

CALORIMÉTRIE INDIRECTE

B. Delafosse, G. Annat, J.-P. Viale

Chez le sujet sain, l'apport nutritionnel par l'alimentation est régulé dans le temps par des mécanismes complexes faisant appel en particulier aux sensations de faim ou de satiété. Chez le malade de réanimation, ces mécanismes sont le plus souvent défaillants, l'alimentation orale est insuffisante ou impossible, il est alors nécessaire de recourir à la nutrition artificielle. Assurée par voie entérale ou parentérale, elle a pour objectif d'assurer un apport nutritionnel quantitativement et qualitativement adapté aux besoins du malade. Si ces derniers sont en effet variables en fonction du patient et de sa pathologie, plusieurs méthodes permettent d'évaluer les dépenses énergétiques, afin de déterminer la quantité de substrats nécessaires.

Les êtres vivants transforment l'énergie chimique qu'ils reçoivent sous forme de nutriments, en une autre forme d'énergie qui peut être chimique ou mécanique. Le premier principe de la thermodynamique, à savoir la conservation de l'énergie au cours de sa transformation, s'applique aussi à l'être humain : l'énergie produite par les processus oxydatifs est finalement transformée en chaleur et en travail. Cette énergie peut être mesurée par deux méthodes distinctes : soit directement par la calorimétrie dite directe, soit indirectement calculée à partir de la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) de l'organisme, par calorimétrie appelée alors indirecte. Il existe en effet, une relation directe entre l'énergie produite et la $\dot{V}O_2$, puisqu'à l'exception des deux ATP produits par molécule de glucose convertie en lactate au cours de la glycolyse anaérobie, la synthèse de l'ATP est liée à l'oxydation des substrats avec production de trois moles d'ATP par atome-gramme d'oxygène. C'est ainsi que chez un sujet au repos, dans un environnement thermique neutre, les quantités d'énergie produite, mesurées simultanément par calorimétrie directe et par calorimétrie indirecte, sont identiques [11].

LES COMPOSANTES DE LA DÉPENSE ÉNERGÉTIQUE

La dépense énergétique totale d'un individu est schématisée par la somme de trois composantes, si l'on exclut la dépense énergétique nécessaire à la croissance chez l'enfant.

- **Le métabolisme de base**, défini chez l'adulte comme étant l'énergie dépensée au repos dans une ambiance thermique neutre, avec un délai de 8 à 12 h après un repas pauvre en protéines ou une activité physique. Il correspond à l'énergie obligatoirement dépensée par l'ensemble des mécanismes de transports ioniques au sein des cellules, les activités musculaires vitales, comme les battements cardiaques et la respiration, et enfin, le tonus musculaire de repos. En pratique, ces conditions sont difficiles à réaliser, particulièrement en milieu de réanimation, et on préfère substituer à la notion de métabolisme de base, celle de métabolisme de repos.

- **La thermogénèse**, correspondant à la dépense énergétique située au-dessus du métabolisme de repos. Elle dépend de multiples facteurs comme l'apport nutritionnel (TEF pour *thermic effect of food*), l'exposition au chaud ou au froid, ou de conditions particulières comme l'administration de certains médicaments utilisés en réanimation tels que les catécholamines [4].

- **La dépense énergétique liée à l'activité physique** (exercices physiques, frissons, crises convulsives).

Selon le principe de conservation de l'énergie, la quantité d'énergie pénétrant dans un corps est égale à celle qui s'en échappe. Pour un sujet au repos, cette équation exprimée en kilocalories ou en Joules (1 kcal = 4,1855 kJ), peut s'écrire :

$$\dot{M} = (\dot{R} + \dot{C} + \dot{K} + \dot{E}) + \dot{S}$$

dans laquelle \dot{M} représente la production d'énergie à partir des métabolismes oxydatifs, \dot{R} les pertes thermiques par radiation, \dot{C} les pertes thermiques par convection, \dot{K} les pertes thermiques par conduction, \dot{E} les pertes thermiques par évaporation, et \dot{S} les variations de stock de chaleur par réchauffement ou refroidissement du corps.

La calorimétrie directe permet de mesurer les termes \dot{R} , \dot{C} , \dot{K} , et \dot{E} , soit l'ensemble des pertes thermiques du corps. Elle n'est pas applicable au malade de réanimation, en particulier lorsque ce dernier est ventilé mécaniquement. La calorimétrie indirecte, quant à elle, permet de calculer la production totale d'énergie (terme \dot{M}).

LES PRINCIPES DE LA CALORIMÉTRIE INDIRECTE

LES SYSTÈMES DE CALORIMÉTRIE INDIRECTE

Cette méthode est rendue accessible en pratique clinique par la mise au point industrielle de systèmes compacts performants. Leur facilité d'emploi ne doit cependant pas laisser ignorer les différents pièges méthodologiques et les erreurs qui en résultent. Le type de circuit utilisé permet de distinguer deux méthodes pour mesurer la $\dot{V}O_2$.

LE CIRCUIT FERMÉ

Dans cette technique, l'air expiré par le sujet est débarrassé du gaz carbonique et réinhalé. La quantité d'oxygène consommée correspond soit à la variation de volume du circuit, soit à la quantité d'oxygène qu'il est nécessaire d'injecter dans le circuit afin d'en garder le volume constant. Cette technique, bien qu'ayant été adaptée voici quarante ans à la mesure de la $\dot{V}O_2$ du patient ventilé mécaniquement, est d'un intérêt très limité. La difficulté de la mesure exacte de la $\dot{V}O_2$ très dépendante de l'étanchéité du circuit, l'impossibilité d'effectuer des mesures de longue durée, l'absence de mesure simultanée de la production de gaz carbonique ($\dot{V}CO_2$), et enfin les contraintes liées à l'utilisation du circuit fermé rendent cette méthode inutilisable en milieu de soins intensifs. Si le circuit fermé a été historiquement utilisé en premier, ce sont les méthodes en circuit ouvert qui se sont répandues et sont actuellement disponibles en routine clinique.

LE CIRCUIT OUVERT

La mesure des échanges gazeux au moyen de la calorimétrie indirecte dite en circuit ouvert peut être réalisée selon différentes techniques dont les résultats sont similaires. Elles ont en commun le principe de mesure de la $\dot{V}O_2$ comme étant la différence entre la quantité d'oxygène entrant dans l'organisme et celle qui en sort.

TECHNIQUE SANS SÉPARATION DES GAZ INSPIRÉS ET EXPIRÉS

Le principe est simple : une enceinte pouvant contenir le sujet entier (chambres de calorimétrie indirecte), ou seulement sa tête (technique du boîtier ou *canopy*), est ventilée au moyen d'une aspiration à débit constant et mesuré, qui extrait le mélange air-gaz expirés. Les fractions d'oxygène et de gaz carbonique sortants sont analysées, de même que la fraction d'oxygène entrant si celle-ci est supérieure à celle de l'air atmosphérique. La technique du boîtier peut être aisément utilisée chez un patient de réanimation non ventilé.

TECHNIQUE AVEC SÉPARATION DES GAZ INSPIRÉS ET EXPIRÉS

Dans le principe, les gaz expirés sont séparés du mélange gazeux inspiré au moyen d'une valve unidirectionnelle, et recueillis dans un spiromètre ou un sac de Douglas, ce qui limite la durée des mesures. En revanche, le recueil des gaz expirés dans une chambre de mélange permet leur analyse en continu sur de longues périodes, et est particulièrement adapté pour les mesures effectuées chez le patient sous ventilation artificielle [1].

LES ÉQUATIONS DE MESURE DES ÉCHANGES GAZEUX EN CIRCUIT OUVERT

Selon le principe général énoncé précédemment,

$$\dot{V}O_2 = (\dot{V}I \times FIO_2) - (\dot{V}E \times \overline{FEO_2})$$

où $\dot{V}I$ est le volume inspiratoire par minute ou débit inspiratoire, et $\dot{V}E$ le volume expiratoire par minute ou débit expiratoire, F_I la concentration fractionnelle de gaz dans l'air inspiré, et $\overline{F_E}$ la concentration fractionnelle moyenne de gaz dans l'air expiré. Les volumes sont mesurés dans les conditions ambiantes (ATPS) et

ramenés aux conditions standard (STPD). Pour les calculs de $\dot{V}O_2$, il est important de tenir compte du fait que le débit expiratoire est différent du débit inspiratoire : ceci est expliqué par une $\dot{V}CO_2$ habituellement inférieure à la $\dot{V}O_2$. Il est cependant possible de se limiter à la mesure d'un seul de ces débits, $\dot{V}E$ le plus souvent, si l'on admet selon l'hypothèse de Haldane, que le débit d'azote entrant dans l'organisme est égal au débit d'azote sortant. La formule de calcul de la $\dot{V}O_2$ devient alors :

$$\dot{V}O_2 = \dot{V}E \times [(1 - \overline{FECO_2}) \times (\overline{FIO_2} - \overline{FEO_2})] / (1 - FIO_2)$$

Le calcul de la production de gaz carbonique est plus simple : il suffit de mesurer le débit expiré et la fraction expirée mélangée de CO_2 :

$$\dot{V}CO_2 = \dot{V}E \times \overline{FECO_2}$$

On peut alors calculer le quotient respiratoire :

$$QR = \dot{V}CO_2 / \dot{V}O_2$$

Au total, les calculs d'échanges gazeux nécessitent l'acquisition de quatre paramètres : la mesure d'un débit ($\dot{V}E$), et de trois concentrations fractionnelles (FIO_2 , $\overline{FEO_2}$ et $\overline{FECO_2}$).

LES INSTRUMENTS DE MESURE

La mesure du débit expiré est réalisée au moyen d'anémomètres dont l'étalonnage doit tenir compte des caractéristiques physiques du mélange gazeux analysé, ou par dilution d'un gaz traceur.

Les concentrations fractionnelles d'oxygène et de gaz carbonique sont déterminées à partir de la mesure des pressions partielles, ce qui nécessite de prendre en compte la pression de vapeur d'eau et la pression totale au site d'analyse (pression atmosphérique + pression de ventilation).

LES SYSTÈMES COMPACTS DÉVELOPPÉS PAR L'INDUSTRIE

Le système Datex Deltatrac, le plus utilisé, analyse l'oxygène au moyen d'une cellule paramagnétique différentielle rapide, et le gaz carbonique au moyen d'une cellule infrarouge. Le débit de gaz est mesuré de façon originale par une technique de dilution. Ce système peut être relié à un *canopy* ou à un respirateur.

Quel que soit le système utilisé [15], toute anomalie dans les paramètres recueillis ne doit pas de prime abord être attribuée au patient, mais doit faire rechercher un problème de calibration [2], ou de méthodologie d'utilisation.

LES DIFFICULTÉS PARTICULIÈRES LIÉES À LA VENTILATION ARTIFICIELLE

Si l'utilisation de capteurs précis et fidèles est nécessaire à la mesure des échanges gazeux, elle n'est pas suffisante. Les conditions d'étude sont tout aussi importantes.

LES CONDITIONS SE RAPPORTANT À LA FIO_2

La mesure de la $\dot{V}O_2$ est très sensible aux erreurs de mesure des concentrations fractionnelles d'oxygène. L'effort doit donc porter sur la mesure de la FIO_2 et de la $\overline{FEO_2}$. La précision de la mesure de la FIO_2 est augmentée par l'insertion d'une boîte de mélange à haute pression située en amont du respirateur afin de stabiliser la composition du mélange gazeux inspiré [1]. L'utilisation de respirateurs modernes à valves numériques impose de vérifier préalablement la stabilité de la FIO_2 [17].

La deuxième contrainte porte sur la valeur de la FIO_2 . En effet, l'erreur statistique de la mesure de la $\dot{V}O_2$ croît avec l'augmentation de la FIO_2 . En pratique, les mesures d'échanges gazeux devraient être réservées aux patients respirant un mélange gazeux de FIO_2 inférieure à 0,6.

VARIATION DES STOCKS CORPORELS DE CO_2

L'assimilation des grandeurs ventilatoires de $\dot{V}O_2$ et de $\dot{V}CO_2$ à des grandeurs métaboliques n'est licite que si les stocks d'oxygène et de gaz carbonique entre l'étape cellulaire et l'étape pulmonaire sont constants. Cette condition est aisément remplie pour l'oxygène dont les stocks endogènes sont faibles, d'environ 1,5 l, et rapidement échangeables. En revanche, les stocks de gaz carbonique sont beau-

coup plus importants, de l'ordre de 120 l, et constitués de différents compartiments possédant leur propre vitesse d'échange. Les variations des stocks de gaz carbonique peuvent être ainsi de grande amplitude et surtout de cinétique plus lente que celle des stocks d'oxygène.

Ainsi, l'équilibre entre la production cellulaire de gaz carbonique et la $\dot{V}CO_2$ respiratoire n'est obtenu qu'une vingtaine de minutes après une modification du niveau de la ventilation alvéolaire. En pratique, une stabilité ventilatoire d'environ 30 à 120 min [3] est indispensable pour interpréter valablement une valeur de $\dot{V}CO_2$ et donc de QR.

De même, en cas de variation brutale du niveau métabolique comme au cours d'un frisson, la différence de dynamique des stocks de CO_2 et d' O_2 conduit à des variations de QR qui ne sont pas le reflet du QR métabolique au niveau cellulaire.

En pratique, toute interprétation correcte de la mesure de l'élimination du CO_2 et donc du QR suppose que les stocks de CO_2 soient constants et donc que la pression partielle de CO_2 en fin d'expiration (PET CO_2) le soit également, soient constants. Ceci nécessite des enregistrements de longue durée permettant d'acquérir une valeur de QR correspondant au QR métabolique.

VARIATION DES STOCKS D'AZOTE

L'hypothèse de Haldane permettant de calculer le débit inspiré à partir du débit expiré n'est plus valable s'il existe une variation des stocks d'azote de l'organisme. Cette circonstance est observée lors des variations de FIO_2 , puisque toute modification de FIO_2 entraîne nécessairement une variation de la FIN_2 . En pratique, l'erreur commise sur la valeur de la $\dot{V}O_2$ est inférieure à 3 %, 15 min après une variation de FIO_2 .

FACTEURS NON SPÉCIFIQUES

De nombreux artefacts peuvent perturber les mesures effectuées chez des malades de réanimation ventilés artificiellement : en particulier, les épisodes de toux, de désadaptation du malade au respirateur, ou les aspirations trachéales. Les grandeurs mesurées au cours de ces périodes doivent être exclues pour réaliser les calculs physiologiques [1].

Les événements quotidiens auxquels sont confrontés les malades (examen physique ou radiologique, toilette, arrivée de visiteurs) peuvent augmenter les niveaux de base de $\dot{V}O_2$ et de $\dot{V}CO_2$ de 20 à 35 % [19]. Il est donc nécessaire de veiller aux conditions dans lesquelles ces mesures sont effectuées. Compte tenu des difficultés de mesure au long cours, quelques auteurs ont montré qu'un enregistrement de 2 h effectué en état stationnaire, pouvait permettre d'évaluer les dépenses énergétiques quotidiennes [12]. Cependant, en pratique, seuls les enregistrements de longue durée, en minimisant l'influence de ces facteurs non spécifiques, permettent de prendre en compte les valeurs mesurées pour les calculs de calorimétrie indirecte. Enfin, pour un même patient, ces valeurs peuvent varier jusqu'à plus de 30 % d'un jour à l'autre, en particulier en fonction de la température corporelle.

LA MESURE DES DÉPENSES ÉNERGÉTIQUES ET DES DÉBITS D'OXYDATION DES SUBSTRATS ÉNERGÉTIQUES

MESURE DES DÉPENSES ÉNERGÉTIQUES

Lorsque seule la $\dot{V}O_2$ est mesurée, la dépense énergétique (DE) peut être calculée à partir de l'équation :

$$DE = \dot{V}O_2 \times 4,85$$

dans laquelle DE est exprimé en kcal.min⁻¹ et $\dot{V}O_2$ en l.min⁻¹.

Cette valeur de 4,85 kcal.l⁻¹ d'oxygène consommé (ou 20,3 kJ) représente la quantité d'énergie produite lors de la consommation de 1 l d'oxygène, ou équivalent calorique moyen par litre (STPD) d'oxygène (ELO₂). Cependant, cet équivalent calorique est variable en fonction des différents substrats oxydés [7, 11]. Si la composition des substrats oxydés est prise en compte, l'équation de l'équivalent calorique moyen de l'oxygène devient alors :

$$ELO_2 = 4,686 + 1,096 (QRnP - 0,707)$$

dans laquelle QRnP est le quotient respiratoire non protéique, dépendant uniquement de l'oxydation des glucides et des lipides.

Cette formule nécessite donc de mesurer simultanément la $\dot{V}O_2$, la $\dot{V}CO_2$ et l'excrétion azotée urinaire.

La dépense énergétique exprimée en $\text{kcal}\cdot\text{min}^{-1}$ est alors calculée selon l'équation suivante [10] :

$$DE = [4,686 + 1,096 (\text{QRnP} - 0,707)] \times \dot{V}O_{2\text{nP}} + 4,485 \dot{V}O_2\text{P}$$

dans laquelle QRnP est le quotient respiratoire non protéique, $\dot{V}O_{2\text{nP}}$, la consommation d'oxygène non liée à l'oxydation des protéines (liée à l'oxydation des glucides et des lipides) et $\dot{V}O_2\text{P}$, la consommation d'oxygène liée à l'oxydation des protéines.

Même si certains auteurs proposent de négliger la mesure de l'excrétion azotée urinaire dans la mesure où l'erreur relative est peu importante, de l'ordre de 4 %, en cas de situation non catabolique, cette information est facilement disponible en milieu de réanimation. Il convient de plus de corriger la quantité d'azote éliminé sous forme d'urée urinaire par les variations du pool d'urée corporelle qui peuvent être très importantes puisque l'espace de distribution de l'urée est de 60 % du poids du corps. Sur le plan pratique, le recueil des urines doit être effectué sur la glace afin d'éviter un métabolisme lié aux bactéries.

MESURE DES DÉBITS D'OXYDATION DES SUBSTRATS ÉNERGÉTIQUES LES ÉQUATIONS

Les équations de stœchiométrie permettent de calculer en $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$, la consommation d'oxygène et la production de gaz carbonique résultant de l'oxydation complète des différents substrats énergétiques [9, 10, 14] :

$$\dot{V}O_2 = (746 \dot{c}) + (2\,019 \dot{i}) + (966 \dot{p})$$

$$\dot{V}CO_2 = (746 \dot{c}) + (1\,427 \dot{i}) + (774 \dot{p})$$

dans lesquelles :

\dot{c} = débit de glucose oxydé ($\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$)

\dot{i} = débit de lipides oxydés ($\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$)

\dot{p} = débit de protéines oxydées ($\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$)

Ces calculs donnent des débits apparents d'oxydation et ne prennent pas en compte les échanges métaboliques entre les différents substrats tels que la néoglucogenèse ou la lipolyse d'origine lipidique.

LES APPLICATIONS DE LA CALORIMÉTRIE INDIRECTE EN RÉANIMATION

La disponibilité de systèmes compacts de calorimétrie indirecte développés par l'industrie, simplifiant la tâche de l'utilisateur, renouvelle l'intérêt de cette technique en réanimation dans au moins trois directions.

LA MESURE DE LA $\dot{V}O_2$

MESURE DU COÛT EN OXYGÈNE DE LA VENTILATION

Des modifications de $\dot{V}O_2$ surviennent lors du sevrage du respirateur. Il a été montré que la $\dot{V}O_2$ augmente quand un patient, soumis à une ventilation contrôlée, est mis en ventilation spontanée. Inversement, il a été rapporté que des patients de réanimation en ventilation spontanée, ont une $\dot{V}O_2$ diminuée quand ils sont placés en ventilation contrôlée. Ces variations de consommation d'oxygène provoquées par des variations de travail respiratoire représentent le coût en oxygène de la ventilation. Ce dernier représente moins de 5 % de la $\dot{V}O_2$ totale de l'organisme chez le sujet normal, mais peut s'élever à plus de 20 % chez le malade de réanimation, ou en période postopératoire. Ainsi, le coût en oxygène de la ventilation spontanée en période postopératoire de chirurgie digestive majeure est de l'ordre de 10 %, et peut être pris en charge par une ventilation spontanée avec une aide inspiratoire de 15 cmH_2O [18].

RELATION ENTRE LA CONSOMMATION D'OXYGÈNE ET LE TRANSPORT D'OXYGÈNE AU COURS DES DIFFÉRENTS ÉTATS PATHOLOGIQUES EN RÉANIMATION

La consommation d'oxygène de l'organisme n'est normalement dépendante du transport d'oxygène (TO_2) qu'au-dessous d'une valeur critique du TO_2 estimée à environ $8 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$. Ceci correspond à un coefficient maximal d'extraction ($\dot{V}O_2/\text{TO}_2$) d'environ

0,7. De nombreuses études ont rapporté que certaines situations pathologiques (comme au cours du choc septique, ou chez les patients ayant une hypertension artérielle pulmonaire ou une insuffisance ventriculaire gauche, ainsi que chez ceux présentant un syndrome de détresse respiratoire de l'adulte), s'accompagnent d'une diminution de l'extraction d'oxygène au niveau tissulaire avec élévation du seuil critique du TO_2 et dépendance anormale de la $\dot{V}O_2$ vis-à-vis du TO_2 . Ces résultats seraient particulièrement importants pour la conduite thérapeutique, et l'augmentation du TO_2 pourrait donc être un objectif prioritaire.

Un des problèmes de ces études rapportant une dépendance anormale de la $\dot{V}O_2$ vis-à-vis du TO_2 est que ces deux grandeurs ont été calculées à partir du débit cardiaque et des contenus artériels et veineux en oxygène, par la technique de Fick. Dans ces conditions, la $\dot{V}O_2$ et le TO_2 partagent des variables communes (le débit cardiaque et le contenu artériel en oxygène), ce qui peut conduire à une surestimation mathématique de leur liaison.

En effet, plusieurs études ont vérifié la réalité de ce couplage mathématique en comparant la relation $\text{TO}_2 - \dot{V}O_2$, la $\dot{V}O_2$ étant calculée, d'une part par la technique de Fick, d'autre part par calorimétrie indirecte, ce qui élimine les variables communes. Ces travaux ont effectivement montré que la dépendance de $\dot{V}O_2$ calculée par technique de Fick vis-à-vis de TO_2 était absente lorsque la $\dot{V}O_2$ était calculée par calorimétrie indirecte [16]. Ainsi, les situations de dépendance suggérées par les nombreuses études antérieures étaient probablement artefactuelles quand elles résultaient de mesures de $\dot{V}O_2$ réalisées par la méthode de Fick.

MESURE DE LA CONSOMMATION D'OXYGÈNE PULMONAIRE

La $\dot{V}O_2$ calculée par la technique de Fick ne mesure pas la consommation d'oxygène du tissu pulmonaire, alors que la $\dot{V}O_2$ calculée par calorimétrie indirecte mesure la consommation d'oxygène totale de l'organisme. Ainsi, la différence entre ces deux valeurs permet d'estimer la consommation d'oxygène du poumon. Il a été montré, que cette dernière était négligeable chez des animaux témoins, mais comptait pour 13 à 15 % de la consommation totale d'oxygène en cas de pneumopathie infectieuse expérimentale [13]. Ce résultat souligne le risque de sous-estimer la consommation d'oxygène totale de l'organisme si la $\dot{V}O_2$ est calculée par la technique de Fick en cas de syndrome inflammatoire pulmonaire.

MESURE DES DÉPENSES ÉNERGÉTIQUES

Les équations de Harris et Benedict sont classiquement utilisées pour prédire les DE des patients de soins intensifs. Même si la prédiction a été améliorée par l'utilisation de nouvelles équations modifiées, parfois associées à une échelle de correction en fonction de la pathologie, elle restait approximative. Ainsi, il a été montré chez trente-six patients de réanimation présentant un score Apache II moyen de 22, que les dépenses énergétiques prédites par ces équations sous-estimaient les dépenses énergétiques calculées par calorimétrie indirecte de 37 à 89 % [8]. Cette même méthode a par ailleurs montré que, chez ce type de patient, l'utilisation de catécholamines augmentait la $\dot{V}O_2$ de 6 à 15 % pour la dopamine, de 10 à 21 % pour la noradrénaline, et de 13 à 37 % pour l'adrénaline, en fonction des doses administrées [4].

RETENTISSEMENT RESPIRATOIRE DE LA NUTRITION ET DEVENIR DES SUBSTRATS ÉNERGÉTIQUES

L'oxydation complète d'une calorie apportée sous forme de glucose produit 199 ml de gaz carbonique, soit environ 20 % de plus qu'une calorie apportée sous forme d'émulsion lipidique de triglycérides à chaînes longues (TCL) (161 ml de CO_2) ou sous forme d'émulsion mixte de TCL et de triglycérides à chaînes moyennes (TCM) (165 ml de CO_2). Cette charge en CO_2 d'origine nutritionnelle peut entraîner une augmentation de la ventilation alvéolaire afin de maintenir constante la valeur de la PaCO_2 . Plusieurs auteurs ont donc proposé de remplacer une partie de l'apport glucidique par un apport lipidique afin de diminuer le risque d'hypercapnie observé chez le patient aux capacités d'adaptation ventilatoire limitées, comme l'insuffisant respiratoire chronique, ou lors de tentatives du sevrage de la ventilation mécanique.

En fait, les études menées par calorimétrie indirecte ont montré que lorsque l'apport énergétique était égal aux dépenses énergétiques, il n'y avait pas de variation de $\dot{V}CO_2$ ni de ventilation minute,

quel que soit le rapport glucidolipidique de la nutrition, et quel que soit le type d'émulsion lipidique apporté. À ce niveau d'apport énergétique, la modification du rapport glucidolipidique de l'apport n'était pas suivie de la même variation du rapport glucidolipidique de l'oxydation. Si bien que lorsque l'apport calorique lipidique était important, égal à 70 % de l'apport énergétique non protidique, 22 % de ces lipides étaient stockés sous forme de graisse [6].

Par l'utilisation de méthodologies identiques, il a été montré que chez des patients de réanimation hyperglycémiques et hyperinsulinémiques, le remplacement d'une partie des lipides administrés sous forme de TCL par des TCM, ne modifiait pas le débit d'oxydation des lipides, ni des hydrates de carbone [5].

CONCLUSION

La calorimétrie indirecte appliquée au malade de réanimation ventilé mécaniquement n'est pas seulement un outil de recherche clinique. C'est aussi un outil d'aide à la thérapeutique : elle permet de cerner le profil métabolique de sujets présentant une pathologie donnée, ou recevant une thérapeutique particulière; elle permet d'améliorer au mieux, les apports énergétiques des patients sévèrement agressés, d'autant plus qu'ils nécessitent une nutrition artificielle de longue durée. C'est enfin un outil pédagogique incomparable.

Cependant, cette technique nécessite une rigueur méthodologique stricte afin que les résultats obtenus soient représentatifs d'un fait réel.

RÉFÉRENCES

- [1] Bertrand O, Viale J, Annat G, Sebes F, Delafosse B, Percival C, Bui-Xuan B, Motin J. Mass spectrometer system for long term continuous measurements of VO_2 and VCO_2 during artificial ventilation. *Med Biol Eng Comput*, 1986, 24 : 174-181.
- [2] Bracco D, Chioloro R, Pasche O, Revelly J. Failure in measuring gas exchange in the ICU. *Chest*, 1995, 107 : 1406-1410.
- [3] Brandi LS, Bertolini R, Santini L, Cavani S. Effects of ventilator resetting on indirect calorimetry measurement in the critically ill surgical patient. *Crit Care Med*, 1999, 27 : 531-9.
- [4] Chioloro R, Flatt J, Revelly J, Jéquier E. Effects of catecholamines on oxygen consumption and oxygen delivery in critically ill patients. *Chest*, 1991, 100, 1676-1684.
- [5] Delafosse B, J Viale, C Pachiaudi, S Normand, J Goudable, Y Bouffard, G Annat, O Bertrand. Long- and medium chain triglycerides during parenteral nutrition in critically ill patients. *Am J Physiol*, 1997, 272 : E550-E555.
- [6] Delafosse B, Viale JP, Tissot S, Normand S, Pachiaudi C, Goudable J, Bouffard Y, Annat G, Bertrand O. Effects of glucose : lipid ratio and type of lipid on substrate oxidation rate in patients. *Am J Physiol*, 1994, 267 : E775-E780.
- [7] Ferrannini E. The theoretical bases of indirect calorimetry : a review. *Metabolism*, 1988, 3 : 287-301.
- [8] Flancbaum L, Choban P, Sambucco S, Verducci J, Burge J. Comparison of indirect calorimetry, the Fick method, and prediction equations in estimating the energy requirements of critically ill patients. *Am J Clin Nutr*, 1999, 69 : 461-466.
- [9] Frayn K. Calculation of substrate oxidation rates *in vivo* from gaseous exchange. *J Appl Physiol*, 1983, 55 : 628-634.
- [10] Jéquier E. Measurement of energy expenditure in clinical nutritional assessment. *JPEN*, 1987, 11 : 865-895.
- [11] Jéquier E, Acheson K, Schutz Y. Assessment of energy expenditure and fuel utilization in man. *Ann Rev Nutr*, 1987, 7 : 187-208.
- [12] Joosten K, Verhoeven J, Hop W, Hazelet J. Indirect calorimetry in mechanically ventilated infants and children : accuracy of total daily energy expenditure with 2 hour measurements. *Clin Nutr*, 1999, 18 : 149-152.
- [13] Light R. Intrapulmonary oxygen consumption in experimental pneumococcal pneumonia. *J Appl Physiol*, 1988, 64 : 2490-2495.
- [14] Livesey G, Elia M. Estimation of energy expenditure, net carbohydrate utilization, and net fat oxidation and synthesis by indirect calorimetry : evaluation of errors with special reference to the detailed composition of fuels. *Am J Clin Nutr*, 1988, 47 : 608-628.
- [15] Makita K, Nunn JF, Royston B. Evaluation of metabolic measuring instruments for use in critically ill patients. *Crit Care Med*, 1990, 18 : 638-44.
- [16] Phang P, Cunningham K, Ronco J, Wiggs B, Russel J. Mathematical coupling explains dependence of oxygen consumption on oxygen delivery in ARDS. *Am J Respir Crit Care Med*, 1994, 150 : 318-323.
- [17] Tissot S, Delafosse B, Bertrand O, Bouffard Y, Viale J, Annat G. Clinical validation of the Deltatrac monitoring system in mechanically ventilated patients. *Intens Care Med*, 1995, 21 : 149-153.
- [18] Viale J, Annat G, Bouffard Y, Delafosse B, Bertrand O, Motin J. Oxygen cost of breathing in postoperative patients. Pressure support ventilation vs continuous positive airway pressure. *Chest*, 1988, 93 : 506-509.
- [19] Weissman C, Kemper M, Damask M, Askanazi J, Hyman A, Kinney J. Effect of routine intensive care interactions on metabolic rate. *Chest*, 1984, 86 : 815-818.