± 0,69 b	9,86 ± 1,80 a	5,73 ± 0,86 b	0,0008
Debout pattes avant pliées	0,72 ± 0,42	0,53 ± 0,41	0,91 ± 0,91	0,91
Assis pattes avant tendues	0,24 ± 0,24	2,56 ± 1,21	1,89 ± 0,68	0,13
Assis, pattes avant pliées	0,24 ± 0,17	1,52 ± 0,80	0,91 ± 0,76	0,38
Couché sur le sternum	10,21 ± 5,86	27,01 ± 4,23	21,90 ± 5,99	0,09
Couché sur le flanc	34,46 ± 9,33 a	5,50 ± 5,50 b	17,89 ± 7,29 a,b	0,04
Couché en contorsion	3,06 ± 1,35 b	9,30 ± 3,16 a	1,98 ± 0,97 b	0,06
Sursauts	9,46 ± 2,15	3,71 ± 1,31	8,79 ± 1,70	0,04
Détresse respiratoire	25,54 ± 4,50 b	44,34 ± 3,54 a	30,54 ± 2,37 b	0,003
Latence perte posture debout	7,9 ± 2,7a	48,4 ± 10,2 b	10,1 ± 2,5 a	0,0001
Vocalisations (durée totale)	5,6 ± 1,6 a,b	2,3 ± 1,5 a	10,0 ± 4,0 b	0,07
Vocalisations (s/min)	4,5 ± 1,3 a,b	0,8 ± 0,5 a	8,0 ± 3,2 b	0,02
Vocalisations (nombre total)	1,5 ± 0,4	1,4 ± 0,7	3,0 ± 1,0	0,15
Vocalisations (nombre/m)	1,2 ± 0,3 a	0,5 ± 0,2 a	2,4 ± 0,8 b	0,02
Latence bonds	7,25 ± 1,2 a	50,6 ± 18,2 b	12,1 ± 2,2 a	0,006
Latence détresse respiratoire	5,4 ± 2,1a, b	9,8 ± 2,4 a	4,2 ± 2,9 b	0,055
Réveil				
Couché sur le sternum	22,58 ± 5,78	28,11 ± 5,21	15,36 ± 5,74	0,28
Couché sur le flanc	18,60 ± 2,20	13,57 ± 5,04	13,53 ± 2,66	0,55
Couché total	41,18 ± 5,41	41,69 ± 4,48	28,90 ± 6,67	0,21
Debout	3,75 ± 2,43 a,b	0,83 ± 0,44 b	9,79 ± 3,10 a	0,03
Assis	4,84 ± 4,20	1,81 ± 0,86	0,98 ± 0,98	0,53
Tentatives de se lever	3,65 ± 0,84	4,37 ± 2,06	1,31 ± 0,46	0,25
Marche instable	2,55 ± 1,21	0,53 ± 0,37	0,98 ± 0,55	0,19
Marche stable	3,62 ± 2,49	8,41 ± 5,44	14,48 ± 4,71	0,26
Détresse respiratoire	1,76 ± 1,02	3,81 ± 1,73	1,89 ± 1,25	0,51

¹a, b sur une même ligne : p < 0,05

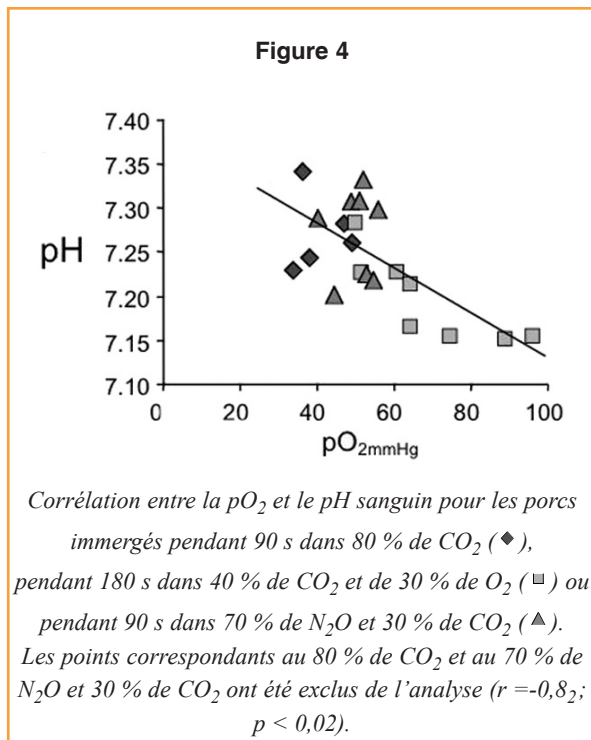
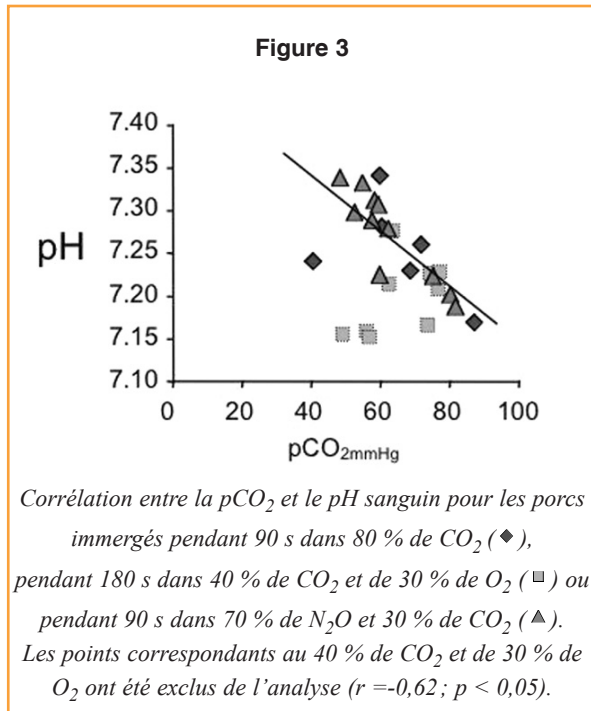
Tableau 1b
LATENCES DES ACTIVITÉS APRÈS LA SORTIE DE LA CUVE (S) ET NOMBRE DE PORCS
MONTRANT CHAQUE ACTIVITÉ (N)¹

Activité	80 % CO ₂	40 % CO ₂ /30 % O ₂	30 % CO ₂ /70 % N ₂ O	p
Détresse respiratoire	37,3 ± 21,2; n = 4	29,8 ± 15,0; n = 6	46,0 ± 50,8; n = 3	0,87
Première tentative de se lever	145,9 ± 13,8; n = 9	90,3 ± 59,7; n = 8	167,1 ± 35,2; n = 8	0,35
Se lève spontanément avec succès	314,3 ± 64,1a, b; n = 6	329,8 ± 147,1a; n = 5	137,3 ± 17,2b; n = 6	0,07
Chute ²	268,5 ± 102,0; n = 4	n = 0	127,0 ± 10,3; n = 3	0,23
Marche instable	359,5 ± 103,6a; n = 4	482,5 ± 268,0a; n = 2	132,6 ± 13,9b; n = 5	0,04
Marche stable	337,0 ± 28,3; n = 2	231,3 ± 52,2; n = 3	282,0 ± 33,0; n = 6	0,30

¹a, b sur une même ligne : p < 0,05.
²mélange CO₂/O₂ exclu de l'analyse

Tableau 2
LATENCES (MIN) ET FRÉQUENCE DES ACTIVITÉS DANS LA LOGE DE RÉCUPÉRATION

Activité	Activité	Après immersion dans		p
		de l'air (habituatation)	un des 3 mélanges (test)	
Latence	Debout	0,28 ± 0,05	5,96 ± 1,09	0,0016
	Couché sur le flanc	20,0 ± 3,65	12,61 ± 2,30	< 0,0001
	Couché sur le thorax	13,73 ± 2,51	7,54 ± 1,37	0,0014
	Assis	18,20 ± 3,32	15,61 ± 2,85	0,11
Fréquence	Debout	15,57 ± 0,87	3,83 ± 0,95	< 0,0001
	Couché sur le flanc	0,0 ± 0	5,63 ± 1,28	< 0,0001
	Couché sur le thorax	3,63 ± 0,72	8,83 ± 1,35	0,0008
	Assis	0,80 ± 0,45	0,37 ± 0,13	0,35



'témoin' et moins souvent et plus tardivement debout ($p < 0,0001$ et $p = 0,0016$). Ces différences ne dépendaient pas du gaz utilisé.

PHYSIOLOGIE

Le délai de la prise de sang à partir de la sortie de la cage de la cuve jusqu'à la pose sur le sol de la salle expérimentale était similaire pour les trois mélanges : 185 s en moyenne ($p = 0,66$). La pression atmosphérique était plus élevée pendant les séances avec le mélange N_2O/CO_2 qu'avec le mélange 80 % CO_2 /air et 40 % $CO_2/30\% O_2$ (tableau 3).

La pO_2 était plus élevée ($p < 0,001$) chez les porcs immergés dans le mélange 40 % $CO_2/30\% O_2$ que chez les autres porcs (tableau 3). Le pH du sang était plus bas ($p < 0,05$) pour les porcs immergés dans le mélange 40 % $CO_2/30\% O_2$ par rapport aux mélanges 80 % CO_2 /air et 70 % $N_2O/30\% CO_2$ (tableau 3). Ce pH plus bas est associé à un *Beb* un peu plus bas ($p < 0,08$) pour ce groupe par rapport à celui immergé dans le mélange 80 % CO_2 /air, alors que le groupe 70 % $N_2O/30\% CO_2$ a des valeurs intermédiaires (Tableau 3). Les pO_2 et pCO_2 étaient corrélées avec différentes variables physiologiques (tableau 4). La pCO_2 était corrélée avec le pH ($r = -0,62$; $p < 0,05$; Fig. 3) seulement après exclusion du groupe mélange 40 % $CO_2/30\% O_2$. Pour ce dernier groupe, le pH était corrélé ($r = -0,82$; $p < 0,02$; figure 4) avec le pO_2 . Les pO_2 et pCO_2 étaient corrélées avec le pH dans une régression multiple ($p < 0,001$), expliquant 70 % de la variabilité (r^2 ajusté).

Les moyennes globales de la fréquence cardiaque (battements

Tableau 3
MOYENNES ET ÉCARTYPES DE LA MOYENNE DES CONSTITUANTS SANGUINS, APRÈS IMMERSION DANS LES DIFFÉRENTS MÉLANGES

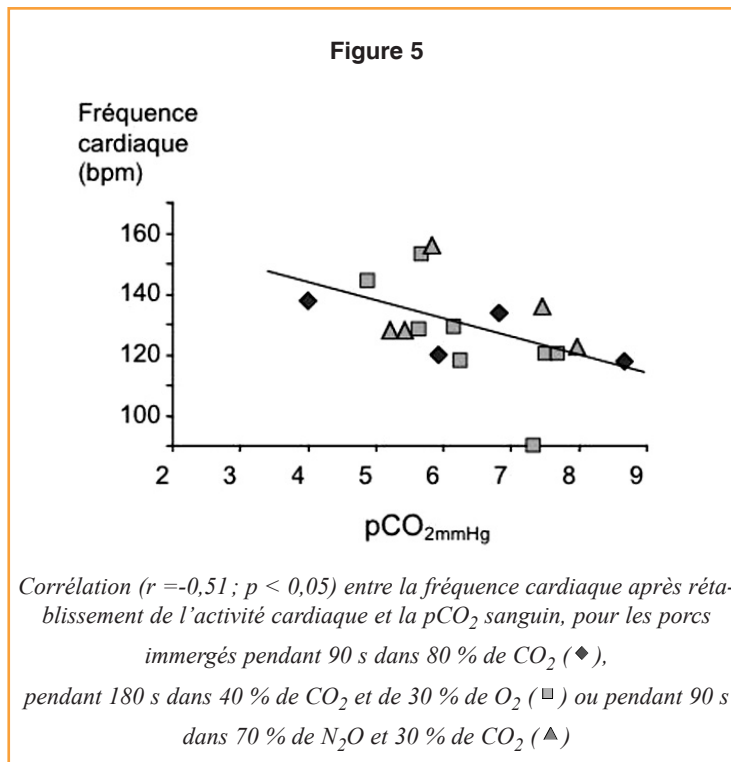
	80 % CO_2	40 % $CO_2/30\% O_2$	70 % $N_2O/30\% CO_2$	p
pH	7,26 ± 0,02a	7,20 ± 0,02b	7,28 ± 0,02a	0,05
pCO_2 (mmHg)	63,8 ± 5,5	63,5 ± 3,6	61,3 ± 3,5	0,90
pO_2 (mmHg)	37,0 ± 3,3a	68,2 ± 5,8b	48,9 ± 1,8a	0,001
HCO_3^-	30,2 ± 2,8	24,8 ± 2,0	28,1 ± 0,9	0,19
TCO_2	32,4 ± 3,0	26,8 ± 2,1	30,0 ± 0,9	0,21
BEB	1,63 ± 2,24	-3,99 ± 1,87	0,41 ± 0,73	0,08
BEECF	2,91 ± 2,78	-3,45 ± 2,17	1,14 ± 0,86	0,11
O_2 sat (%)	74,3 ± 6,5	86,1 ± 2,2	77,0 ± 2,5	0,13

a et b : les moyennes marquées de deux lettres différentes sur la même ligne sont significativement différentes ($P < 0,05$).

Tableau 4
CORRÉLATIONS ENTRE LA PO₂ ET PCO₂
ET DIFFÉRENTES AUTRES VARIABLES PHYSIOLOGIQUES

	pO ₂		pCO ₂	
	r	p	r	p
FC avant monter séance témoin	0,48	0,03	-0,44	0,05
FC dans cuve séance témoin			-0,45	0,05
FC dans loge de récupération séance témoin			-0,43	0,06
FC après rétablissement (1e min) séance test	0,55	0,04		
FC après rétablissement (temps restant) séance test	0,53	0,05	-0,52	0,05
pH sanguin	-0,45	0,05		
pO ₂			-0,51	0,03
pCO ₂	-0,51	0,03		
HCO ₃ ⁻	-0,66	0,002	0,78	0,00001
TCO ₂	-0,65	0,003	0,81	0,00001
BEb	-0,71	0,0007	0,68	0,00009
BEECF	-0,69	0,001		
O ₂ sat	0,77	0,0001		

FC = Fréquence cardiaque



par minutes : bpm) des jours témoins ($136,4 \pm 3,9$ bpm) et tests ($133,8 \pm 4,5$ bpm) étaient similaires ($p = 0,51$). Les jours témoins et tests, les fréquences cardiaques étaient plus élevées ($p < 0,001$) juste avant de monter la cage (témoins : $148,0 \pm 2,1$; tests : $141,8 \pm 2,7$ bpm) et après la sortie de la cuve (témoins : $151,0 \pm 2,8$ bpm) ou après la récupération d'une activité cardiaque normale (tests : $143,0 \pm 6,4$ bpm), que dans la loge d'attente (témoins : $120,0 \pm 2,9$; tests : $116,5 \pm 2,1$ bpm) et dans la loge de récupération (témoins : $126,5 \pm 2,4$; tests : $133,6 \pm 3,1$ bpm).

À la sortie de la cuve la fréquence cardiaque montrait une forte augmentation ($175,9 \pm 3,2$ bpm). La latence de rétablissement de l'activité cardiaque normale à partir de la sortie de la cuve était de $448,6 \pm 54,4$; $175,7 \pm 51,1$ et $338,8 \pm 12,0$ s, pour les mélanges 80 % CO₂/air, 40 % CO₂/30 % O₂ et 70 % N₂O/30 % CO₂, respectivement, c'est-à-dire significativement plus court pour le deuxième mélange ($p < 0,01$).

La vitesse de rétablissement de l'activité cardiaque normale était négativement corrélée avec le pH du sang ($r = -0,48$; $p = 0,06$). Après

rétablissement de l'activité cardiaque normale, sa fréquence ('période restante') était corrélée ($r = -0,51$; $p < 0,05$) avec le pCO₂ mesurée à la sortie de la cuve (figure 5).

Les fréquences cardiaques observées pendant le test étaient parfois corrélées avec celles observées pendant la séance témoin (dans la case d'attente : $r = 0,39$; $p < 0,05$; avant la montée : $r = 0,67$; $p < 0,0001$).

Physiologie et comportement

Le délai de rétablissement de l'activité cardiaque normale était négativement corrélé avec la durée de la posture debout ($r = -0,47$; $p < 0,05$), et assise avec les pattes avant pliées et la tête droite ($r = -0,48$; $p < 0,05$) et ces deux variables explicatives étaient significatives dans une régression multiple ($p < 0,001$) expliquant 61 % de la variabilité (r^2 ajusté). La durée de la station debout tendait à être corrélée avec la fréquence cardiaque dans la case d'attente ($r = 0,35$; $p = 0,07$). La durée de la position couché sur le sternum était corrélée avec la fréquence cardiaque dans la loge de récupération ($r = 0,43$; $p < 0,05$).

DISCUSSION

Le mélange de 80 % de CO₂ dans de l'air était choisi pour sa capacité d'induire une hypercapnie hypoxique (pCO₂ élevée et pO₂ basse), celui de 40 % de CO₂ + 30 % de O₂ d'induire une hypercapnie hyperoxique (pCO₂ et pO₂ élevées). L'ajout d'O₂ au CO₂ réduit les signes comportementaux de

La pression partielle est la pression exercée par les molécules d'un gaz donné dans un mélange de gaz. Pour l'air libre, au niveau de la mer, on a 21 % d'O₂ et pO₂ = 158,8 mmHg, 0,03 % de CO₂ et pCO₂ = 0,23 mmHg, 78,97 % de N₂ et pN₂ = 601 mmHg. À l'équilibre, à température constante, la pression partielle d'un gaz est équivalente dans l'air ou dans l'eau. La quantité de gaz qui se dissout dans un liquide est directement proportionnelle à la pression partielle du gaz et de son coefficient de solubilité (Loi de Henry). Si la température augmente, la quantité de gaz dissout diminue. Le CO₂ est 23 fois plus soluble que l'oxygène.

détresse chez le rat et la dinde (20). L'ajout de N₂O dans deux autres mélanges se justifie par sa capacité d'induire une narcose, dite par gaz inerte (21). Le mélange N₂O/O₂ est utilisé pour maintenir une anesthésie en chirurgie infantile et vétérinaire (22). Après le constat que ce mélange n'induisait pas ou pas suffisamment rapidement une perte de conscience chez le porc, le mélange N₂O/CO₂ était testé afin de combiner la capacité d'induction de perte de conscience du CO₂ avec les effets narcotiques du N₂O.

L'immersion dans les différents mélanges de gaz contenant du CO₂ a provoqué de fortes réactions comportementales et physiologiques. Aucun porc n'a maintenu la station debout, et la majorité a fait des bonds d'une forte intensité avant de perdre la posture. Les effets des différents mélanges sur le comportement des porcs étaient encore perceptibles 30 minutes après la fin de leur immersion. La fréquence cardiaque était difficilement enregistrable pendant l'immersion, mais les enregistrements obtenus après cette étape indiquent

La saturation en O₂ dépend de la pression partielle en O₂, du pH, de la température, du CO₂, et du 2,3 diphosphoglycérate (2-3 DPG), enzyme issue du métabolisme du glucose se fixant sur Hb en compétition avec O₂. Ce dérivé organique phosphorylé synthétisé lors d'anémies chroniques, aide l'organisme à s'adapter à la baisse de l'Hb, en diminuant le transport d'O₂ et en facilitant le relargage de l'O₂ dans les tissus. Les besoins en O₂ des tissus seront ainsi malgré l'anémie couverts.

une accélération sensible du rythme cardiaque. Chez le porc au repos, la pO₂ du sang veineux est comprise entre 35 et 45 mmHg, la pCO₂ entre 40 et 50 (23; 24; 25; 26; 27; 28). Seule la pO₂ mesurée chez des porcs immergés dans le mélange 40 % CO₂/30 % O₂ était beaucoup plus élevée que ses valeurs normales résultant en une saturation en O₂ (O₂sat) relativement élevée, comparativement aux valeurs habituelles (entre 53 et 74 %; 27; 28; 26). Après un exercice les pCO₂ et pO₂ augmentent jusqu'à 64 et 52 mmHg, respectivement (27; 28; 26; 25). Les pCO₂ observées suite à l'immersion dans les gaz n'étaient donc pas beaucoup plus élevées que celles observées après un effort. Les valeurs calculées (HCO₃⁻, TCO₂, BEb et BE-EBF) étaient toutes situées dans les plages des valeurs habituellement observées chez le porc (27; 28; 26; 25).

La diffusion d'un gaz se fait d'une pression partielle élevée vers une pression partielle faible. Chez un animal exposé à l'air libre, le sang qui arrive au niveau des poumons est relativement pauvre en O₂, et riche en CO₂. Le CO₂ est donc expiré et l'O₂ entre dans le sang et se fixe sur les groupements Fe (hème) de l'hémoglobine des globules rouges, formant de l'oxyhémoglobine. Le transport du CO₂ dans le sang se fait de différentes manières : 7 % du CO₂ est dissout dans le plasma, 23 % se lie au groupement amine de hémoglobine et 70 % est sous forme d'ion HCO₃⁻ dans le sang (H₂O + CO₂ → H₂CO₃ → H⁺ + HCO₃⁻).

Le CO₂ est expulsé par les poumons à mesure qu'il est formé suite à l'activité métabolique. La régulation du stock en CO₂ se fait par le biais de la pCO₂. Quelles que soient les variations métaboliques, une pCO₂ constante signifie que l'élimination pulmonaire du CO₂ est constamment adaptée à la production tissulaire. Des chémorécepteurs centraux très sensibles ajustent la ventilation pour normaliser la pCO₂ de façon fine.

Outre les poumons, les reins jouent un rôle important dans la régulation acido-basique. Ils éliminent les H⁺, principalement sous forme de NH₄⁺. La concentration plasmatique de bicarbonate ([HCO₃⁻] = 24-26 mmol/L chez l'homme) est maintenue constante grâce aux reins. Le rein absorbe normalement la totalité du

bicarbonate filtré mais le restitue si sa concentration ne dépasse pas 28 mmol/l. Au-dessus de cette valeur, le HCO₃⁻ est éliminé dans les urines. Ce mécanisme permet le maintien du pouvoir tampon du sang par le HCO₃⁻ et évite une élévation de la concentration trop importante (alcalose, voir ci-dessous). La sécrétion des H⁺ et la réabsorption des HCO₃⁻ sont stimulées, entre autre, par l'hypercapnie.

Le système H⁺ + HCO₃⁻/H₂CO₃ est une des clés de la régulation acido-basique. L'acide carbonique est un acide faible et se dissocie dans les solutions neutres ou acides. Les ions HCO₃⁻, eux, réagissent comme des bases faibles, captant les ions H⁺: H⁺ + HCO₃⁻ → H₂CO₃ → H₂O + CO₂. Ainsi, le proton est capté par l'ion HCO₃⁻, formant de l'acide carbonique. Celui-ci étant un acide faible, il n'abaisse alors que très légèrement le pH de la solution. Ce système tampon fonctionne dans les deux sens. Lors de l'adjonction d'une base forte

Une acidose métabolique (un pH de moins de 7,37 et un taux de moins de 22 mmol/L de HCO₃⁻ chez l'homme) est une situation physiologique fréquente, car d'une part, un simple exercice musculaire peut libérer de façon aiguë d'importantes quantités d'acide lactique et d'autre part, le métabolisme aboutit habituellement à une surcharge acide. La régulation se fait normalement en trois temps : mise en jeu immédiate des tampons, adaptation respiratoire en 2 à 3 min, et, dans le cas d'une surcharge durable d'acides due à l'alimentation, régulation rénale en quelques heures à quelques jours. Une alcalose métabolique (un pH de plus de 7,43 et un taux de plus de 26 mmol/L de HCO₃⁻ chez l'homme) arrive en pathologie mais est exceptionnelle en physiologie, compte tenu de la facilité et de la rapidité de l'élimination des HCO₃⁻ par le rein. Une acidose respiratoire (un pH de moins de 7,37 et pCO₂ au dessus de 43 mmHg chez l'homme) est également exceptionnelle en physiologie normale et se résout immédiatement par une adaptation respiratoire. Enfin, une alcalose respiratoire (un pH au-dessus de 7,73 et une pCO₂ de moins de 37 mmHg chez l'homme) est, chez l'homme, en général due à une hyperventilation. Dû au dérèglement de la respiration, la solution ne peut être respiratoire par définition. Dans des cas chroniques, la stabilisation peut se faire par une adaptation rénale à plus long terme.

(par exemple due à l'alimentation), celle-ci est remplacée par une base faible (HCO_3^-) augmentant peu le pH. L'ensemble des ions HCO_3^- disponibles dans l'organisme s'appelle la réserve alcaline.

L'hémoglobine a également un effet tampon. En se chargeant en O_2 , l'hémoglobine libère des H^+ qui se recombinaient avec des bicarbonates en provenance du plasma et reforment de l'acide carbonique qui est éliminé sous forme de CO_2 . Une augmentation de la concentration sanguine en ions H^+ , provoque une diminution de l'affinité de l' O_2 pour l'Hb, une baisse a l'effet inverse. Ainsi, la libération d' O_2 par l'Hb vers les tissus ($\text{HbO}_2 \rightarrow \text{Hb} + \text{O}_2$) donne une désoxy-Hb (Hb) qui peut alors capter les ions H^+ . D'autres systèmes de tampons chimiques sont en place, tels le système phosphate monosodique/phosphate disodique et le système protéinate/protéines, et fonctionnent sur le même principe que les HCO_3^- . La compétition entre l' O_2 et les ions H^+ pour se fixer à l'Hb explique le pH inférieur des porcs immergés dans le mélange CO_2/O_2 à celui des porcs immergés dans les autres mélanges. Plus la pO_2 était élevée, plus le pH était bas.

Ce phénomène peut également expliquer la corrélation entre la pO_2 et pCO_2 , principalement liée au groupe soumis au mélange 40 % $\text{CO}_2/30$ % O_2 qui présentait le plus de variations dans les valeurs. La relation négative peut s'expliquer par l'effet Haldane, qui est le phénomène par lequel la liaison de l'hémoglobine avec l' O_2 entraîne une diminution de la quantité de CO_2 présente dans le sang. Ce phénomène s'opère par deux mécanismes. Dans un milieu plus acide l'hémoglobine lie moins le CO_2 et la présence de plus de H^+ favorise la formation de CO_2 et H_2O à partir de H^+ et HCO_3^- . Une autre explication est une plus forte production de CO_2 suite à la présence de plus d' O_2 et une plus forte activité métabolique. Les porcs dans le mélange CO_2/O_2 ont probablement fait plus d'effort car ils étaient plus souvent debout.

Le pH du sang veineux est maintenu à des valeurs comprises entre 7,30 et 7,40 chez le porc au repos (27; 28; 26). Suite à des manipulations, le pH baisse parfois, dû à la production de lactate et de CO_2 (production de

$\text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$) entre autre (28; 26). Si le pH s'éloigne des valeurs normales, on parle d'acidose (pH trop bas) ou d'alcalose (pH trop élevé). Ces fluctuations sont en principe transitoires, grâce aux systèmes de régulation. Des valeurs de pH artériel en dessous de 6,9 ou au-dessus de 7,9 sont considérées comme incompatibles avec la survie (29). Hamilton et al. (26) ont cependant observé des pH veineux bas (7,02) suite à des manipulations intenses (course forcée par des stimulations électriques) qui n'étaient pas accompagnés de perte de la station debout.

Forslid et Augustinsson (30) ont trouvé après immersion de porcs pendant 1 min dans 80 % de CO_2 dans de l'air, en moyenne un pH de 7,1 et une pCO_2 de 128 mmHg dans le sang veineux. Les changements artériels étaient beaucoup plus drastiques: un pH de 6,6 et une pCO_2 de 375 mmHg. La pO_2 était de 30 mmHg pour les deux types de sang. Le pH sanguin entre 7,20 et 7,28 après l'immersion dans les différents mélanges de la présente étude était donc bas, quoiqu'un peu moins que dans l'étude de Forslid et Augustinsson (30). Dans notre étude, entre le moment de la sortie de l'animal de la cuve à gaz et la fin de la prise de sang s'écoulaient 3 min. Avec une ventilation à l'air libre, la normalisation de la pCO_2 dure environ 1 min (basé sur des mesures artérielles), celle du pH dure plus longtemps (plus de 10 min; (30)). La respiration des porcs se trouvant à l'air libre pendant la prise de sang a donc commencé à normaliser les variables sanguines de manière à ce que les valeurs obtenues sous-estiment l'effet des gaz. Toutefois, globalement, les corrélations entre les variables physiologiques sont bonnes, indiquant que les valeurs des pressions partielles reflètent correctement les variations entre les animaux, et donc entre les effets des différents mélanges gazeux.

L'augmentation de la fréquence cardiaque après les déplacements de la cage, observée pendant les séances témoins et tests est normale, elle reflète l'effort physique du porc et certainement un peu de stress émotionnel. Notre étude montre une augmentation de la fréquence cardiaque après immersion pour les trois mélanges anesthésiants, mais pas pour le mélange $\text{N}_2\text{O}/\text{O}_2$. Les effets de changements de pCO_2 et pO_2 sanguins sur la fréquence cardiaque

Des informations sur l'Homme sont disponibles grâce aux expériences d'intoxication au gaz pendant la plongée. Dans ces conditions, les modifications sont lentes, le problème d'apport d'air s'accroissant progressivement. Les symptômes de l'hypercapnie sont décrits comme un essoufflement, une hyperventilation, maux de tête et à des degrés plus élevés, un essoufflement incontrôlable, apnée volontaire impossible, maux de tête, sueurs, bourdonnements, vertiges et vomissement, stupeur, ébriété et perte de connaissance. Ceux de l'hyperoxie sont l'anxiété, une accélération du rythme cardiaque, des perturbations respiratoires convulsives, des hallucinations, perte de connaissance et arrêt cardiaque. L'hypoxie provoque une accélération du rythme cardiaque, des hallucinations, une perte de connaissance, un collapsus (diminution rapide des forces, sans syncope), puis un arrêt respiratoire et cardiaque. Les effets du N_2O sont décrits comme similaires à l'intoxication au N_2 (Fowler et al., 1989), dont les symptômes sont diminution de l'attention, dialogue intérieur, euphorie ou angoisse, ébriété, hilarité, relâchement de l'attention, impression de flottement, perte de sensibilité des jambes ou même de tout le corps, "mouches" ou "voile noir" devant les yeux, bourdonnements d'oreilles et perte de conscience.

varient selon les études à cause de l'interdépendance des deux variables, et leurs effets interactifs et complexes sur le système cardio-vasculaire (31; 32). En général, l'hypercapnie normoxique, l'hypercapnie hypoxique et l'hyperoxie provoquent des accélérations cardiaques (31). Par exemple, la respiration de 6 % de CO_2 pendant 5 à 10 min provoque une augmentation de 20 % chez l'homme (33). Chez des enfants, l'inhalation de 5 % de CO_2 dans 95 % de O_2 provoque une accélération cardiaque et l'inhalation de 100 % O_2 provoque une augmentation de la fréquence cardiaque transitoire (34). À l'inverse, l'hypoxie seule provoque un ralentissement de l'activité cardiaque (35).

Les différents mélanges ne provoquaient pas les mêmes réactions comportementales. Le CO_2 et le $\text{N}_2\text{O}/\text{CO}_2$ provoquaient une perte de posture après 8 et 10 secondes, respectivement. La présence de N_2O n'a pas empêché l'excitation comportementale, en accord avec les résultats de Troeger et Woltersdorf (13) qui ont testé l'ajout au CO_2 de 20 à 50 % de N_2O . La latence de perte de posture

plus longue (48 s) dans le mélange contenant du O₂ peut partiellement s'expliquer par les taux élevés d'O₂ dans le sang des porcs, fournissant de l'énergie plus longtemps, malgré un pH bas. Les contorsions et les signes de détresse respiratoire plus fréquents chez ces porcs peuvent également indiquer une perte de conscience plus lente ou incomplète. Le fait de lever la tête avant de perdre la posture debout chez ces porcs peut être un signe d'inquiétude ou de recherche d'air. Le N₂O ne provoque pas de perte de posture (ni de conscience) seul, mais son mélange avec seulement 30 % de CO₂ est aussi efficace que 80 % de CO₂ en termes de perte de posture. L'augmentation des cris avec le mélange N₂O/CO₂ est difficile à interpréter à ce stade. Basée sur les signes comportementaux, la vitesse du réveil des porcs était plus rapide pour les porcs immergés dans le N₂O/CO₂, probablement parce que le N₂O a un effet direct sur l'état de conscience et que le gaz est éliminé du corps dès la ventilation à l'air libre. Les porcs immergés dans le mélange CO₂/O₂ pourraient être moins enclins à faire des chutes dans les minutes qui suivent le réveil. Malgré la plus longue exposition au mélange CO₂/O₂, les porcs avaient un réveil aussi rapide qu'après immersion dans le CO₂ et une récupération cardiaque plus rapide, suggérant également une moindre inconscience induite par ce mélange.

On a également constaté des différences de réactivité aux mélanges entre les porcs. Le niveau d'excitation avant l'immersion influence la vitesse de la perte de la posture debout, comme l'indique la corrélation avec la fréquence cardiaque avant le test. Les porcs plus résistants au gaz en termes de perte de posture rétablissaient plus rapidement leur activité cardiaque après la sortie de la cuve. Les corrélations entre le pO₂, le pCO₂ et la fréquence cardiaque après l'immersion ne s'expliquent pas par un effet direct des pressions partielles sur la fréquence cardiaque, car des

corrélations existent aussi avec la fréquence cardiaque enregistrée la veille pendant la séance témoin. Elles s'expliquent donc probablement par une plus forte réactivité de certains porcs qui a pu engendrer des réactions physiques ou respiratoires différentes. Plusieurs chercheurs ont constaté chez le porc une grande variabilité dans la réactivité à l'exposition au CO₂, que l'on a attribuée à des différences génétiques liées à la race (9; 36; 37). Dans la présente étude, les porcs étaient d'origine génétique similaire, pour lesquels des différences de réactivité aux stress ont également été rapportées (38).

Les réactions comportementales peuvent suggérer une détresse chez les porcs pendant la phase d'induction. À l'heure actuelle, les données existantes ne permettent pas de conclure si les porcs perdent conscience avant ou après l'excitation comportementale (8). Hoenderken et al., (7) et Forslid (4), tous deux utilisant des mesures d'électroencéphalogramme, ne sont pas arrivés à la même conclusion. Pour le premier, la phase d'excitation comportementale avait lieu avant, pour le deuxième après la perte de conscience. Grandin (36), faisant des observations visuelles constatait que des porcs de type Hampshire entraient calmement dans la nacelle contenant du CO₂ jusqu'au premier contact avec le gaz qui les faisait sursauter, et ce, avant la perte de conscience. En utilisant des tests de choix, Raj et Gregory (10) ont montré que des porcs privés de nourriture depuis 24 h refusent d'entrer dans une pièce contenant 90 % de CO₂ pour une récompense alimentaire. Afin d'étudier le degré d'aversion induite par le CO₂, Jongman et al. (39) a utilisé des techniques d'aversion apprises. Ces chercheurs montraient que le passage dans une cuve contenant 90 % (perte de conscience) ou 60 % (pas de perte de conscience) de CO₂ provoquait moins d'aversion qu'une décharge avec une pile électrique. Il convient de noter que l'on considère le stress provoqué par une pile électrique d'un niveau très élevé. En conditions industrielles, il semble

que l'étourdissement avec des concentrations élevées en CO₂ (85 à 90 %) diminue les signes de détresse des porcs (Terlouw, observations personnelles). D'autres gaz tel que l'argon pourraient réduire la souffrance des animaux. Lors de l'inhalation d'un mélange constitué de 90 % d'argon ou de 30 % de CO₂ et 60 % d'argon, moins de porcs expriment des comportements aversifs ainsi que des signes de détresse respiratoire que lors de l'inhalation de forte concentration de CO₂ (10; 14). D'autres études sont nécessaires afin de déterminer avec exactitude la chronologie de la perte de conscience et de l'excitation comportementale, ainsi que le degré d'aversion provoqué par la présence de différents mélanges de gaz.

CONCLUSION

L'inhalation de trois des quatre mélanges testés a induit une perte de conscience comme le montre la perte de posture. Le mélange de 70 % de N₂O avec 30 % de O₂ n'induit pas de perte de conscience. Les trois mélanges anesthésiants provoquent des signes comportementaux de détresse, dont le CO₂/O₂ semble moins efficace en terme d'induction d'inconscience, suite à trois constats. La perte de posture se fait plus tardivement. Malgré la plus longue exposition au mélange CO₂/O₂ la durée du réveil des porcs était similaire à celle des porcs immergés dans du CO₂. Enfin, le mélange CO₂/O₂ provoque plus de signes de détresse (détresse respiratoire, contorsion), que les deux autres mélanges.

Afin d'évaluer la question de souffrance animale due à l'inhalation de gaz, d'autres informations sont nécessaires. Des données d'électroencéphalogramme permettraient de déterminer l'état de conscience des porcs pendant les différentes phases comportementales. Des études comportementales adaptées (tests de choix, de préférence, apprentissage) permettraient d'évaluer le degré d'aversion causée par l'inhalation de gaz.

B I B L I O G R A P H I E

1. **CHRISTENSEN L. 1999.** A new system for considerate treatment of pigs during division and groupwise CO₂ stunning. *International Colloquium "Stunning systems for pigs and Animal Welfare, 25-27/08.*
2. **HARTUNG J., NOWAK B., WALDMAN, K.H., ELLERBROCK, S. 2002.** CO₂ stunning of slaughter pigs: Effects on EEG, catecholamines and clinical reflexes, *Dtsch Tierztl Wochenschr* 109: 135-139.
3. **EISELE J.H., EGER E.I., MUALLEM M. 1967.** Narcotic Properties of Carbon Dioxide in the Dog. *Anaesthesiol* 28, 856-865.
4. **FORSLID A. 1987.** Transient neocortical, hippocampal and amygdaloid EEG silence induced by one minute inhalation of high concentration CO₂ in swine. *Acta Physiol. Scand.* 130, 1-10.
5. **MARTOFT L., STØDKILDE-JØRGENSEN H., FORSLID A., PEDERSEN H.D., JØRGENSEN P.F. 2003.** CO₂ induced acute respiratory acidosis and brain tissue intracellular pH: a 31P NMR study in swine. *Laboratory Animals*, 37, 241-248.
6. **WOODBURY D.M., KARLER R. 1960.** The role of carbon dioxide in the nervous system. *Journal of American Society of Anaesthesiologists*, 21: 686-703
7. **HOENDERKEN, R., VAN LOGTESTIJN, J.G., SYBESMA, W., SPANJAARD, W.J.M. 1979.** Carbon dioxide stunning of pigs. *Fleischwirtsch* 59, 1572-1578.
8. **MARTOFT L., LOMHOLT L., KOLTHOFF C., RODRIGUEZ B.E., JENSEN E.W., JORGENSEN P.F., PEDERSEN H.D., FORSLID A. 2002.** Effects of CO₂ anaesthesia on central nervous system activity in swine. *Lab Anim.* 36:115-126
9. **DODMAN N.H. 1977.** Observations on the use of the Wernberg dip-lift carbon dioxide apparatus for pre-slaughter anesthesia pigs. *British Veterinary Journal*, 133: 71-80
10. **RAJ A.B.M., GREGORY N.G. 1995.** Welfare implications of the gas stunning of pigs 1. Determination of aversion to the initial inhalation of carbon dioxide or argon. *Animal Welfare*, 4, 273-280
11. **RAJ A.B.M., GREGORY N.G. 1996.** Welfare implications of the gas stunning of pigs 2. Stress induction of anaesthesia. *Animal Welfare*, 5: 71-78
12. **HOLST S., 2002.** Behaviour in pigs immersed into atmospheric air or different CO₂ concentrations. *Danish Meat Research Institute. Internal report Ref. no. 02.709 7295. Données non publiées.*
13. **TROEGER K. W. WOLTERS DORF. 1991.** Die gasanasthesie von schlachtschweinen. *Betaubung* 71: 137-153.
14. **RAJ A.B. 1999.** Behaviour of pigs exposed to mixtures of gases and the time required to stun and kill them: welfare implications. *Vet. Rec.*, 144, 165-168.
15. **GREGORY N.G., MOHAN RAJ A.B., AUDSLEY A.R.S, DALY C.C. 1990.** Effect of CO₂ on man. *Fleischwirtsch.*, 70, 1173-1174.
16. **LAMBOOY E. 1990.** The use of CO₂ for the stunning of slaughter pigs. Report of a meeting of experts held in Heeze from the 26-27th January 1990. *Fleischwirtsch.* 70 (10).
17. **RAJ A.B.M., JOHNSON S.P., WOTTON S.B., MCINSTRY J.L. 1997.** Welfare implications of gas stunning pigs: 3. the time to loss of somatosensory evoked potential and spontaneous electrocorticogram of pigs during exposure to gases. *The Vet. J.*, 153, 329-339.
18. **VELARDE A., GISPERT, M., FAUCITANO, L., MANTECA, X., DIESTRE, A. 2000.** Survey of the effectiveness of stunning procedures used in Spanish pig abattoirs. 146: 65-68.
19. **TERLOUW C., ASTRUC T., DEISS V., FERREIRA C., ESPINOSA L. 2006.** Anesthésie gazeuse des porcs II. Qualités des viandes de porcs étourdis avec différents mélanges gazeux. *Soumis à VPC.*
20. **COENEN A.M, DRINKENBURG W.H, HOENDERKEN R, VAN LUIJTELAAR E.L. 1995.** Carbon dioxide euthanasia in rats: oxygen supplementation minimizes signs of agitation and asphyxia. *Lab Anim.*, 29, 262-268.
21. **FOWLER B., MITCHELL I., BHATIA M., PORLIER G. 1989.** Narcosis has additive rather than interactive effects on discrimination reaction time. *Hum. Factors* 31: 571-278.
22. **BURNWEIT C., DIANA-ZERPA J.A., NAHMAD M.H., LANKAU C.A., WEINBERGER M., MALVEZZI L., SMITH L., SHAPIRO T., THAYER K. 2004.** Nitrous oxide analgesia for minor pediatric surgical procedures: an effective alternative to conscious sedation? *J. Pediatr. Surgery*, 39, 495-499.
23. **PATIENCE J.F., CHAPLIN R.K. 1997.** The relationship among dietary undetermined anion, acid-base balance, and nutrient metabolism in swine. *J. Anim. Sci.* 75: 2445-2452.
24. **DERSJANT-LI Y., VERSTEGEN M.W., JANSMAN A., SCHULZE H., SCHRAMA J.W., VERRETH J.A.. 2002.** Changes in oxygen content and acid-base balance in arterial and portal blood in response to the dietary electrolyte balance in pigs during a 9-h period after a meal. *J. Anim Sci*, 80, 1233-1239.
25. **DEROUCHEY J.M., HANCOCK J.D., HINES R.H., CUMMINGS K.R., LEE D.J., MALONEY C.A., DEAN D.W., PARK J.S., CAO H. 2003.** Effects of dietary electrolyte balance on the chemistry of blood and urine in lactating sows and sow litter performance. *J. Anim Sci.*, 81, 3067-3074.
26. **HAMILTON D.N., ELLIS M., BERTOL T.M., MILLER K.D. 2004.** Effects of handling intensity and live weight on blood acid-base status in finishing pigs. *J. Anim Sci.*, 82, 2405-2409.
27. **BERTOL T.M., ELLIS M., HAMILTON D.N., JOHNSON E.W., RITTER M.J. 2005a.** Effects of dietary supplementation with L-carnitine and fat on blood acid-base responses to handling in slaughter weight pigs. *J. Anim Sci.*, 83, 75-81.
28. **BERTOL T.M., ELLIS M., RITTE M.J., MCKEITH F.K. 2005b.** Effect of feed withdrawal and handling intensity on longissimus muscle glycolytic potential and blood measurements in slaughter weight pigs. *J. Anim Sci.*, 83, 1536-1542.
29. **SELDIN D.W., GIEBISCH G.. 1989.** The regulation of Acid-Base Balance. *Raven Press, New York, NY.*
30. **FORSLID A, AUGUSTINSSON O. 1988.** Acidosis, hypoxia and stress hormone release in response to one-minute inhalation of 80 % CO₂ in swine *Acta Physiol Scand.* Feb; 132 (2): 223-31.
31. **MAGOSSO E, URSINO M. 2001.** A mathematical model of CO₂ effect on cardiovascular regulation. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.*, 281, H2036-H2052.
32. **SHOEMAKER, J.K., A. VOVK, D.A. CUNNINGHAM. 2002.** Peripheral chemoreceptor contributions to sympathetic and cardiovascular responses during hypercapnia. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology* 80, 1136-1144.
33. **RICHARDSON D.W., WASSERMAN A.J., PATTERSON J.L. 1961.** General and regional circulatory responses to change in blood pH and carbon dioxide tension. *J. Clin. Invest.*, 40, 31-43.
34. **MACEY P.M., VALDERAMA C., KIM A.H., WOO M.A., GOZAL D., KEENS T.G., HARPER R.K., HARPER R.M. 2004.** Temporal trends of cardiac and respiratory responses to ventilatory challenges in congenital central hypoventilation syndrome. *Pediatr. Res.*, 55, 953-959.
35. **NISHIMURA M., MIYAMOTO K., SUZUKI A., YAMAMOTO H., TSUJI M., KISHI F., KAWAKAMI Y. 1989.** Ventilatory and heart rate responses to hypoxia and hypercapnia in patients with diabetes mellitus. *Thorax*, 44, 251-257.
- 36; **GRANDIN, T. 1988.** Possible genetic effect on pig's reaction to CO₂ stunning. *Proceedings International Congress of Meat Science and Technology, Brisbane, Australia* 34: 96-97.
37. **GRANDIN T. 1994.** Euthanasia and slaughter of livestock. *J. Am. Vet. Med. Assoc.*, 204, 1354-1360.
38. **TERLOUW C. 2002.** Stress des animaux et qualités de leurs viandes. Rôles du patrimoine génétique et de l'expérience antérieure. *INRA Prod. Anim.*, 15, 125-133.
39. **JONGMAN E.C., BARNETT J.L., HEMSWORTH P.H. 2000.** The aversiveness of carbon dioxide stunning in pigs and a comparison of CO₂ rate vs. the V restrainer. *Applied Animal Behavior Science*, 67, 67-76.