

MESURAGE DES CONCENTRATIONS EN DIOXYDE DE CARBONE EN BATIMENT DE POULETS DE CHAIR

Créach Pauline¹, Robin Paul², Keita Alassane³, Nicolas Christian⁴, Amand Gérard¹, Pigache Elodie¹, Prigent Jean-Philippe⁵, Le Comte Marcel², Tavares Manuel³, Galliot Pascal¹, Rousset Nathalie¹.

¹ ITAVI – 41 rue de Beaucemaine – 22440 PLOUFRAGAN ; ² INRA UMR SAS – rue de Saint Briec- RENNES ; ³ ANSES SELEAC – 41, rue de beaucemaine, 22440 PLOUFRAGAN ; ⁴ Chambre d'agriculture de Bretagne, Carhaix ; ⁵ Avipôle Formation, 22440 PLOUFRAGAN

creach@itavi.asso.fr

RÉSUMÉ

La directive européenne 2007/43/CE établissant des normes pour la protection des poulets de chair, fixe une limite de 3000 ppm de concentration en dioxyde de carbone (CO₂) à ne pas dépasser au niveau animal, sur toute la durée du lot. Depuis, les capteurs de concentration de CO₂ se développent dans les bâtiments avicoles français. Le but de cet article est de fournir des conseils méthodologiques pour la mesure continue des concentrations de CO₂ en bâtiment de poulets de chair, au regard des spécifications techniques des capteurs commerciaux de CO₂ et de leur position optimale dans un poulailler. Divers capteurs de CO₂ ont été comparés en bâtiment commercial. L'analyse de la précision et du temps de réponse de chaque capteur a montré que deux capteurs sur cinq n'étaient pas appropriés pour une utilisation en poulailler. Des essais en conditions expérimentales montrent que la position du capteur de CO₂ à 80 cm +/- 20 cm de hauteur, entre les lignes de pipettes et de mangeoires, semble être le meilleur compromis pour mesurer, non seulement une concentration de CO₂ représentative de ce que respire l'animal mais aussi de la concentration globale du bâtiment. Cependant d'après les mesures réalisées en bâtiments commerciaux en fin de lot, cette hauteur peut sous-estimer les concentrations de CO₂ au niveau de l'animal, en cas de forte production de CO₂ par les animaux et la litière. Dans les bâtiments commerciaux étudiés, l'hétérogénéité horizontale du CO₂ était plus élevée au début du lot qu'à la fin. Ces résultats suggèrent d'utiliser plus d'un capteur de concentration en CO₂ pour des mesures en continu en poulailler afin de caractériser cette hétérogénéité. Selon les tests des capteurs, il est préférable d'investir dans un capteur performant et dans sa maintenance plutôt que dans l'achat d'un capteur supplémentaire.

ABSTRACT

Measuring carbon dioxide concentrations in broiler houses

European directive 2007/43/CE establishing standards for the protection of broilers, sets a limit of 3000 ppm of carbon dioxide (CO₂) concentration not to be exceeded at animal's level, over the entire duration of the flock. Since then, CO₂ concentration sensors are developing in French poultry buildings. The purpose of this article is to provide methodological advices for continuous measurement of CO₂ concentrations in a broiler house, by looking at CO₂ commercial sensors' technical specifications and their optimal position in barn.

Various CO₂ sensors were compared in a commercial barn. Analysis of accuracy, response time and drift in time of each sensors showed that two sensors over five were not suitable to be used for CO₂ monitoring and/or control in poultry houses. Tests in experimental conditions show that the position of the CO₂ sensor at 80 cm +/- 20 cm of height, between pipets and feeders appeared to be the best compromise to measure, not only a representative CO₂ concentration at animal's level but also of the whole house. However according to measurements done in commercial barns at the end of the flock, this height can underestimate CO₂ concentrations at animal's level in case of high CO₂ productions by animals and litter. In the observed commercial barns, the horizontal heterogeneity of CO₂ was higher at the beginning of the flock than at the end. These results suggest using more than one CO₂ sensors for continuous measurements in poultry barns to characterize this heterogeneity. According to the sensors's tests, first level investment should be in high-performance sensor and in its maintenance than purchasing an additional sensor.

INTRODUCTION

En bâtiment avicole, le dioxyde de carbone (CO₂) est produit par la respiration des animaux, la dégradation aérobie des matières de la litière par les microorganismes et la combustion de matériaux carbonés, d'énergie fossile et de matières organiques (Hassouna et al., 2015). Les dispositifs de chauffage à combustion directe (combustion du gaz propane avec rejet des gaz à l'intérieur du bâtiment) constituent une source importante de production de CO₂ dans l'ambiance des bâtiments. **Le dioxyde de carbone est une molécule naturellement présente dans l'atmosphère.** La concentration dans l'air extérieur environne les 400 ppm (INRS, 2005). Le gaz carbonique est un gaz à effet de serre, inodore, incolore et plus lourd que l'air. La concentration dans l'air intérieur des bâtiments d'élevage est un **indicateur du niveau de confinement de l'air.**

Dans les bâtiments d'élevage de poulets de chair, la présence de capteurs de CO₂ s'est développée depuis l'application de la réglementation européenne sur le bien-être des poulets de chair (directive 2007/43/CE). Cette réglementation fixe en effet un plafond à 3 000 ppm à ne pas dépasser sur toute la durée de l'élevage, à hauteur des animaux. Le CO₂ peut *in fine* avoir des effets négatifs sur la santé, le bien-être et les performances des poulets (McGovern, 2001 ; Olanrewaju et al., 2008 ; Scientific Committee on Animal Health and animal Welfare, 2000 ; Reece, 1980).

Au démarrage, des concentrations supérieures à 3 000 ppm peuvent être mesurées. En effet, dans les 10-15 premiers jours les besoins thermiques des poussins sont plus importants qu'en fin de lot et certains éleveurs ont tendance à sous-ventiler (débit de renouvellement faible) pour éviter d'évacuer la chaleur du bâtiment et limiter les coûts liés au chauffage (Robin et al., 2017). La concentration en CO₂ est d'autant plus élevée avec l'utilisation de chauffage à combustion directe.

Cet article a pour objectif (1) d'évaluer la performance de capteurs de concentration en CO₂ (2) et de conseiller sur la position du capteur en bâtiment de poulets de chair pour une mesure représentative de l'ambiance moyenne du bâtiment, à hauteur des volailles.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Comparaison de différents capteurs de concentrations en CO₂

1.1.1 Description des capteurs de concentrations en CO₂ testés (Tableau 1)

4 capteurs de concentrations en CO₂ dit « autonomes » (numérotés de C1 à C4) ont été testés ainsi qu'un capteur de concentrations en CO₂ dit « dépendant » (numéroté C5). Le capteur « autonome » est constitué d'une sonde pour mesurer les concentrations en CO₂, d'un boîtier d'acquisition avec affichage de la mesure et d'une batterie. Ce type de capteur est généralement utilisé pour des mesures ponctuelles des concentrations en CO₂ et peut aussi être utilisé pour des mesures en continu. Le capteur « dépendant » est uniquement constitué d'une sonde. Il doit être raccordé à une centrale d'acquisition ou au boîtier de régulation du bâtiment pour pouvoir accéder au résultat de la mesure. Ce type de capteur est utilisé pour des mesures en continu des concentrations en CO₂.

Les critères de choix pour l'achat des capteurs de concentration en CO₂ pour des mesures en bâtiment avicole sont :

- Une **plage de mesure** comprise entre **0 et 10 000 ppm** pour être capable de mesurer certains pics de concentration particulièrement au démarrage du lot de volailles.
 - Une **précision de 100 ppm** pour obtenir le meilleur compromis entre le besoin de précision pour caractériser la diversité des situations rencontrées en élevage **et un niveau d'exigence pas trop élevé pour limiter le coût** (<2000€ par appareil) des capteurs et leur vérification régulière.
- Les besoins en termes d'**inertie** (=temps de réponse) du capteur sont liés à l'utilisation que l'on fait de ce capteur. Pour un usage en bâtiment, une inertie qualifiée comme :
- faible (=forte réactivité du capteur) peut être considérée comme étant inférieure ou égale à 5 minutes ;
 - modérée (=réactivité moyenne du capteur) entre 5 et 10 minutes ;
 - élevée (=faible réactivité du capteur) supérieure ou égale à 10 minutes.

La technologie infrarouge non dispersif (IRND) a été ciblée pour l'achat de tous les capteurs puisqu'elle semble être le meilleur compromis entre le coût du capteur, le peu de sensibilité à la dérive dans le temps (variation du biais au cours du temps) et aux interférences avec d'autres gaz. De plus, elle ne nécessite pas de consommable autre que l'électricité.

1.1.2 Comparaison des performances de capteurs de concentration en CO₂ en élevage commercial

Les 5 capteurs ont été placés ensemble à 80 cm du sol, au centre d'un bâtiment commercial de poulets de chair, en présence des volailles et sur toute la durée du lot (46 jours en période estivale). Pour les besoins de comparaison, les concentrations en CO₂ ont été mesurées en continu. La fréquence d'acquisition des données pour les capteurs était inférieure ou égale à 3 minutes, de façon à capter les variations temporelles des concentrations en CO₂. Les concentrations en CO₂ des 5 capteurs ont été comparées à celles mesurées par un analyseur de gaz INNOVA 1412® (spectrométrie photoacoustique infrarouge ; précision de 1 %). La concentration mesurée par l'analyseur a été retenue comme référence pour la comparaison, ci-après dénommée « référence ». L'échantillonnage de la référence a été réalisé au niveau des 5 capteurs testés et la fréquence d'acquisition des données était fixée à 3 minutes.

1.1.3 Méthodes d'analyse des performances des capteurs testés

Dans la suite (pour la compréhension de la partie 2.1.2), le biais a été calculé pour déterminer la précision des capteurs. Il correspond à l'écart en ppm entre la concentration mesurée et la concentration de référence. Une précision dite « élevée » signifie que le capteur indique des valeurs proches de la référence. Le biais est faible (< 50 ppm). Au contraire, une précision dite « faible » signifie que le capteur indique des valeurs éloignées de la référence (biais > 150 ppm). Le biais est alors élevé par rapport au besoin identifié. Les analyses de la précision de mesure et le calcul des moyennes de concentrations en CO₂ ont été réalisées sur des données corrigées par l'inertie des capteurs. Cette inertie a été quantifiée en évaluant le déphasage entre un pic de concentration observé par le capteur de référence à faible inertie et la valeur maximale observée sur le capteur considéré. Le décalage temporel est exprimé en minutes.

1.2 Positionnement du capteur de concentration en CO₂ en bâtiment poulets de chair

1.2.1 Essai en conditions expérimentales

Les essais ont été menés dans 2 salles d'élevage de 270 m² de l'ANSES de Ploufragan, l'une avec et d'autre sans brassage de l'air. Ce dispositif permet de vérifier s'il est nécessaire de faire varier la hauteur du capteur de concentration en CO₂ en fonction du niveau de brassage de l'air dans la salle d'élevage. En effet, le dioxyde de carbone est plus lourd que l'air. Ainsi, la salle non brassée était un dispositif favorable à l'hétérogénéité verticale des concentrations en CO₂ et potentiellement favorable à la stratification de l'air.

Les 2 salles ont été conduites de la même manière, avec un nombre d'animaux identiques, un même niveau de renouvellement minimum et du chauffage par combustion directe. Les enregistrements de concentrations en CO₂ ont été réalisés dans les 2 salles, en présence des volailles sur toute la durée d'un lot de poulets de chair (33 jours, du 2 mars au 4 avril 2017). Les concentrations en CO₂ ont été mesurées avec un appareil de référence (partie 1.1.3) à différentes hauteurs : 15 et 80 cm pour la salle brassée et 10, 20 et 80 cm, entre les lignes de pipettes et de mangeoires. L'évolution des concentrations en CO₂ entre les différentes hauteurs et l'extraction a été examinée en début et en fin de lot.

1.2.2. Essai terrain

L'objectif est de vérifier si les résultats des essais en conditions expérimentales nécessitent des adaptations méthodologiques en fonction du type de ventilation, notamment sur le nombre de capteurs de concentration en CO₂ à installer et la position horizontale du capteur en bâtiment (généralement placé au centre de celui-ci).

Les essais ont été menés dans 3 bâtiments à ventilation longitudinale pour vérifier l'incidence d'une hétérogénéité par rapport aux essais réalisés en station expérimentale. L'hypothèse initiale est qu'un bâtiment en ventilation longitudinale présente des différences de concentrations en CO₂ entre les deux pignons (concentrations supérieures en pignon d'extraction par rapport à l'autre pignon). Les 3 bâtiments étudiés sont différents en termes d'équipements de chauffage utilisés et d'isolation (Tableau 2).

Tableau 2 : principales caractéristiques des trois bâtiments étudiés (E=élevage).

	E1	E2	E3
Niveau d'isolation global* (W/k/m²) [référence bâtiment moyen parc bâtiment français 1 W/k/m²]	0.63	0.54	1.67
Type de chauffage	Combustion indirecte (+ chauffage d'appoint aérotherme gaz combustion directe au démarrage)	Combustion indirecte**	Combustion directe***

(*) niveau de déperditions global parois, plus il est élevé plus le bâtiment présente des déperditions thermiques (=bâtiment mal isolé) ; (**) pas de production de CO₂ par le dispositif de chauffage (exemple : chauffage eau chaude, etc) ; (***) combustion du gaz propane avec rejet des gaz à l'intérieur du bâtiment.

Une première visite a été réalisée dans les 1^{ers} jours des lots de poulets de chair et une seconde visite lors de la dernière semaine de vie des animaux. Lors de chaque visite les concentrations en CO₂ ont été mesurées à 10 et 80 cm de hauteur pour différents points de mesure dans le bâtiment. Toutes les mesures de concentrations en CO₂ ont été réalisées avec l'appareil Vaisala MI70 équipé du capteur de CO₂ GMP 252. Chaque séquence de mesure comprend des mesures toutes les 5 secondes durant 2 minutes au cours desquelles l'opérateur est immobile de façon à s'abstenir de l'effet de l'activité des animaux sur la

concentration en CO₂ mesurée. Les mesures ont été répétées pour chacun des points de mesure suivant :

- au centre du bâtiment ;
- au niveau des trappes d'entrée d'air à 1 m de la paroi ;
- au niveau de l'extraction d'air à 2 m de la turbine d'extraction de l'air vicié.

Les mesures ont été réalisées entre les lignes de pipettes et de mangeoires. Au cours de la réalisation des mesures, les heures de démarrage et d'arrêt du chauffage ont été relevées, ainsi que les heures de début et de fin de période de mesure. Les températures et taux d'hygrométrie extérieurs ont été mesurés avant l'entrée dans le bâtiment d'élevage. Une notation de la qualité de la litière a aussi été réalisée lors de la seconde visite et à chaque emplacement de mesure (score de 1 [sèche et friable] à 5 [totalement croûteuse ou humide] notée 5).

Pour évaluer la variabilité spatiale (horizontale et verticale) des concentrations en CO₂ les concentrations moyennes et les écart-types associés ont été calculés pour les deux hauteurs, pour les 3 bâtiments et les 3 points de mesures en début et en fin de lot. Afin de vérifier la significativité des différences observées des tests non paramétriques ont été réalisés au seuil de significativité de 5% :

- de comparaison de moyenne (kruskal.test) pour l'étude de la variabilité horizontale des concentrations en CO₂ et
- de comparaison multiples de moyenne (kruskalmc) pour l'étude de la variabilité verticale des concentrations en CO₂.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. Comparaison de capteurs de concentration en CO₂

2.1.1 Concentrations en CO₂ mesurées durant l'essai en bâtiment d'élevage commercial (Tableau 3)

Tableau 3 résultats descriptifs sur les 46 jours du lot ; calcul avec fréquence d'acquisition de 6 minutes (REF = concentrations en CO₂ de référence, mesurées par l'analyseur de gaz INNOVA 1309®)

	REF	C1	C2	C3	C4	C5
Moyenne +/- écart-type (ppm)	1 331 +/-490	1 618 +/-691	1 850 +/-429	1 449 +/-451	1 057 +/-450	1 415 +/-467
Mini (ppm)	416	434	498	441	153	464
Maxi (ppm)	2 836	2 940	2 661	2 928	2 724	3 584
Nombre de mesures	5075	6903	125 514	37 242	133 920	26 800
Fréquence d'acquisition	3 min	3 min	30 sec	30 sec	30 sec	2 min

Au cours de l'essai, les concentrations en CO₂ n'ont pas dépassé les 3 000 ppm réglementaires pour le bien-être des poulets de chair, au regard du maximum mesuré par l'appareil de référence. La période estivale de comparaison n'était en effet pas propice à des concentrations élevées en CO₂ car les débits de renouvellement d'air sont plus importants en été avec les températures extérieures élevées qu'en période froide (Robin et al., 2017). Des valeurs aberrantes (inférieures à 300 ppm alors que la concentration de l'air extérieur est proche de 400 ppm) ont été observées pour C4. Pour le calcul des moyennes, les valeurs aberrantes n'ont pas été supprimées. Le nombre de mesures réalisées pour chacun des capteurs et pour la référence n'est pas le même car des micro-coupures de courant au niveau du bâtiment d'élevage ont engendré des arrêts d'enregistrement et la fréquence d'acquisition n'était pas identique pour tous les capteurs.

La moyenne des concentrations en CO₂ est plus élevée pour le capteur C1 et plus faible pour le C4. Les écart-types se situent dans la gamme 400-500 ppm pour tous les capteurs.

2.1.2 Précision et temps de réponse des capteurs testés (Tableau 4)

Tableau 4. précision moyenne observée (en ppm) et inertie (en minutes), sur les 46 jours de test, pour chacun des 5 capteurs testés

	C1	C2	C3	C4	C5
Précision moyenne observée (écart à la référence) +/- écart-type (ppm)	181 +/-99 [avec valeurs aberrantes]	136 +/- 63	97 +/-55	422 +/- 321 [avec valeurs aberrantes]	78 +/-82
Nombre de valeurs pour le calcul de la précision	1166	1454	1572	787	4468
Inertie (minutes)	4	3	3	10	9

Les capteurs C3 et C5 présentent des biais inférieurs à 100 ppm. Leur précision correspond au besoin de 100 ppm défini précédemment. Au contraire, les capteurs C1, C2 et C4 ont des biais supérieurs à 100 ppm. Le biais le plus élevé est observé pour le capteur C4 (422 ppm). Il est associé à une très forte variabilité. De même, le capteur C1 présente un biais élevé, deux fois supérieur au besoin de 100 ppm. Le capteur C2 se rapproche des besoins prédéfinis au regard de sa précision et de l'écart-type de 63 ppm associé.

Concernant l'inertie, les capteurs C2 et C3 présentent des inerties faibles (temps de réponse inférieur ou égal à 5 minutes). Les capteurs C4 et C5 présentent une inertie qualifiée de modérée puisqu'elles sont proches de 10 minutes. **L'utilisation du capteur C4 en bâtiment avicole n'est pas recommandée au regard de sa précision et de la présence de valeurs aberrantes. De même au regard du tableau 1 et des retours sur les essais réalisés, la forme du capteur C1 rend son utilisation difficile en bâtiment avicole. De plus, le C1 présente un écart-type supérieur aux autres capteurs.**

Les différences de précision observées entre les capteurs peuvent s'expliquer en partie par le dispositif expérimental :

- Les mesures ont été réalisées en bâtiment conventionnel où l'air est hétérogène et le brassage de l'air peut faire que les capteurs ne mesurent pas exactement le même air (même si positionnés proche les uns des autres). Des essais en situation contrôlée permettraient de garantir l'homogénéité et la stabilité des concentrations autour des capteurs.
- Des différences d'inertie des différents capteurs. En effet, les capteurs à faible inertie vont capter des bouffées d'air expirées concentré en CO₂ à un instant proche de l'instant t. Au contraire, un capteur à forte inertie ne va pas mesurer ces bouffées ponctuelles.

Au regard du tableau 1, les biais mentionnés par les fournisseurs sont plus faibles que ceux calculés dans l'étude (+137 ppm en moyenne pour les précisions calculées par rapport aux indications des fournisseurs). Ce résultat s'explique par des différences de protocoles car les données des fournisseurs ne sont pas issues d'essais réalisés en bâtiment avicole.

La réalisation des essais en période hivernale aurait peut-être permis d'avoir des résultats plus discriminants car les concentrations en CO₂ sont plus élevées en période hivernale. **Dans les conditions de test, les capteurs C2, C3 et C5 semblent être les plus performants pour une utilisation en bâtiment avicole.**

2.2. Positionnement du capteur de concentration en CO₂ en bâtiment poulets de chair

2.2.1 Étude de la variabilité verticale des concentrations en CO₂, en conditions expérimentales

En début de lot, les variations spatio-temporelles des concentrations en CO₂ mesurées aux différentes hauteurs et à l'extraction suivent la même évolution (figure 1). Aucune différence n'est observée entre la salle brassée et la salle non brassée. Ainsi **en début d'élevage, les concentrations en CO₂ mesurées à 80 cm sont représentatives de celles mesurées à 10-20 cm du sol donc de ce que respire l'animal. Elles évoluent aussi de la même manière que celles mesurées à l'extraction donc sont représentatives de l'ambiance globale du bâtiment d'élevage.** En fin de lot, les concentrations en CO₂ mesurées à 80 cm et celles mesurées à l'extraction suivent les mêmes évolutions. Ainsi, comme en début de lot, les concentrations mesurées à 80 cm sont représentatives de l'ambiance globale du bâtiment d'élevage pour les deux salles (Figure 2).

Au regard de la figure 2, les concentrations en dioxyde de carbone mesurées à 15 cm pour la salle brassée et à 10 et 20 cm pour la salle non brassée ne suivent pas la même évolution que les mesures à 80 cm et à l'extraction. Les mesures réalisées entre 10 et 20 cm dans chacune des salles sont supérieures à celles à 80 cm et à l'extraction. Ces différences s'expliquent par une dégradation de la litière en fin de lot, probablement causée par l'absence de récupérateurs de gouttes sous les pipettes. Cette fermentation de la litière a généré une production de dioxyde de carbone entre 10 et 20 cm, par rapport à 80 cm du sol.

Pour conclure, il semble donc opportun de positionner le capteur de concentrations en CO₂ à 80 cm du sol en début de lot. En revanche, en fin d'élevage une mesure à cette hauteur ne permet pas d'évaluer les fluctuations de concentrations en CO₂ provoquée par une dégradation de la litière. En fin d'élevage, l'ajout d'un capteur plus bas à hauteur des animaux en plus d'un capteur à 80 cm permettrait de considérer ces fluctuations. Cependant, il faudra veiller à ce que le capteur soit protégé pour éviter d'être endommagé par les animaux.

2.2.2 Variabilité des concentrations en CO₂, en bâtiments d'élevage commerciaux

Début du lot de volailles

Variabilité verticale (Tableau 5)

Tableau 5. concentrations en CO₂ moyennes (ppm) mesurées à 10 cm et 80 cm pour chacun des 3 endroits du bâtiment dans les 3 élevages durant la période démarrage des volailles. [E=élevage ; résultat au seuil de significativité de 5 % : P<=Significatif ; NS=Non Significatif]

Point de mesure	Elevage	10 cm	80 cm	Résultat
centre	E1	2735	2782	P<0,01
entrée	E1	2352	2740	P<0,01
extraction	E1	2217	2454	P<0,01
centre	E2	1824	1810	NS
entrée	E2	1695	1679	P<0,05
extraction	E2	1772	1757	NS
centre	E3	4172	4169	NS
entrée	E3	4694	4903	P<0,01
extraction	E3	4984	5157	P<0,01

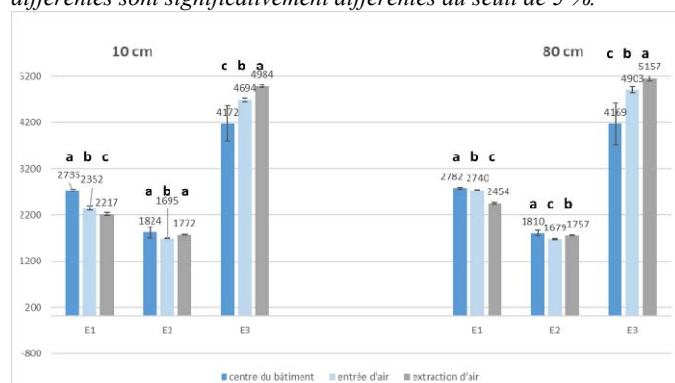
Les concentrations en CO₂ mesurées à 80 cm sont significativement supérieures à celles mesurées à 10 cm du sol pour l'élevage E1 et E3 (excepté au centre du bâtiment où les mesures à 10 et 80 cm ne sont pas significativement différentes). Ces deux éleveurs disposent de chauffage à combustion directe au démarrage du lot de volailles (potentielle stratification

thermique liée au faible renouvellement d'air en début de lot associé à une forte demande en chauffage). Au contraire pour l'élevage E2, il n'y a pas de différence significative entre les mesures à 10 et à 80 cm, au centre et à l'extraction d'air, potentiellement lié à l'usage de chauffage à combustion indirecte associé à un brassage de l'air par les aérothermes eau chaude.

En début de lot, sur l'échantillon des 3 élevages étudiés il semblerait que les concentrations à 10 cm du sol soient supérieures dans les bâtiments à chauffage combustion directe, par rapport à celles à 80 cm.

Variabilité horizontale (Figure 3)

Figure 3. concentrations en CO₂ moyennes (ppm) pour chacun des 3 élevages, mesurées à 10 cm (gauche du graphique) et 80 cm (droite du graphique), à 3 endroits du bâtiment, en période de démarrage des volailles. [E=élevage]. Les moyennes présentant des lettres (a, b ou c) différentes sont significativement différentes au seuil de 5 %.



En début de lot pour 2 des 3 élevages (E1 et E3), les concentrations en CO₂ mesurées au centre du bâtiment, à l'entrée d'air et à l'extraction sont différentes aussi bien pour les mesures à 10 qu'à 80 cm. Le même résultat est observé pour l'élevage E2 mais uniquement pour les mesures réalisées à 80 cm du sol. Pour l'élevage E2, à 10 cm du sol, les concentrations en CO₂ mesurées au centre du bâtiment et à l'extraction n'étaient pas significativement différentes (au seuil de 5%). Ces observations sont probablement à mettre sur le compte du brassage assuré par les systèmes de chauffage (aérothermes à eau chaude) et le positionnement en long pan des extracteurs en début de lot.

Pour l'élevage E1, les concentrations en CO₂ sont significativement supérieures à l'entrée d'air par rapport à l'extraction d'air pour les mesures réalisées à 10 et 80 cm du sol (+210 ppm en moyenne pour l'entrée d'air par rapport à l'extraction). Ce résultat peut s'expliquer par la distance de 1 mètre de la paroi pour la mesure à l'entrée d'air (mauvaise homogénéité de l'air à proximité de la paroi et sous la trappe d'entrée d'air), mais il est observé pour l'élevage E1 uniquement. Pour les élevages E2 et E3, les concentrations en CO₂ sont supérieures à l'extraction d'air par rapport à l'entrée d'air (+175 ppm en moyenne pour les deux élevages).

Les mesures de concentrations en CO₂ sont supérieures au centre du bâtiment par rapport à l'extraction et à l'entrée d'air pour l'éleveur E1 (+318 ppm pour les mesures réalisées au centre par rapport à celles de l'extraction et de l'entrée d'air), ceci peut être lié à l'allumage du chauffage au cours des mesures et d'un brassage d'air moins efficient. De plus, cet élevage est équipé d'un aérotherme gaz d'appoint au démarrage (chauffage à combustion directe). En revanche pour l'élevage E3, les concentrations en CO₂ sont plus basses au centre et plus élevées à l'extraction (pour les mesures à 10 et 80 cm). Dans cet

élevage, le bâtiment est équipé d'un dispositif de chauffage par combustion directe, il y a davantage d'hétérogénéité des concentrations en CO₂ entre les 3 points de mesures, par rapport aux 2 autres bâtiments (en chauffage à combustion indirecte).

Au contraire, les concentrations en CO₂ mesurées dans l'élevage E2, en chauffage combustion indirecte, étaient moins hétérogènes pour les mesures à 10 cm du sol. Ces observations sont probablement à mettre sur le compte du brassage assuré par les systèmes de chauffage (aérothermes à eau chaude) et le positionnement en long pan des extracteurs en début de lot.

Ainsi, ces mesures mettent en évidence **une hétérogénéité horizontale des concentrations en CO₂ dans les 3 bâtiments étudiés, confirmant l'hypothèse initiale. Ce résultat peut suggérer l'ajout de capteurs pour prendre en compte cette variabilité horizontale. Cependant, cette variabilité reste voisine du biais que l'on peut constater entre les capteurs et l'achat de capteur(s) supplémentaire(s) représente un coût non négligeable pour l'éleveur. Il convient donc de privilégier un investissement dans un capteur performant plutôt qu'un capteur supplémentaire.**

Fin du lot de volailles

Variabilité verticale (Tableau 6)

Tableau 6. concentrations en CO₂ moyennes (ppm) mesurées à 10 cm et 80 cm pour chacun des 3 endroits du bâtiment dans les 3 élevages à la fin du lot de volailles. [E=élevage; Résultat au seuil de significativité de 5 % : P<=Significatif; NS=Non Significatif]

Point de mesure	Elevage	10 cm	80 cm	Résultat
centre	E1	2885	2363	P<0,01
entrée	E1	2973	2693	P<0,01
extraction	E1	2703	2614	P<0,01
centre	E2	1619	1337	P<0,01
entrée	E2	1871	1574	P<0,01
extraction	E2	1356	1299	P<0,01
centre	E3	2948	3111	P<0,01
entrée	E3	2995	3192	P<0,01
extraction	E3	3050	2973	P<0,01

A la fin du lot de volailles, les concentrations en CO₂ moyenne mesurées à 10 cm et à 80 cm du sol et pour chacun des points de mesure sont significativement différentes. Pour les élevages E1 et E2, les mesures à 10 cm sont significativement supérieures par rapport à celles à 80 cm. Ceci peut s'expliquer par des litières dégradées, productrices de CO₂ et notées 4 à l'endroit des mesures dans l'élevage E1.

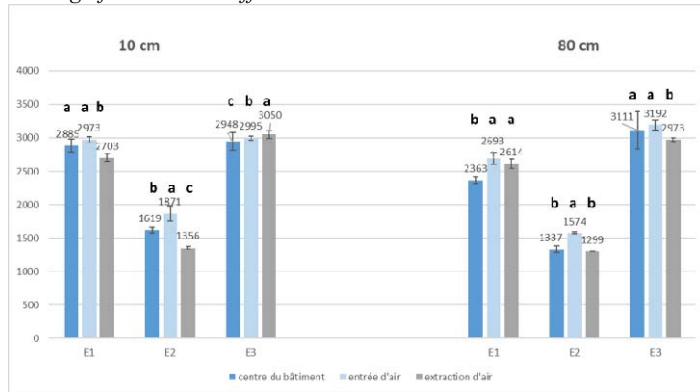
Par contre dans l'élevage E2, la litière est notée 1 (litière sèche et friable à l'endroit des mesures). Ce résultat peut s'expliquer par un potentiel gradient de CO₂ provenant de la respiration des animaux et à un brassage d'air moins efficient.

Les concentrations sont plus élevées à 10 cm du sol et sont le reflet d'une dégradation de la litière, par rapport aux mesures à 80 cm, chez un des 3 élevages. **Les résultats obtenus en station expérimentale sont confirmés dans un élevage uniquement. Ainsi, si le capteur est positionné à 80 cm du sol, les concentrations en CO₂ à hauteur des animaux vont avoir tendance à être sous estimées.** Au contraire dans l'élevage E3, les concentrations en CO₂ mesurées à 80 cm sont significativement supérieures à celles mesurées à 10 cm du sol, excepté pour les mesures réalisées au niveau de l'extraction d'air.

Variabilité horizontale (Figure 4)

Figure 4. concentrations en CO₂ moyennes (ppm) pour chacun des 3 élevages, mesurées à 10 cm (gauche du graphique) et 80 cm (droite du

graphique), à 3 endroits du bâtiment, à la fin du lot de volailles. [E=élevage]. Les moyennes présentant des lettres (a, b ou c) différentes sont significativement différentes au seuil de 5 %.



Pour les 3 élevages, les concentrations en CO₂ sont significativement supérieures à l'entrée d'air par rapport à l'extraction, pour les mesures à 10 et 80 cm du sol, excepté pour l'élevage E1 pour les mesures à 80 cm (NS). Ce résultat peut s'expliquer, comme en début de lot, par le protocole utilisé pour la prise de mesure. De plus, en fin de lot, le brassage et le renouvellement d'air sont augmentés ce qui peut aussi expliquer ce résultat. Les concentrations en CO₂ mesurées au centre du bâtiment sont systématiquement plus basses que celles mesurées à proximité des entrées d'air, néanmoins ces différences ne sont pas significativement différentes pour l'élevage E1 pour les mesures à 10 cm et pour l'élevage E3 pour les mesures à 80 cm. Pour les 3 élevages, les concentrations en CO₂ sont significativement différentes entre le centre du bâtiment et l'extraction, pour les mesures à 10 et 80 cm du sol, excepté pour l'élevage E2 pour les mesures à 80 cm où la différence n'est pas significative. **L'hétérogénéité horizontale des concentrations en CO₂ en fin de lot est moins marquée qu'en début**

d'élevage pour les 3 élevages étudiés et suggère que l'ajout d'un capteur supplémentaire en début de lot est utile.

CONCLUSION

Le test de capteurs CO₂ d'une même technologie (infrarouge non dispersif) met en évidence que 2 des 5 capteurs (C1 et C4) sont à déconseiller pour une utilisation en poulailler. Les essais réalisés en station expérimentale suggèrent **une position optimale du capteur de la sonde en début d'élevage à 80 cm +/- 20 cm du sol**, entre les lignes de pipettes et de mangeoires. En fin de lot comme en début, cette hauteur permet une représentation de la concentration en CO₂ globale du bâtiment mais peut sous-estimer les concentrations dans l'aire de vie des animaux en fin de lot. Ce résultat peut suggérer l'ajout d'un capteur à hauteur des animaux en plus d'un capteur à 80 cm. L'hétérogénéité horizontale des concentrations en CO₂ en fin de lot est moins marquée qu'en début d'élevage pour les 3 élevages étudiés où les différences entre le centre, la sortie d'air et l'extraction sont significatives. De nouveau ce résultat peut suggérer l'ajout de capteurs supplémentaires en début de lot. Cependant au regard du test de capteurs, il est préférable d'investir dans un capteur de qualité et dans sa maintenance plutôt que dans un nombre élevé de capteurs.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été conduite dans le cadre du projet Cas Dar GestCO₂ piloté par l'ITAVI, en partenariat avec l'ANSES (dans le cadre de l'UMT SANIVOL), la chambre régionale d'agriculture de Bretagne, l'INRA UMR SAS et Avipôle formation. Les auteurs remercient les éleveurs ayant participé, les membres du comité de pilotage de l'étude GestCO₂ et notamment les deux équipementiers du Cluster Elinnove (Tuffigo-Rapidex et Sodalec Distribution), partenaires techniques de ce travail.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CIGR, 1984. Report of working group on Climatisation of Animal Houses. Editors: Scottish Farm Building Investigation Unit. Craibstone, Aberdeen, Scotland. ISBN 0 902433 33 4. 80 pages.
- INRS (N.Bonnard, M-T Brondeau, M.Falcy, D.Jargot, S.Miraval, J-C Protois, O. Scheneider.), 2005. Fiche toxicologique Dioxyde de carbone FT 238.
- INRS, 1999. Intoxication par inhalation de dioxyde de carbone. Dossier médico-technique. 79 TC 74. Document pour le médecin du travail. N°79 ; 3ème trimestre.
- McGovern R.H., Feddes J.J.R., Zuidhof M.J., Hanson J.A. and Robinson F.E., 2001. Growth performance, heart characteristics and incidence of ascites in broilers in response to carbon dioxide and oxygen concentrations. Canadian Biosystems engineering, 43 : 4.1-4.6
- Hassouna M., Eglin T., Cellier P., Colomb V., Cohan J-P et al. : Mesurer les émissions gazeuses en élevage : gaz à effet de serre, ammoniac et oxydes d'azote. INRA-ADEME (France), 2015, 2-7380-1375-9
- Olanrewaju H., Dozier W. A, Miles D., Lott B. D, 2008. Growth performance and physiological variables for broiler chickens subjected to short-term elevated carbon dioxide concentrations. International journal of poultry science 7 (8): 738-742.
- Reece F. and Lott B., 1980. Effect of carbon dioxide on broiler chicken performance. Poultry Science, 59 (11):2400-2402
- Robin P., Amand A., Nicolas C., Chevalier D., Gallot S., Pigache E., Keita A. : Modélisation thermique des bâtiments d'élevage de poulets de chair en vue d'optimiser le choix des équipements et les paramètres de régulation, 2017. 12èmes journées de la recherche avicole et palmipèdes à Foie Gras, Tours, 5 et 6 avril 2017.
- Scientific Committee on Animal Health and Animal Welfare, 2000. The Welfare of Chickens Kept for Meat Productions (Broilers).

Tableau 1. description des capteurs de concentrations en CO₂ testés (informations fournisseurs) (technologie InfraRouge Non Dispersif)






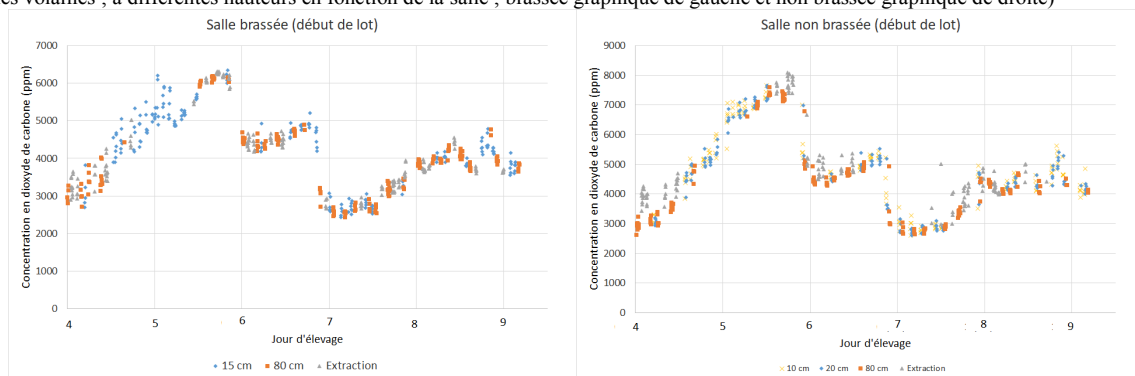
	C1	C2	C3	C4	C5
Visuels du capteur (photos crédit ITAVI)					
Plage de mesure (ppm)	0-10 000	0-10 000	0-10 000	0-10 000	0-10 000
Précision des mesures de CO ₂ (ppm)	+/- 50 ppm + 5 % de la lecture	Entre 0 et 5 000ppm : +/- 50 ppm + 2 % de la lecture Entre 5001 et 10 000 ppm : +/- 100 ppm + 3 % de la lecture	A 25°C et 1013 hPa : • 0 – 3 000ppm : +/- 40 ppm • 3000 – 10 000 ppm : +/- 40 ppm + 2% de la lecture Incertitude d'étalonnage : • à 2000 ppm +/-18ppm • à 10 000ppm +/- 66 ppm	+/- 50 ppm + 3 % lecture	A 25°C et 1013 hPa : • 0 – 3 000ppm : +/- 40 ppm • 3000 – 10 000 ppm : +/- 40 ppm + 2% de la lecture Incertitude d'étalonnage : • à 2000 ppm +/-18ppm • à 10 000ppm +/- 66 ppm
Coût d'achat (prix sur devis ITAVI 2017)	Inférieur ou égal à 550 €HT	Supérieur ou égal à 1000 €HT	Supérieur ou égal à 1000 €HT	Entre 550 €HT et 1000 €HT	Inférieur ou égal à 550 € HT

Figure 1. évolution de la concentration en dioxyde de carbone mesurée en début lot (du 6 mars au 11 mars 2017 ; 4 à 9 jours d'âge des volailles ; à différentes hauteurs en fonction de la salle ; brassée graphique de gauche et non brassée graphique de droite)**Figure 2.** évolution de la concentration en dioxyde de carbone mesurée en fin de lot (du 1 avril au 3 avril 2017 ; 30 à 32 jours d'âge des volailles ; à différentes hauteurs en fonction de la salle ; brassée graphique de gauche et non brassée graphique de droite)