



Full Length Research Paper

Modélisation de la Dépense Énergétique avec la Méthode de l'Eau Doublement Marquée

Papa Macoumba Faye^{1,2*}, Djicknack Dione^{1,2} ; Moussa Hamady Sy^{1,2}, Alassane Traoré^{1,2}, Jean Paul Latyr Faye^{1,2}, Ababacar Sadikhe Ndao².

¹Institut de Technologie de Nucléaire appliqué (ITNA), Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Fann, Sénégal.

²Département de physique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Fann, Sénégal.

Received April 2024 – Accepted June 2024



*Corresponding author. ... papamacoumba.faye@ucad.edu.sn

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License.

Résumé :

La méthode de l'eau doublement marquée (DLW) est une technique nucléaire avancée de référence dans les études sur la dépense énergétique humaine et animale à long terme, basée sur le principe des isotopes stables de l'hydrogène-2 (²H ou D) et de l'oxygène-18 (¹⁸O). Dans cette étude nous utilisons un modèle mathématique mis au point par Schoeller et adopté par l'AIEA pour estimer la dépense énergétique totale (TEE) de cinq (05) sujets à qui nous il a été administrés de l'eau doublement marquée par un enrichissement en isotopes stables de deutérium (²H) et d'oxygène-18 (¹⁸O). Les taux d'élimination de ces isotopes (KO pour ¹⁸O et KH pour ²H) ainsi que les volumes de distribution (NO et NH) ont été déterminés en analysant des échantillons d'urine collectés.

Des variations significatives ont été observées dans les taux d'élimination (KO et KH) et les ratios KO/KH entre les sujets. La TEE a été estimée entre 1330,9 et 2396,1 kcal/jour, avec une précision variant de 0,7 % à 7,4 % selon le sujet.

Ce modèle mathématique fournit un cadre robuste pour convertir les données isotopiques en estimations précises de la TEE, essentiel pour évaluer l'équilibre énergétique et les taux métaboliques dans divers contextes de recherche. Cette technique offre des données précieuses pour la recherche en nutrition, en métabolisme et en physiologie de l'exercice et constitue un outil puissant pour l'évaluation des programmes de nutrition.

Mots clés: Eau doublement marquée, Dépense énergétique totale, Isotopes stables, Deutérium, Oxygène-18, Modélisation mathématique, Taux métabolique.

Cite this article:

Papa Macoumba Faye, Djicknack DIONE; Moussa Hamady Sy, Alassane Traoré, Jean Paul Latyr Faye, Ababacar Sadikhe Ndao. (2024). Modélisation de la Dépense Énergétique avec la Méthode de l'Eau Doublement Marquée. Revue RAMReS – Sci. Appl. & de l'Ing., Vol. 6(1), pp. 9-16. ISSN 2630-1164.

1. Introduction

La modélisation précise de la dépense énergétique humaine est cruciale pour la compréhension des besoins nutritionnels individuels, la gestion des maladies métaboliques et l'optimisation de la performance physique. Parmi les méthodes avancées et fiables pour évaluer la dépense énergétique, la méthode de l'eau doublement marquée (DLW) se distingue par sa précision et sa capacité à fournir des mesures continues sur une période prolongée.

La DLW utilise simultanément deux isotopes stables, le ²H (deutérium) et le ¹⁸O (oxygène-18), introduits dans l'organisme sous forme d'eau marquée. Ces isotopes se mélangent avec l'eau corporelle et sont éliminés principalement sous forme d'eau et de dioxyde

de carbone. En mesurant les concentrations isotopiques dans les fluides biologiques, il est possible de calculer les taux d'élimination de chaque isotope, fournissant ainsi une estimation précise de la production de dioxyde de carbone et de la dépense énergétique totale [1, 2].

Pour couvrir les données de la DLW, divers modèles mathématiques ont été développés. L'un des modèles les plus utilisés est celui de Schoeller, qui repose sur les principes de conservation et d'équilibre isotopique. Ce modèle ajuste les valeurs mesurées pour refléter les variations individuelles dans le métabolisme énergétique, fournissant ainsi une estimation de la dépense énergétique moyenne sur une période spécifiée [3, 4].

Le modèle de conversion utilise les mesures d'élimination des isotopes pour estimer la dépense énergétique. Il s'appuie sur les taux de production d'eau corporelle totale mesurés et les valeurs d'équilibre isotopique dans l'urine pour calculer la production de dioxyde de carbone. Ce processus permet non seulement d'évaluer la dépense énergétique de base, mais aussi de déterminer la contribution relative des différents substrats énergétiques utilisés par l'organisme [5, 6].

La méthode DLW présente plusieurs avantages significatifs, notamment sa non invasive, sa capacité à fournir des données précises sur une longue période et sa polyvalence dans divers contextes métaboliques. Elle est particulièrement adaptée pour évaluer la dépense énergétique dans des environnements naturels, offrant ainsi une perspective réaliste sur les besoins énergétiques quotidiens des individus [7,8].

L'objectif de cette étude est de modéliser la dépense énergétique de différents sujets en utilisant la méthode de l'eau doublement marquée et le modèle mathématique développé par Schoeller. Nous avons évalué plusieurs paramètres, y compris la masse corporelle totale, la masse grasse, la masse maigre, la production de dioxyde de carbone et la dépense énergétique totale. En utilisant des modèles de conversion précis, nous avons cherché à déterminer les variations individuelles et à fournir une compréhension détaillée des besoins énergétiques.

2. Matériels et méthodes

2.1. Préparation et Administration de la Dose doublement marquée.

La dose d'eau doublement marquée a été préparée en mélangeant 150 ml de $H_2^{18}O$ avec 75 ml de 2H_2O . Chaque sujet a reçu une dose d'eau doublement marquée calculée en fonction de sa masse corporelle voir figure 1, mesurée au début de l'étude. Cette méthode permet de tracer le métabolisme énergétique des individus en utilisant les isotopes stables du deutérium et de l'oxygène-18.



Figure 1 : Administration de la dose

2.2. Collecte des Échantillons d'Urine

Des échantillons d'urine ont été prélevés avant l'administration de la dose isotopique pour établir une

ligne de base (LOW). Après l'administration de la dose, des échantillons d'urine post-dose ont été recueillis quotidiennement pendant une période de 14 jours. Les échantillons d'urine sont représentés sur la figure 2. Ces échantillons ont fourni des données essentielles sur l'absorption de la dose, ainsi que sur les horaires d'administration et de collecte.



Figure 2 : Échantillons d'urine.

Après la collecte par l'équipe du laboratoire de nutrition, les échantillons d'urine ont été stockés à $-20^{\circ}C$ jusqu'à leur analyse. Tous les matériaux utilisés pour la préparation des échantillons, y compris les bouteilles contenant les doses et les tubes pour l'analyse, ont été soigneusement séchés pour éviter toute contamination.

2.3. Équipements et Préparation des Standards

Les balances utilisées pour mesurer les doses ont une précision de 0,0001 g, et les pipettes étaient des pipettes à volume variable jetables pour assurer des mesures précises. Des standards internationaux fournis par l'Agence internationale de l'énergie atomique ont été utilisés pour garantir l'exactitude des analyses. Des standards secondaires ont été préparés en ajoutant des quantités précises de deutérium et de ^{18}O à de l'eau du robinet.

2.4. Méthodes d'Analyse.

Traditionnellement, les rapports d'abondance isotopique sont mesurés par un spectromètre de masse à rapport isotopique (IRMS). Cette technique précise est essentielle pour analyser les isotopes dans un échantillon, ce qui permet d'approfondir notre compréhension de nombreux phénomènes, tels que les processus métaboliques, les changements climatiques, l'origine des matériaux, et les réactions chimiques dans des domaines variés comme les géosciences, l'environnement, la médecine, l'archéologie, la criminologie, et la nutrition [9].

Dans le spectromètre, les échantillons sont convertis en gaz tels que H_2 , CO_2 , N_2 ou CO , en fonction de leur composition chimique et sont ionisés par interaction avec un faisceau d'électrons dans la source d'ions. Les ions ainsi générés sont focalisés à travers des lentilles, accélérés par une haute tension, puis traversent un

champ magnétique avant d'être détectés par des coupelles de Faraday. La trajectoire des ions, ainsi que les ions qui atteignent le détecteur, sont déterminés par la tension d'accélération et l'intensité du champ magnétique. Plusieurs collecteurs sont utilisés pour mesurer simultanément l'intensité de plusieurs rapports ioniques. Ce processus est essentiel pour une analyse isotopique précise dans divers domaines scientifiques. L'IRMS permet la mesure précise des rapports isotopiques pour différents éléments, notamment le carbone ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$), l'azote ($^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$), l'oxygène ($^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$), et l'hydrogène ($^1\text{H}/^2\text{H}$) [10].

Les rapports isotopiques sont généralement exprimés en notation delta (δ), qui reflète la différence en pour mille (‰) entre le rapport isotopique de l'échantillon et celui d'une norme internationale de référence. Cette mesure est utilisée dans l'analyse des sources de pollution, l'étude des cycles biogéochimiques, la traçabilité des produits alimentaires, et bien d'autres applications [11]. La formule générale pour calculer la valeur delta est la suivante :

$$\delta = \left(\frac{R_{\text{échant}}}{R_{\text{std}}} - 1 \right) * 1000 \quad [\text{Eq. 1}]$$

Où

$R_{\text{échant}}$ est le rapport isotopique mesuré de l'échantillon et R_{std} est le rapport isotopique de l'étalon de référence. Dans cette étude, les abondances isotopiques de ^2H et de ^{18}O ont été mesurées à l'aide d'un spectromètre de masse à ratio isotopique Thermo Scientific (Delta V Advantage) équipé d'une banquette à gaz, de vannes à gaz, d'un auto-échantillonneur et d'un plateau d'échantillons. Les échantillons et les standards, en volumes de 200 μl , ont été injectés dans les tubes correspondants placés sur le plateau d'échantillons.

2.4.1. Analyse du ^2H

Pour l'analyse du ^2H , l'échantillon a été équilibré avec du H_2 à l'intérieur de chaque tube pendant 40 minutes, à l'aide d'un mélange gazeux ($\text{He} + 0,2 \text{ \% } \text{H}_2$) injecté directement dans le tube. Le spectromètre de masse, équipé d'une source d'ionisation par impact électronique à 70 eV, a utilisé des détecteurs à coupe de Faraday pour surveiller les signaux des ions m/z 2 ($^1\text{H}/^1\text{H}$) et m/z 3 ($^2\text{H}/^1\text{H}$) du gaz H_2 .

2.4.2. Analyse du ^{18}O

Pour l'analyse du ^{18}O , les tubes ont été remplis et équilibrés avec un mélange gazeux ($\text{He} + 0,3 \text{ \% } \text{CO}_2$) pendant environ 24 heures. Les faisceaux ioniques m/z 44 ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$) et m/z 46 ($^{12}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$) du gaz CO_2 ont ensuite été surveillés lors du processus de mesure.

2.4.3. Calculs des Taux d'Élimination des Isotopes

Les taux d'élimination du deutérium (k_d) et de l'oxygène-18 (k_o) sont déterminés à partir des mesures isotopiques dans les échantillons d'urine collectés après l'administration de la dose. Ces taux sont cruciaux, car ils permettent de quantifier l'oxydation des nutriments et donc la production de CO_2 . Les taux d'élimination des isotopes ^2H et ^{18}O ont été calculés en utilisant les

équations développées par Schoeller et van Santen en 1982 [12].

$$[2\text{H}] = [2\text{H}]_0 e^{-k_d t} \quad [\text{Eq. 2}]$$

$$[18\text{O}] = [18\text{O}]_0 e^{-k_o t} \quad [\text{Eq. 3}]$$

où

- $[^2\text{H}]_0$ et $[^{18}\text{O}]_0$ sont les concentrations initiales des isotopes immédiatement après l'administration de la dose.
- k_d et k_o sont les constantes de taux d'élimination pour le deutérium et l'oxygène-18, respectivement.
- t est le temps.

2.4.4. Calcul des Espaces de Distribution

Les espaces de distribution des isotopes ^2H (NH) et ^{18}O (NO) sont calculés à partir des équations décrites par Speakman et al en 1993 [13] qui dépendent des constantes de taux d'élimination (k_d et k_o) et de la dose administrée (D).

$$N_H = \frac{D}{\frac{1}{k_d} - \frac{1}{k_o}} \quad [\text{Eq. 4}]$$

$$N_o = \frac{D}{\frac{1}{k_o} - \frac{1}{k_d}} \quad [\text{Eq. 5}]$$

Où D est la dose d'isotope administrée. Ces calculs sont cruciaux pour déterminer la quantité totale de l'eau corporelle (TBW) et l'espace de distribution des isotopes dans le corps.

2.4.5. Calcul de la Production de Dioxyde Carbone

À partir des espaces de distribution et des taux d'élimination, la production de dioxyde de carbone ($r\text{CO}_2$) est calculée. Cette étape est essentielle, car elle représente le principal déterminant de la dépense énergétique totale, basée sur l'oxydation des substrats énergétiques.

La production de dioxyde de carbone ($r\text{CO}_2$) a été estimée à partir de l'équation développée par Schoeller en 1988, mais elle a été simplifiée par AIEA en 2007 [14].

$$r\text{CO}_2 = 0,455 \times \text{TWB} \times (1,007k_o - 1,041k_d) \quad [\text{Eq. 6}]$$

Cette formule permet de déterminer le volume de CO_2 produit par jour en utilisant les différences de taux d'élimination des isotopes et les espaces de distribution

2.4.6. Calcul de la Dépense Énergétique Totale

Selon Ravussin et Bogardus [15], la TEE est calculée en utilisant la formule suivante, qui incorpore le $r\text{CO}_2$ et le quotient respiratoire (R), une mesure de la contribution relative des glucides et des lipides à la

production d'énergie. La dépense énergétique totale (TEE) a été calculée par :

$$TEE = 22,4 \times rCO_2 \times (1,10 + 3,90/R) \quad [Eq.7]$$

Où R est le quotient respiratoire, une mesure de l'utilisation relative des glucides et des lipides pour la production d'énergie. Cette équation intègre les taux de production de CO₂ pour estimer la dépense énergétique journalière en kilocalories.

3. Résultats et Discussion

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer la dépense énergétique totale en utilisant des isotopes stables de l'eau (²H ou D et ¹⁸O) par spectrométrie de masse isotopique, en appliquant un modèle mathématique. Cinq enfants, comprenant un garçon et

quatre filles âgés de 9 à 12 ans, ont été recrutés à Dakar pour participer à l'étude. Le poids corporel moyen du groupe était de $34,32 \pm 8,94$ kg, sans changement observé dans le poids corporel au cours de l'étude.

Pour garantir la précision des mesures, une courbe d'étalonnage a été créée en utilisant des solutions standards ILS23, ILS5, WATER et LOW, dont les enrichissements en deutérium (D) et ¹⁸O étaient connus. Ces solutions ont été analysées au début et à la fin de la séquence d'analyse. Afin d'améliorer la précision des calculs, une méthode de multi-échantillonnage a été utilisée, impliquant la mesure du rapport isotopique sur une période de 14 jours.

Les concentrations de D et ¹⁸O ont été calculées en partie par million (ppm) excédentaire pour chaque sujet. Les concentrations résultantes sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1. - Concentration du D et 18O en ppm xs

Subjets	SE0212		SE0215		SE0218		SE0338		SE0437	
Concentration	ppm xs									
Isotopes	D	O	D	O	D	O	D	O	D	O
BaseLine	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PD1	180,0	340,5	214,8	407,0	183,7	337,5	177,2	340,5	155,8	293,2
PD2	159,4	291,8	187,1	340,9	149,3	261,9	156,1	290,4	152,1	279,2
PD3	139,8	247,1	169,6	298,3	131,0	218,8	134,5	241,0	114,1	196,9
PD4	119,2	202,4	155,2	266,7	114,8	184,8	122,4	210,9	103,5	181,6
PD5	108,9	178,8	141,5	237,0	96,0	149,5	106,4	177,2	98,7	163,4
PD6	92,7	147,3	130,2	209,8	88,2	123,8	95,1	155,8	85,1	135,2
PD7	79,9	121,7	118,1	181,9	71,3	103,4	82,7	132,4	75,1	116,3
PD8	64,3	93,9	106,0	159,1	64,3	88,9	74,4	108,2	65,7	97,3
PD9	48,4	66,2	95,2	137,8	49,9	65,9	65,5	95,1	59,6	86,2
PD10	47,4	65,6	80,4	110,7	49,7	64,1	56,4	81,7	49,3	67,8
PD11	43,1	56,9	68,1	89,8	25,7	31,6	50,0	66,6	42,6	57,2
PD12	38,8	50,2	67,6	87,9	33,1	40,1	44,6	58,5	37,1	47,5
PD13	33,7	42,7	58,6	73,6	28,4	32,7	39,8	54,3	31,8	39,6
PD14	29,3	36,9	102,8	23,4	23,6	26,6	34,1	38,1		

L'enrichissement en deutérium (²H) et en ¹⁸O a été mesuré dans des échantillons d'urine prélevés auprès de cinq sujets sur une période de deux semaines. Les résultats ont montré une diminution linéaire des valeurs d'enrichissement, comme illustré dans la représentation logarithmique de la Figure 3. Une forte corrélation a été observée sur les enrichissements en ²H et ¹⁸O dans les 14 échantillons d'urine. Les droites de régression pour ces deux isotopes ont démontré une linéarité remarquable, avec des coefficients de corrélation R² proches de 1, comme résumés dans le Tableau 3. Les valeurs des coefficients R², comprises entre 0,990 et

0,999, indiquent une corrélation linéaire solide, suggérant que les points de données sont alignés de manière cohérente avec les droites de régression correspondantes.

Ces valeurs de R² élevées reflètent une excellente linéarité entre les variables analysées. Dans le contexte de notre recherche, cela indique que les modèles de régression utilisés pour évaluer la cinétique de disparition du deutérium et de l'oxygène-18 dans l'urine sont très bien adaptés aux données observées. Une forte linéarité renforce la fiabilité des résultats et augmente la confiance dans les conclusions tirées de l'étude.

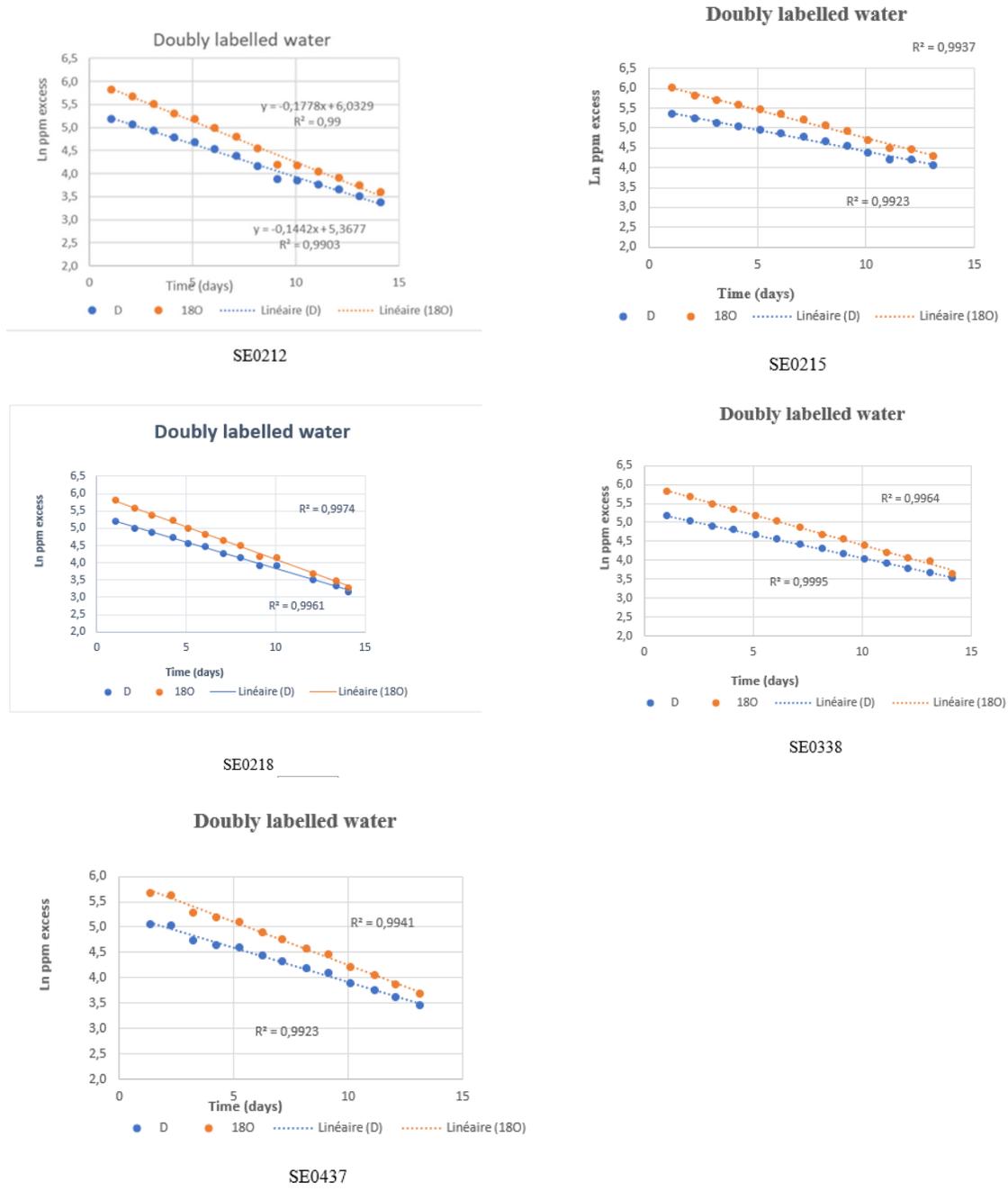


Figure 3 : droites de régression de l'enrichissement de D et 18O

L'équation de la droite de régression linéaire, $y = ax + b$, nous permet de déterminer les constantes des taux de disparition du deutérium (K_H) et de l'oxygène-18 (K_O), ainsi que de calculer la dépense énergétique totale (TEE) des sujets, comme présentés dans le Tableau 2. Le coefficient de pente des droites de régression linéaire (a) correspond aux constantes de taux de disparition des deux isotopes. La Figure 4 montre les erreurs ou résidus associés aux données présentées

Tableau 2 : Les équations des droites de régression du D et 18O et leur's coefficients de corrélation

Sujets	Isotopes	Y	R ²
SE0212	18O	-0,1778x + 6.0329	0.990
	D	-0.1442x + 5.3677	0.990
SE0215	18O	-0.1418x + 6.1699	0.993
	D	-0.1071x + 5,4899	0.992
SE0218	18O	-0.1962x + 5.084	0.997
	D	-0.1692x + 4,381	0.993
SE0338	18O	-0.1609x + 6.0086	0.996
	D	-0.1253x + 5.311	0.999
SE0437	18O	-0.1699x + 5.945	0.994
	D	-0.1344x + 5.2593	0.992

La Figure 4 montre les erreurs ou résidus associés aux données présentées

La distribution des résidus, centrée autour de zéro, indique des erreurs généralement faibles, ce qui suggère que le modèle mathématique utilisée pour générer les prédictions est bien aligné avec les données réelles. La proximité des résidus par rapport à zéro

renforce la confiance dans la précision des prévisions par rapport aux mesures observées. De plus, le fait que les résidus se situent entre 1 et -1 souligne la fiabilité du modèle. Cela indique que les erreurs sont relativement petites et dans une plage acceptable, validant ainsi la précision du modèle.

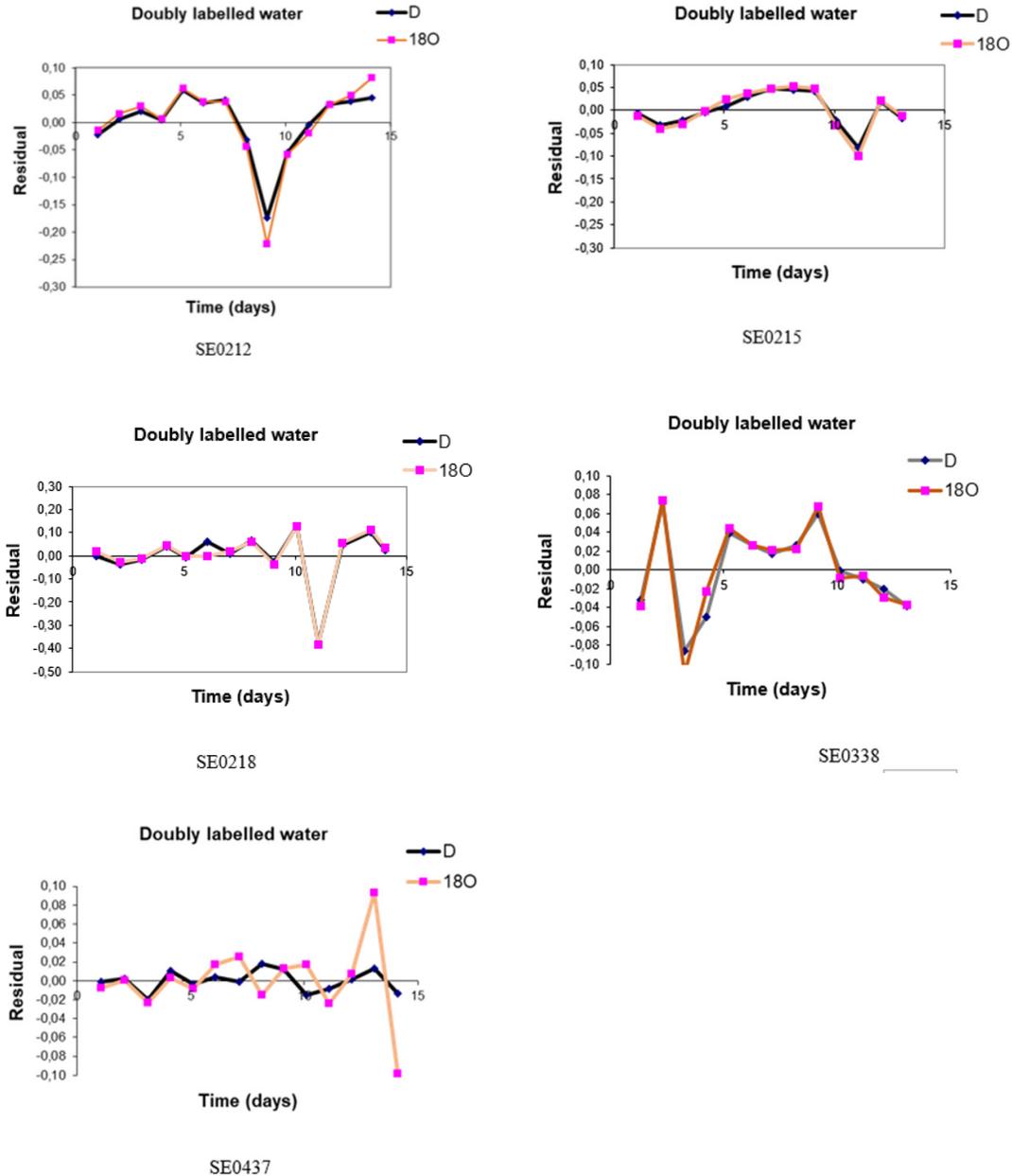


Figure 4 : Erreurs résiduelles de l'enrichissement de D et ¹⁸O

Le Tableau 3 présente les résultats trouvés sur les taux d'élimination et les calculs de dépense énergétique pour cinq sujets, identifiés par leurs codes SE0212, SE0215, SE0218, SE0338 et SE0437.

Les espaces de distribution de l'eau, représentés par N_H (espace de distribution du deutérium) et N_O (espace de distribution de l'oxygène-18), varient considérablement entre les sujets.

Ces variations dans la distribution de l'eau se reflètent également dans les constantes de taux d'élimination

pour l'oxygène-18 (K_O) et le deutérium (K_H), qui montrent aussi des différences interindividuelles. Le sujet SE0218 présente le taux de K_O le plus élevé (0,1962 jour⁻¹), tandis que le sujet SE0215 a le taux de K_H le plus bas (0,1071 jour⁻¹). Ces différences peuvent être attribuées à des variations dans les niveaux d'activité physique et le métabolisme basal des sujets.

Pour garantir l'exactitude des mesures isotopiques, les ratios N_H/N_O et K_O/K_H ont été utilisés. Les ratios N_H/N_O pour tous les sujets sont proches de 1, ce qui indique une bonne corrélation entre les espaces de distribution du deutérium et de l'oxygène-18. Les ratios K_O/K_H varient de 1,232 à 1,323, ce qui est conforme aux attentes pour des sujets de ce groupe d'âge. Ces ratios confirment la précision et la cohérence des mesures.

De plus, la masse corporelle totale (TBW) et la masse maigre (FFM) varient significativement entre les sujets. Le sujet SE0437 a une TBW de 23,40 kg et une FFM de 30,97 kg, valeurs beaucoup plus élevées que celles des autres sujets. Ces différences influencent directement les taux d'élimination des isotopes et les estimations de la dépense énergétique totale (TEE).

Les valeurs de masse grasse (Fat) montrent également une variabilité notable entre les sujets. Le sujet SE0215 a une masse grasse de 28,82 kg, tandis que le sujet

SE0218 en a seulement 8,42 kg. Cette variation impacte les besoins énergétiques et les taux métaboliques des individus.

Le taux de production de CO_2 (rCO_2) est un indicateur clé de la dépense énergétique. Le sujet SE0437 présente le taux de rCO_2 le plus élevé (18,82 moles/jour), ce qui est en accord avec sa masse corporelle plus importante et sa TBW plus élevée. En revanche, le taux de rCO_2 le plus bas est observé chez le sujet SE0218 (10,48 moles/jour).

Ainsi, la dépense énergétique totale (TEE) varie de 1 330,9 kcal/jour pour le sujet SE0218 à 2 396,1 kcal/jour pour le sujet SE0437. Ces différences sont corrélées aux variations observées dans la TBW, la FFM et le rCO_2 . Le faible coefficient de variation (CV%) pour la TEE, notamment 0,7% pour le sujet SE0338 et 1,7% pour le sujet SE0212, démontre la précision et la fiabilité de la méthode.

Le CV% pour la TEE souligne la précision des estimations de la dépense énergétique. Notamment, le sujet SE0338 présente la plus faible variation (0,7%), suggérant une estimation très précise de la TEE. En revanche, le sujet SE0215 montre une variation plus élevée (7,4%), indiquant une variabilité potentiellement due à des facteurs individuels ou à des variations de mesure.

Tableau 3. Constantes de vitesse K_O , K_N , rapports K_O/K_H , l'espace de distribution N_H , N_O , Eau Totale du Corps (TBW), Masse Maigre (FFM), Graisse, Production de Dioxyde de Carbone (rCO_2) et Dépense Énergétique Totale (TEE)

Subjects	SE0212	SE0215	SE0218	SE0338	SE0437
N_H (g)	15361	13944	13077	16627	24438
N_O (g)	14911	13540	12927	15847	23481
K_O (jour ⁻¹)	0,1778	0,1418	0,1962	0,1609	0,1699
K_H (jour ⁻¹)	0,1442	0,1071	0,1609	0,1253	0,1344
N_H/N_O	1,030	1,029	1,011	1,049	1,040
K_O/K_H	1,233	1,323	1,232	1,284	1,264
TBW (Kg)	14,78	13,42	12,70	15,85	23,40
FFM(Kg)	19,25	17,48	16,48	20,64	30,97
Fat (Kg)	10,15	28,82	8,42	9,36	10,83
rCO_2 (moles/ jour)	11,07	10,81	10,48	12,92	18,82
TEE (kcal/d jour)	1409,9	1376,0	1330,9	1644,6	2396,1
TEE Error (CV%)	1,7	7,4	2,5	0,7	2,6

Les résultats révèlent une variabilité interindividuelle significative dans les mesures isotopiques et les estimations de la dépense énergétique. La méthode employée s'est avérée fiable et précise, comme l'indiquent les faibles CV% pour la plupart des sujets. Ces variations peuvent être attribuées aux différences de composition corporelle, de métabolisme basal et de niveaux d'activité physique des sujets. Les données obtenues sont cruciales pour comprendre les besoins énergétiques et les dépenses métaboliques chez les enfants et les adolescents, fournissant ainsi des informations précieuses pour des interventions nutritionnelles et sanitaires ciblées.

4. Conclusion

Cette étude démontre l'efficacité de la méthode de l'eau doublement marquée (DLW) dans la modélisation précise de la dépense énergétique totale (TEE) chez l'humain. En utilisant des isotopes stables de deutérium (2H ou D) et d'oxygène-18 (^{18}O), nous avons pu estimer avec précision les taux d'élimination et les volumes de distribution de ces isotopes, permettant ainsi une évaluation robuste de la production de dioxyde de carbone et de la TEE chez cinq sujets.

Les résultats ont révélé des variations significatives dans les taux d'élimination et les ratios entre les sujets, soulignant l'importance de la prise en compte des différences individuelles dans l'estimation de la dépense énergétique. Cette étude confirme que la méthode DLW, associée à ce modèle mathématique

approprié, constitue un outil essentiel pour la recherche en nutrition et en métabolisme. Elle offre des perspectives prometteuses pour l'évaluation des besoins énergétiques dans diverses populations et contextes, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents à l'équilibre énergétique et à la santé humaine

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude envers les membres du Laboratoire Atomes Lasers et de l'Institut de Technologie nucléaire appliquée pour leurs commentaires et leurs échanges

REFERENCES

- [1] Schoeller, D. A. Measurement of energy expenditure in free-living humans by using doubly labeled water. *Journal of Nutrition*, 118(11), 1278-1289, 1988.
- [2] Speakman, J. R. *Doubly labelled water : theory and practice*. Springer Science & Business Media, 1997.
- [3] *Handbook of Stable Isotope Analytical Techniques*, Volume-I P.A. de Groot (Editor) Elsevier B.V. All rights reserved. 92 p, 2004
- [4] Gehre M, Geilmann H, Richter J, Werner RA, Brand WA. *Rapid Commun. Mass Spectrom*; 18: 265 , 2004
- [5] Blanc S, Colligan AS, Trabulsi J, Harris T, Everhart JE, Bauer D, Schoeller DA, J. *Appl. Physiol*. 92: 1036, 2002
- [6] Wilkinson, D.J. Historical and contemporary stable isotope tracer approaches to studying mammalian protein metabolism. *Mass Spectrom Rev* [Epublication ahead of print version], 2016.
- [7] Ravussin, E., & Bogardus, C. A brief overview of human energy metabolism and its measurement. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 49(5), 869-871, 1989.
- [9] Prentice, A. M., & Coward, W. A. The doubly-labelled-water technique for measuring energy expenditure: technical recommendations for use in humans. *European Journal of Clinical Nutrition*, 38(2), 183-191, 1984.
- [10] Bowen, G. J. Isoscapes: Spatial Pattern in Isotopic Biogeochemistry. In *Encyclopedia of Geochemistry* (2nd ed., pp. 661-668), 2019.
- [11] Wassenaar, L. I., & Hobson, K. A. Comparative equilibration and online technique for determination of non-exchangeable hydrogen of keratins for use in animal ecological studies. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 39(3), 211-217, 2003.
- [12] Coplen, T. B. Guidelines and recommended terms for expression of stable-isotope-ratio and gas-ratio measurement results. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 25(17), 2538-2560. doi:10.1002/rcm.5129, 2011.
- [13] Schoeller, D.A., van Santen, E. Measurement of energy expenditure in humans by doubly labeled water method. *Journal of Applied Physiology*, 53(4), 955-959, 1982.
- [14] Speakman, J.R., Nair, K.S., Goran, M.I. (1993). Revised equations for calculating CO₂ production from doubly labeled water in humans. *American Journal of Physiology*, 264(6), E912-E917.
- [15] International Atomic Energy Agency (IAEA). *Assessment of Body Composition and Total Energy Expenditure in Humans Using Stable Isotope Techniques*. IAEA Human Health Series No. 3, 2009.
- [16] Ravussin, E., Bogardus, C. Relationship of genetics, age, and physical fitness to daily energy expenditure and fuel utilization. *American Journal of Clinical Nutrition*, 49(5), 968-975. 1989.