



Chambres calorimétriques pour l'homme et analyse de gaz

Christophe Montaurier

► To cite this version:

Christophe Montaurier. Chambres calorimétriques pour l'homme et analyse de gaz. Cahier des Techniques de l'INRA, 2016, Art05-ns-J2M, pp.98 - 106. hal-01578232

HAL Id: hal-01578232

<https://hal.science/hal-01578232>

Submitted on 28 Aug 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

Chambres calorimétriques pour l'homme et analyse de gaz

Christophe Montaurier^{1,2}

Résumé. Les chambres calorimétriques du plateau technique "Calorimétrie Indirecte" de Clermont - Ferrand permettent d'évaluer, avec précision, la dépense énergétique et l'utilisation des substrats énergétiques (protéines, lipides, glucides) d'un individu vivant dans des conditions qui autorisent un contrôle précis de son activité physique et de son alimentation. Elles fonctionnent sur le principe de la calorimétrie indirecte en circuit ouvert (mesure des échanges gazeux respiratoires : consommation d'oxygène et production de CO₂). Leur confort et leurs équipements permettent d'effectuer des mesures de dépense énergétique, de fréquence cardiaque et d'actimétrie, sur une durée allant de 24 h à plusieurs jours. Ces équipements rares ont permis de mettre en évidence des résultats inédits concernant les dépenses énergétiques lors du sommeil grâce à la participation de personnes volontaires. Leur mise en œuvre et leur utilisation requièrent des compétences dans les domaines de l'instrumentation, des capteurs, de l'informatique et de la physique des gaz. Lors de la phase de conception, il faut tenir compte de contraintes parfois contradictoires entre elles, afin de faire des choix judicieux quant aux appareils et à l'instrumentation à utiliser. C'est notamment le cas du volume de la chambre, qui doit être suffisant pour le confort des volontaires, mais limité pour éviter une trop grande dilution des échanges respiratoires imposant une contrainte trop importante quant au choix des analyseurs d'O₂ et de CO₂. La validation de l'ensemble de l'installation et le temps de réponse sont des éléments à prendre en compte lors du calcul des volumes des échanges respiratoires.

Mots clés : chambre calorimétrique, analyse de gaz, O₂, CO₂, échanges respiratoires, homme, validation

Introduction

Le Centre de recherche en nutrition humaine d'Auvergne (CRNH-A) est le seul site français disposant de deux chambres calorimétriques destinées aux investigations chez l'homme et opérationnelles de manière permanente. Il s'agit de l'un des 12 sites répertoriés en Europe. Les deux chambres calorimétriques font partie intégrante du Laboratoire de Nutrition humaine, situé sur le campus de l'hôpital Gabriel Montpied (CHU de Clermont - Ferrand).

L'évolution rapide des connaissances dans le domaine du vivant a profondément bouleversé les approches méthodologiques en biologie. La nutrition humaine a largement bénéficié de ces changements récents pour optimiser l'alimentation et ses effets bénéfiques chez l'homme. Les méthodes classiques d'exploration du métabolisme énergétique développées depuis de très nombreuses années, notamment la calorimétrie indirecte, ont permis des avancées considérables dans des domaines variés tels que les changements aux différents stades du développement, l'adaptation à diverses situations nutritionnelles ou dans le champ des pathologies nutritionnelles. L'essor de la biologie moléculaire ne doit pas être dissocié de l'exploration intégrative du métabolisme énergétique afin de maintenir une « pertinence métaboliquement raisonnée » à l'avancée de ces connaissances. Dans ce but, les chambres calorimétriques (CC) offrent l'opportunité de pouvoir « disséquer » les facteurs impliqués dans la modulation de la dépense énergétique au cours des différentes phases de la journée.

Les CC, basées sur le principe de la calorimétrie indirecte, constituent la méthode de référence pour le suivi cinétique de la mesure de la dépense énergétique de l'homme en conditions contrôlées de vie. Outils intégratifs de suivi de la dépense énergétique (DE), les CC permettent de détailler les composantes essentielles de la DE d'une journée et d'évaluer la contribution des substrats énergétiques à la fourniture d'énergie, tout en contrôlant le cadre de vie de l'individu (alimentation, activité physique, rythme de vie...). Toutefois, ce type d'installation nécessite des équipements lourds ainsi que des

1. INRA, UMR1019 Nutrition humaine, CRNH Auvergne, F-Clermont-Ferrand, France

2. Clermont Université, Université d'Auvergne, UMR1019 Nutrition humaine, F-Clermont-Ferrand, France
christophe.montaurier@clermont.inra.fr

compétences techniques spécifiques (instrumentation, physique des gaz, traitement du signal). La procédure visant à concevoir, réaliser et exploiter des CC pour l'homme doit être élaborée avec soin, sous peine de rendre inexploitable ces coûteuses installations. Dans le domaine de l'analyse des gaz, le milieu dans lequel sont effectués les prélèvements, l'acheminement des échantillons de gaz, le choix des appareils d'analyse et la maîtrise des paramètres intervenant dans la physique des gaz, jouent sur la qualité des mesures effectuées.

Principe de mesure de la dépense énergétique par calorimétrie indirecte

Les chambres calorimétriques (CC), basées sur le principe de la calorimétrie indirecte, constituent la méthode de référence pour le suivi cinétique de la mesure de la dépense énergétique de l'homme en conditions contrôlées de vie.

Nos installations permettent donc de calculer les dépenses énergétiques de volontaires à partir de la mesure de leurs échanges respiratoires. Ce principe, édicté par Lavoisier à partir de 1780, repose sur la relation qui unit le volume d'oxygène que nous consommons (VO_2 en litres) et le volume de dioxyde de carbone que nous produisons (VCO_2 en litres) à l'énergie que nous dépensons (DE en kcal).

Il existe dans la littérature, plusieurs équations proches les unes des autres en termes de résultats, établissant la relation entre VO_2 , VCO_2 et DE. Nous utilisons l'équation de Brouwer (Brouwer, 1965) corrigée :

$$(3,866 \times \text{VO}_2 + 1,2 \times \text{VCO}_2) \times 0,99 = \text{DE}$$

Au-delà de la seule détermination de la dépense énergétique, nos CC permettent également de déterminer quelle famille de nutriments est en particulier utilisée lors des différentes activités. En effet, l'énergie utilisée par l'organisme est associée à l'oxydation des nutriments (lipides, protéines, glucides) et la production d'énergie par litre d'oxygène consommé varie selon leur nature : 5,01 kcal (20,96 kJ) pour le glucose, 4,66 kcal (19,5 kJ) pour les lipides et 4,34 kcal (18,16 kJ) pour les protéines. Le calcul exact de la dépense énergétique nécessite de connaître la participation relative de chacun des substrats à la consommation totale d'O₂. L'oxydation nette des protéines peut être déterminée à partir de l'excrétion urinaire d'azote. La mesure simultanée de la consommation d'O₂ et de la production de CO₂ permet de calculer la contribution relative des glucides et des lipides aux oxydations totales (le quotient respiratoire étant de 1 lors de l'oxydation de glucides et de 0,7 lors de l'oxydation de lipides). Il est ainsi possible de calculer précisément les oxydations nettes de ces deux substrats à partir des échanges respiratoires totaux en O₂ et CO₂ mesurés, auxquels on aura retranché les échanges gazeux attribuables à l'oxydation des protéines via l'excrétion urinaire d'azote. La mesure des échanges gazeux respiratoires s'effectue en collectant l'air injecté dans la chambre calorimétrique et l'air extrait de celle-ci (Ravussin et al., 1986).

Qu'est-ce qu'une chambre calorimétrique (CC) ?

Une chambre calorimétrique c'est tout d'abord une chambre, dimensionnée comme une chambre d'étudiant, mais... mieux équipée. En effet les dimensions ainsi que les aménagements ont été pensés de manière à ce que les volontaires puissent bénéficier d'un confort maximum durant leur séjour.

C'est un outil de mesure de la dépense énergétique. Les volontaires séjournent dans l'appareil de mesure.



C'est un ensemble de capteurs et d'instruments. Tous les paramètres influents de la physique des gaz doivent être mesurés et enregistrés : les concentrations d'oxygène et de dioxyde de carbone, le débit de renouvellement d'air dans le circuit, la température, l'humidité relative et la pression atmosphérique. La fréquence cardiaque du volontaire est également enregistrée, mais n'entre pas dans le calcul de la dépense énergétique.

C'est aussi une chaîne d'acquisition et de traitement des données. L'ensemble comprend une carte PC et un logiciel d'acquisition, et des programmes de traitement, de filtrage des données et de présentation des résultats.

Description des CC

Les deux chambres calorimétriques ont une surface de 10 m² au sol, pour un volume total d'un peu plus de 32 m³ chacune. Elles fonctionnent sur le principe de la calorimétrie indirecte en circuit ouvert (mesure des échanges gazeux respiratoires : consommation d'oxygène et production de dioxyde de carbone).

L'air de chaque chambre est climatisé pour le confort des volontaires, régulé en température et en humidité, et partiellement renouvelé en permanence (circuit ouvert, voir **Figure 1**).

L'aménagement intérieur comprend une table, une chaise, un lit, une table de chevet avec lampe, un lavabo et des toilettes. Un ensemble hi-fi/vidéo/multimédia permet au volontaire de se détendre lors des phases de repos du protocole. Pour les phases d'activités, l'équipement de la chambre peut-être adapté et aménagé avec un tapis roulant, un ergo-cycle ou un stepper. Pour la communication, chaque chambre est équipée d'un téléphone et d'un interphone. Un four à micro-ondes permet de faire réchauffer les plats.

Chaque chambre est également associée à un électrocardioscope permettant la surveillance et l'enregistrement de la fréquence cardiaque (FC) de chaque volontaire. Ce paramètre, bien que n'intervenant pas directement dans le calcul de la dépense énergétique, permet d'établir une correspondance entre les cinétiques des dépenses énergétiques et celles des fréquences cardiaques.

Les CC permettent des séjours d'une durée de 24 h à plusieurs jours des volontaires, une surveillance permanente est donc assurée à proximité. La nuit, une personne de garde séjourne dans une chambre aménagée pour assurer la continuité de la surveillance. Les chambres sont équipées d'alarmes qui sont toutes dupliquées en chambre de garde (sonnettes d'appel actionnables par les volontaires, alarme cardiaque, alarme incendie, alarme technique).

L'enregistrement des données nécessaires au calcul des dépenses énergétiques est assuré par un ensemble d'installations techniques.

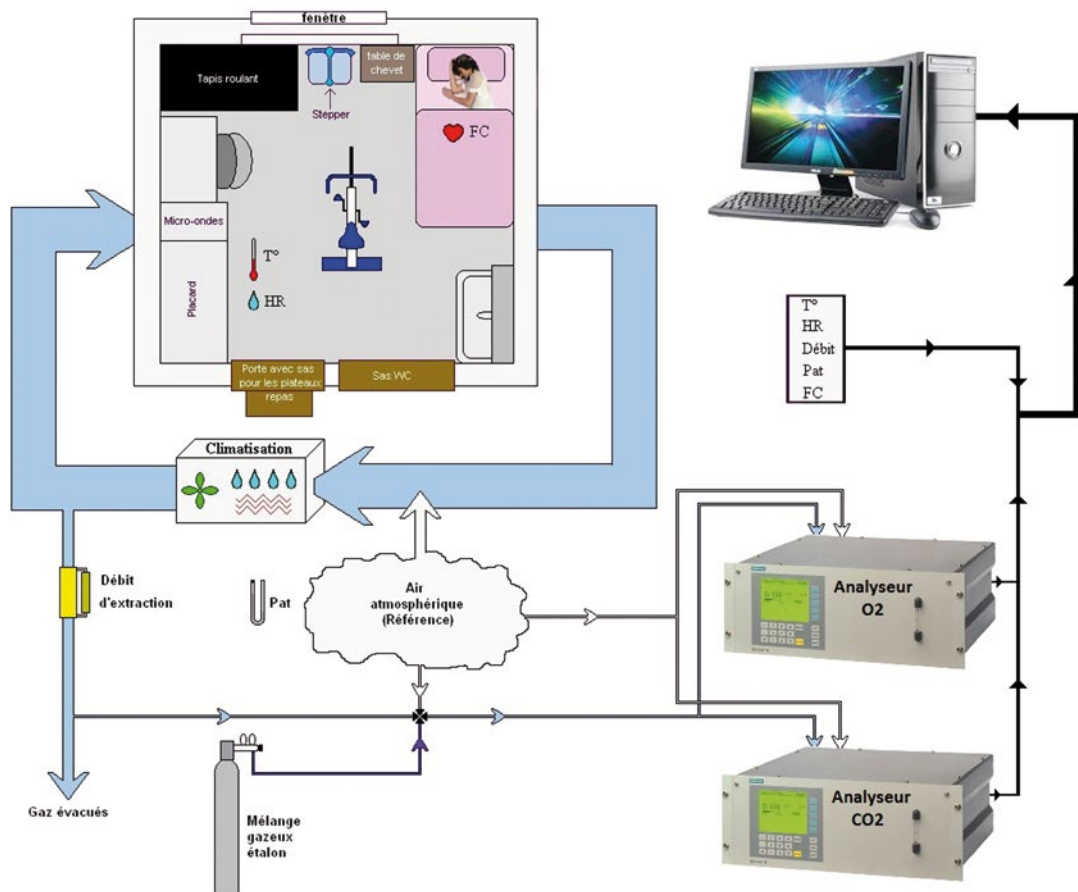


Figure 1. Chambre calorimétrique et équipements.

La baie d'analyse comporte quatre analyseurs (un couple par chambre) pour les mesures en continu des concentrations d'O₂ et de CO₂. Un débitmètre massique par chambre permet de mesurer en permanence le débit d'extraction de l'air (renouvellement), dans la gamme de 1 à 10 m³/h. Une sonde de température et une sonde d'humidité complètent l'ensemble des capteurs de chaque chambre, ainsi qu'un capteur de pression atmosphérique. L'acquisition des données se fait via une carte d'acquisition PCL 816 de chez Advantech (Advantech Europe BV Ekkersrijt, The Netherlands) implantée dans un PC dédié. Une séquence d'acquisition et un stockage des données sont effectués toutes les minutes.

Que permettent les CC ?

Outils intégratifs de suivi de la dépense énergétique, les CC permettent de détailler les composantes essentielles de la DE d'une journée et d'évaluer la contribution des substrats énergétiques à la fourniture d'énergie, tout en contrôlant le cadre de vie de l'individu (alimentation, activité physique, rythme de vie...).

Ces installations permettent donc de mesurer les échanges respiratoires (volumes O₂ et CO₂) des volontaires. A partir de ces mesures nous obtenons une évaluation précise de la DE et nous pouvons tracer sa cinétique tout au long du séjour en CC du volontaire, ainsi que calculer le bilan global sur 24 h. Par ailleurs le calcul du quotient respiratoire (QR) qui est le rapport VCO₂/VO₂ nous fournit une indication sur l'utilisation des substrats énergétiques (protéines, lipides, glucides) utilisés par les individus. Un QR proche de 1 indique une oxydation plus glucidique, alors que vers 0,7 l'oxydation sera plus lipidique.

|||||

Les activités sont préétablies et les repas sont calibrés. De ce fait nous pouvons contrôler la balance énergétique de chaque volontaire.

L'enregistrement simultané de la fréquence cardiaque, de l'actimétrie et de tous les paramètres de calcul de la DE, permet d'établir les relations d'étalonnage d'appareils portables légers (Polars, ActiHeart, ArmBand ...). Ces appareils peuvent ensuite être portés par les volontaires dans les conditions normales de vie (à domicile, au travail, au sport ...) et fournir des résultats de dépense énergétique plus précis à partir de leurs simples paramètres, grâce à l'étalonnage qu'ils ont subi avec les outils de référence que sont les CC.

Contraintes et choix techniques des analyseurs

Outre le confort de vie des volontaires dans les CC, nous devons leur assurer un environnement physiologique non perturbé. Il s'agit de maintenir les concentrations en O_2 et CO_2 au sein de la CC dans des plages de valeurs qui ne modifieront en rien la perception, la sensation et le comportement des volontaires. Ces concentrations sont choisies pour rester dans la gamme 20,000 % - 21,000 % pour l' O_2 et 0,000 % - 1,000 % pour le CO_2 .

C'est le débit de renouvellement de l'air de la CC qui permet de maintenir les concentrations en O_2 et CO_2 dans ces gammes, compte tenu du volume de la CC, de la masse maigre du volontaire ainsi que du programme d'activités prévu lors du protocole en CC. Plus le volontaire aura une masse maigre importante et/ou plus les activités prévues seront intenses, plus il faudra renouveler rapidement l'air de la CC. En d'autres termes, il faudra un débit de renouvellement d'air bien plus important pour un pilier de rugby qui va pédaler 2 h sur un ergo-cycle, que pour une frêle jeune fille qui fera de la lecture. A défaut, les concentrations d' O_2 et de CO_2 sortiraient des plages de valeurs cibles.

Ces valeurs limites des concentrations, imposent le choix des plages de mesure de nos analyseurs qui sont donc calées sur les valeurs que nous venons de voir.

Par ailleurs, nos CC ayant des volumes de 32 m³, le volume de dilution des échanges respiratoires de chaque volontaire est important. En considérant qu'en moyenne un homme consomme 0,34 L d' O_2 et produit 0,3 L de CO_2 par minute, cela représente des variations de 0,00106 % et 0,00094 % respectivement pour l' O_2 et le CO_2 par minute dans une CC. Cette réalité nous impose de choisir des analyseurs ayant des résolutions suffisantes pour pouvoir observer de si faibles modifications des concentrations de l'air extrait de nos CC. Les meilleures résolutions répondant à nos besoin ont été apportées par les analyseurs SIEMENS OXYMAT 6E et SIEMENS ULTRAMAT 6E pour l' O_2 et le CO_2 respectivement (SIEMENS AG, Nuremberg, Germany). Ces deux appareils présentent une résolution de 0,001 %. Leur précision annoncée par le constructeur est de ± 50 ppm (0,005 %) pour l'analyseur d' O_2 et de ± 10 ppm (0,001 %) pour l'analyseur de CO_2 .

Bien que l'acquisition se fasse toutes les minutes sur le PC, les calculs intègrent les données sur une durée minimum de 5 min. Comme nous pouvons le constater plus haut, les variations de concentrations sur une minute sont à la limite des performances des analyseurs. En intégrant nos valeurs sur 5 min, nous nous assurons d'avoir des variations significatives de concentrations.

Temps de réponse

Les matériaux poreux et micro-alvéolés potentiellement utilisés pour l'isolation des parois (laine de verre ou de roche), les moquettes, les tissus (rideaux), les mousses (matelas, ameublement) se comportent

Au cours de la journée de mesure, l'ensemble de ces matériaux va se comporter en «condensateur». Ils vont stocker une partie des gaz échangés lorsqu'il y a un excédent extérieur, puis relarguer ces mêmes gaz lorsqu'il y a un déficit extérieur. Ce phénomène induit un effet de traîne plus ou moins important sur la réponse des mesures. Il intervient donc, en partie, sur le temps de réponse global de l'installation. C'est un phénomène que nous cherchons évidemment à supprimer, ou tout du moins à minimiser. Pour cela il faut bannir au maximum les matériaux évoqués précédemment et leur préférer des matériaux pleins (sol en vinyle à la place de la moquette par exemple) ou bien à alvéoles fermées pour les mousses.

Ce temps de réponse global doit naturellement être pris en compte dans le traitement des données et le calcul des échanges respiratoires. Les autres paramètres enregistrés (température, humidité, pression atmosphérique, débit) ne subissent pas ce phénomène global de retard, dans la mesure où les prélèvements sont effectués directement au sein du milieu de variation de chaque mesurande). Pour cela on décale les valeurs d'O₂ et de CO₂ de la durée nécessaire pour faire correspondre leur moment d'apparition à celui des paramètres à réponses rapides (température, humidité, débit, pression atmosphérique).

L'ensemble des capteurs délivrant des informations utilisées pour le calcul des DE doivent être périodiquement contrôlés et éventuellement ré-étalonnés. Nous effectuons ces contrôles en moyenne une fois par an, mais la périodicité peut être adaptée selon l'intensité de l'utilisation de nos CC.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36

(10 points de l'échelle de mesure comportant 1000 points), cela représente un écart de 1,16 % sur le calcul de la DE sur 24 h d'un volontaire. Une dérive de +0,05 % conduit à un écart de 5,80 % sur la DE sur 24 h.

Par ailleurs, afin de pouvoir faire confiance aux valeurs délivrées par le système de mesure que représente une chambre calorimétrique, il est nécessaire de valider l'ensemble de l'installation. Le principe de validation d'une chambre calorimétrique, adopté à Clermont-Ferrand, consiste à injecter du CO₂ pour simuler une production de CO₂, et injecter de l'azote (N₂) pour diluer les gaz, notamment l'O₂, simulant ainsi une consommation d'O₂. Nous contrôlons la quantité de chaque gaz que nous injectons par gravimétrie. Nous cherchons ensuite à savoir si nous récupérons en sortie tout ce que nous injectons, par l'intermédiaire des concentrations, des débits, des températures et des pressions.

Les principaux calculs sont les suivants :

Équation de départ : $V_e = V_s - V_{N_2 \text{ injecté}} - V_{CO_2 \text{ injecté}} + V_f - V_i$

Volume de CO₂ analysé :

$$V_{CO_2 \text{ analysé}} = V_{CO_2} + V_{CO_2 f} - V_{CO_2 i} + ((V_{N_2 \text{ injecté}} + V_{CO_2 \text{ injecté}}) * 0,04006 / 100) \text{ en litres}$$

Volume d'O₂ théorique extrait de la chambre d'après les injections de gaz :

$$V_{O_2 th} = [(V_s - V_{N_2 \text{ injecté}} - V_{CO_2 \text{ injecté}} - V_i + V_f) * 20,930 / 100] + V_{O_2 i} - V_{O_2 f} \text{ en litres}$$

Concentration théorique en O₂ de l'air (en différentiel par rapport à l'air ambiant) :

$$[O_2 thd] = ((V_s * 20,930 / 100) - V_{O_2 th}) / V_s \text{ en \%}$$

Concentration en O₂ de l'air extrait (différentiel) : $[O_2 dc] = [O_2 d] * (P_a / (P_a - F_p))$ en %

Taux de récupération du CO₂ : $TCO_2 = V_{CO_2 \text{ analysé}} / V_{CO_2 \text{ injecté}}$ en %

Taux de récupération de l'O₂ : $TO_2 = [O_2 dc] / [O_2 thd]$ en %

Avec : V_e = volume d'air entrant dans la CC sur la durée considérée

V_s = volume d'air sortant de la CC

$V_{N_2 \text{ injecté}}$ = volume d'azote injecté dans la CC

$V_{CO_2 \text{ injecté}}$ = volume de CO₂ injecté dans la CC

$V_f - V_i$ = variation du volume entre le début et la fin des mesures

Indices : f = final ; i = initial ; d = différentiel ; c = corrigée

P_a = pression atmosphérique

F_p = pression de vapeur d'eau saturante à l'entrée des analyseurs

0,04006 % = concentration en CO₂ de l'air entrant = concentration de l'air ambiant de référence

20,930 % = concentration en O₂ de l'air entrant = concentration de l'air ambiant de référence

Les valeurs des taux de récupération TCO_2 et TO_2 permettent de prendre la décision de valider ou non l'ensemble de l'installation. Dans le cas idéal ces taux doivent être égaux à 100%. Un déséquilibre prononcé entre les valeurs de ces taux peut pointer un problème spécifique sur le circuit de mesure de l'un des gaz (O₂ ou CO₂), depuis la zone de prélèvement jusqu'à l'analyseur. Il faut alors procéder à une détection méthodique de défaut sur tous les éléments constituant la chaîne de mesure incriminée. Si les deux taux sont faibles, outre l'existence possible de problèmes sur les circuits de mesure des gaz, cela peut également mettre en évidence la présence de fuites au niveau de la CC. Une action est alors nécessaire

Pour l'ensemble de ce type d'installation, il a été montré que la précision de la mesure de la dépense énergétique en chambre calorimétrique était très bonne : en effet la différence moyenne entre les mesures effectuées en chambre calorimétrique et celles effectuées par la méthode de référence (la calorimétrie directe) est de $1,2 \pm 0,14$ % au cours de périodes de 24 h (Dauncey, 1980).

Les mesures des DE des volontaires en CC nous ont permis de mettre en évidence des variations de DE de sommeil inattendues et inédites chez les patients parkinsoniens (Montaurier et al., 2007) ainsi que chez les patients greffés rénaux (Heng et al., 2014).

La validation de l'ensemble du système permet de manière pratique d'alerter éventuellement sur l'apparition de dégradations des performances d'un ou plusieurs éléments, mais surtout de s'assurer de la fiabilité des résultats obtenus.



Au-delà des points importants décrits ici, d'autres éléments doivent également être considérés. En cas de perturbation sur les signaux enregistrés, un filtrage du signal est alors nécessaire. Un soin particulier doit également être apporté quant au choix des mélanges gazeux étalons destinés aux analyseurs.

Références bibliographiques

Brouwer E (1965) Report of sub-committee on constants and factors. Symposium of Energy Metabolism held at European Association for Animal Production, London: EAAP Academic : 441-443.

Dauncey MJ (1980) Metabolic effects of altering the 24 h energy intake in man, using direct and indirect calorimetry. *Br J Nutr* **43**: 257-269.

Heng AE, Montaurier C, Cano N, Caillot N, Blot A, Meunier N, Pereira B, Marceau G, Sapin V, Jouve C, Boirie Y, Deteix P, Morio B (2014) Energy expenditure, spontaneous physical activity and with weight gain in kidney transplant recipients. *Clin Nutr* : pii: S0261-5614(14)00134-4. Doi : 10.1016/j.clnu.2014.05.003

Montaurier C, Morio B, Bannier S, Derost P, Arnaud P, Brandolini-Bunlon M, Giraudet C, Boirie Y, Durif F (2007) Mechanisms of body weight gain in patients with Parkinson's disease after subthalamic stimulation. *Brain* **130** : 1808-1818.

Ravussin E, Lillioja S, Anderson T (1986) Determinants of 24-hour energy expenditure in man. Methods and results using a respiratory chamber. *J Clin Invest* **78** : 1568-1578.