

Mémoire de Maîtrise en médecine No 4472

Mesure du stress oxydatif dans une population de sportifs d'élite

Etudiante

Weible Louise

Tuteur

Dr Gremion Gérald

Département de l'appareil locomoteur

Expert

Dr Zufferey Pascal

Service de rhumatologie

Lausanne, 11.12.2017

Abstract

Introduction

Il y a bientôt 40 ans fut publié le premier article mettant en évidence un état de stress oxydatif induit par l'exercice physique. Depuis, de multiples études ont permis de mieux caractériser tant la production des radicaux libres que les mécanismes de défense et d'adaptation de l'organisme face à ceux-ci. Jusqu'à présent, l'unique moyen de doser le niveau de stress oxydatif d'un individu est de recourir à des mesures indirectes via un dosage sanguin. Présente depuis peu sur le marché européen, une nouvelle machine, le spectrophotomètre, propose de mesurer la concentration d'oligoéléments et de métaux lourds ainsi que le stress oxydatif par spectrophotométrie, soit un procédé non invasif. L'objectif de cette étude est d'établir une validation de la technique basée sur le spectrophotomètre. La démarche consiste à quantifier en utilisant un spectrophotomètre le stress oxydatif chez des sportifs professionnels de combiné nordique. En parallèle, nous mesurons la motivation et la fatigue psychique selon une échelle POMS (Profile of Mood State). Nous tentons de corriger le stress oxydatif par le biais de compléments alimentaires et observons les impacts sur le POMS. Des résultats concluants fourniraient un argument en faveur de cette technique non invasive.

Méthodologie

Deux groupes sont formés. Le premier regroupe les athlètes tandis que le second est composé des membres du staff pour servir de groupe témoin. Par la suite, deux séries de mesures sont effectuées à trois mois d'intervalle, soit une première en août 2016 lors de la préparation physique estivale à haute charge et une deuxième en novembre 2016, juste avant le début des épreuves de coupe du monde. Les conditions d'entraînement des athlètes au moment des mesures sont similaires afin de réduire les biais au maximum. Chaque série de mesures comprend un bilan par spectrophotomètre ainsi qu'une mesure de la fatigue psychique via une échelle POMS déterminée par le sportif lui-même puis interprétée selon des intervalles standardisés adaptés à la charge d'entraînement. Sur la base des résultats des premières mesures, les athlètes reçoivent une prescription de compléments alimentaires et de chélateurs adaptés à leurs carences, leurs taux de métaux lourds et leur niveau individuel de stress oxydatif afin de corriger au mieux celui-ci. Le groupe témoin suit, quant à lui, une diète habituelle. La seconde série de mesures est effectuée trois mois plus tard afin d'établir un bilan de l'efficacité de la supplémentation orale.

Résultats

Nous remarquons une importante variabilité au niveau des résultats obtenus par spectrophotomètre avec un facteur de variation s'élevant jusqu'à 3.4. 1 seul des 7 athlètes substitués présente une amélioration de son évaluation POMS suite aux 3 mois de substitution ce qui nous pousse à conclure qu'une supplémentation systématique en oligoéléments ne semble pas être la solution idéale pour diminuer le stress oxydatif et ainsi optimiser la récupération. Au niveau des carences, une efficacité moyenne de 78.95% est constatée, avec une efficacité individuelle variant entre 67% et 100% selon l'oligoélément ce qui reste satisfaisant à condition que les valeurs obtenues par le spectrophotomètre soient fiables. En observant individuellement les oligoéléments supplémentés, on remarque que ceux dont les carences sont les plus importantes sont ceux qui bénéficient le plus des compléments alimentaires prescrits. Ceci nous oriente préférentiellement vers une substitution réservée aux carences les plus sévères uniquement. La chélation par *Laminaria japonica* semble également être bénéfique sur la teneur en métaux lourds. L'effet bénéfique reste néanmoins minime et n'indique donc pas une chélation systématique chez des athlètes professionnels. Pour terminer, les valeurs de ROS et de défenses antioxydantes nous interpellent. En effet, celles-ci divergent et leur interprétation reste contradictoire ce qui nous pousse à remettre en cause les valeurs obtenues via le spectrophotomètre.

Conclusion

Sur la base de ce travail, nous ne pouvons valider l'utilisation du spectrophotomètre en tant que mesure non invasive du stress oxydatif. La variabilité des valeurs obtenues ainsi que les diverses incohérences rencontrées au cours de l'interprétation des résultats nous conduisent à douter de la fiabilité de l'appareil. De plus, une tendance à l'amélioration naturelle chez le groupe contrôle nous pousse à revoir à la baisse les schémas de substitutions des carences.

Table des matières

Introduction	4
<i>Contexte</i>	4
<i>Objectifs</i>	7
Méthodologie	7
<i>Substitution</i>	8
Résultats	9
<i>POMS</i>	10
<i>Spectrophotomètre</i>	10
<i>Analyse statistique</i>	16
Analyse des résultats et discussion	17
Conclusion	20
<i>Conclusions liées à l'étude</i>	20
<i>Limites de l'étude</i>	21
Références	22

Mots-clés : stress oxydatif, spectrophotométrie, mesure non invasive

Introduction

Contexte

Il y a bientôt 40 ans fut publié le premier article mettant en évidence un état de stress oxydatif induit par l'exercice physique (1). Depuis, de nombreux articles ont validé qu'une augmentation du métabolisme aérobie secondaire à une activité physique est source de radicaux libres d'oxygène (ROS). Les trois plus connus sont l'anion superoxyde (O_2^-), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et le radical hydroxyle ($OH^\bullet$). En présence de Fe^{2+} (ou Cu^+), le peroxyde d'hydrogène produit des radicaux hydroxyles $OH^\bullet$ via la réaction de Fenton. Ces radicaux libres fortement instables résultent en partie d'une perte de 2-5% de l'oxygène utilisé pour la production mitochondriale d'ATP, élément central du métabolisme énergétique. Outre l'activité mitochondriale, des enzymes telles que les NAD(P)H-oxydase, xanthine oxydase, lipoxigénase, cyclooxygénase, phospholipase A_2 ou encore la P450 oxygénase participent aussi à la production de ROS. Les radiations ou l'inflammation par le biais de la phagocytose y contribuent également. Les radicaux libres ainsi produits sont hautement réactifs et peuvent nuire au fonctionnement de l'organisme par divers biais : induction de cytokines pro inflammatoires, lésions de l'ADN, impacts négatifs sur le fonctionnement des cellules musculaires, peroxydation lipidique ou oxydation des thiols. D'autres radicaux libres tels que le peroxynitrite sont formés à partir de monoxyde d'azote (NO). Ils sont regroupés sous l'appellation RNS (reactive nitrogen species). Ne semblant pas jouer un rôle majeur dans la fatigabilité musculaire, ceux-ci ne seront de ce fait pas abordés ici.

Pour se protéger des effets néfastes de l'oxygène, l'organisme a mis en place des systèmes de défense antioxydants classifiables en deux catégories ; des enzymes catalysant une réaction éliminant les ROS et des composés non enzymatiques. La première catégorie comprend notamment la glutathion peroxydase, la superoxyde dismutase et la catalase. Les composés non enzymatiques regroupent des vitamines (A, C, E, bêta-carotène), certains oligoéléments (sélénium, cuivre, zinc) et des protéines (glutathion, albumine, ferritine, bilirubine). En situation physiologique, la balance ROS-mécanismes antioxydants est maintenue mais lors d'une situation de stress, telle qu'une activité physique intense, celle-ci peut se déséquilibrer en faveur des radicaux libres. On parle dès lors de stress oxydatif.

Comme cité précédemment, les ROS interagissent avec la fonction des cellules musculaires. Des études ont cherché à mesurer l'impact des radicaux libres sur la force musculaire maximale d'un muscle au repos. Il a été démontré qu'une force musculaire maximale nécessite une production basale de ROS qui potentialise la libération de calcium hors du réticulum endoplasmique des myofibrilles. Lorsqu'on ajoute de la superoxyde dismutase ou de la catalase, la force générée diminue. A contrario, un taux trop élevé de ROS, dépassant les capacités antioxydantes des cellules musculaires lisses et de se fait s'accumulant, est corrélé à une diminution de la force musculaire maximale, on parle alors de fatigue musculaire aigue (3). En effet, à concentration élevée, les ROS inhibent la sensibilité au calcium et interfèrent avec la pompe musculaire Na^+/K^+ . Par ailleurs, d'autres études ont mis en évidence des changements dans l'environnement des fibres musculaires induits par le sport, ces

changements les prédisposant à une plus grande production de ROS. Un exemple : l'augmentation de la consommation d'oxygène par les cellules musculaires lors d'un effort diminue la pression partielle d'oxygène ce qui peut provoquer une augmentation du taux de radicaux libres produits. Une élévation de la température dans les cellules ou une augmentation de la pression partielle de CO₂ abaissant le pH sont d'autres exemples potentialisant la production de ROS (4). Les thiols sont également attaqués par les radicaux libres d'oxygène. Ces molécules, parmi lesquelles le glutathion ou la cystéine, possèdent des propriétés réductrices et jouent un rôle majeur dans l'homéostasie redox des cellules ainsi que comme cofacteur d'enzymes oxydo-réductrices. Beaucoup de molécules antioxydantes telles que la vitamine E, la vitamine C ou encore la bilirubine possèdent des groupements thiols. L'oxydation des thiols peut altérer la fonction biologique des thioprotéines en modifiant par exemple leur structure. Beaucoup de protéines musculaires sont touchées par ces interactions thiol-disulfide, que ce soit le canal calcique RyR, la SERCA, la troponine, la myosine, l'actine, la tropomyosine ou la Na⁺/K⁺ ATPase. Des études ont montré que la fatigue musculaire secondaire aux radicaux libres pourrait être médiée via ces molécules altérées par des thiols oxydés. En effet, lors d'une étude réalisée sur des cyclistes ou coureurs réguliers, une administration préalable de N-acétylcystéine, un antioxydant qui réduit les ROS avant que ceux-ci n'aient le temps d'agir sur les groupes thiols, augmente le taux de cystéine et de glutathion dans le muscle et retarde la fatigue musculaire (5).

C'est en 1982 qu'a été menée la première étude suggérant que ces radicaux libres produits secondairement à l'activité physique n'étaient pas uniquement nuisibles mais pouvaient également jouer un rôle clé dans l'adaptation des cellules musculaires à l'exercice (6). Depuis, de nombreuses autres études in vitro ont validé la théorie de Kevin Davies et de ses collègues en démontrant l'effet des ROS sur l'expression génique adaptative (7-10). Pour ne citer qu'un exemple de celles-ci, il fut mis en évidence sur des gastrocnémiens de rats qu'une augmentation des radicaux libres activait une voie de signalisation cellulaire impliquant des MAPK, NF-κB et aboutissant à une augmentation de l'expression d'enzymes antioxydantes telles que la superoxyde dismutase. Lors d'ajout d'allopurinol, une molécule inhibant l'activité de la xanthine oxydase, la voie de signalisation ne s'activait pas. Les ROS endossent dans ce cas de figure le rôle de messagers intracellulaires inducteurs de la réponse adaptative à l'exercice.

Il est aujourd'hui reconnu que les ROS influencent l'expression génique via trois grands axes : la réponse inflammatoire, neuroendocrine et oxydative à l'exercice. Prenons par exemple la réponse inflammatoire. Un effort important est susceptible d'activer une cascade inflammatoire altérant la structure des myofibrilles via une infiltration de phagocytes. Afin d'éliminer les débris cellulaires, ceux-ci produisent des radicaux libres et des enzymes protéolytiques. Paradoxalement, cette phagocytose va dans un deuxième temps activer des facteurs de transcription induisant une prolifération cellulaire du tissu musculaire et responsables de l'adaptation hypertrophique à l'exercice. Comme dans tout système méticuleusement équilibré, si le signal inflammatoire se chronicise (activité physique excessive sans repos adéquat), la balance se dérègle et les dommages tissulaires persistent. De la même manière, la réponse neuroendocrine est elle aussi ambivalente. D'un côté, un effort intense résulte en une augmentation des catécholamines circulantes, induisant une augmentation de l'activité sympathique et du métabolisme oxydatif musculaire. Une élévation du taux d'hormones thyroïdiennes est également observable, se traduisant par un hypermétabolisme et une hyperactivité mitochondriale. De l'autre côté, les radicaux libres produits suite à cet effort intense activent des voies de signalisation cellulaires permettant une sensibilité augmentée à l'insuline ainsi que la création d'un environnement anabolique. Il est donc crucial de maintenir un taux de ROS optimal, celui-ci favorisant la mise en place d'une réponse adaptative de l'organisme à l'effort sans toutefois basculer dans l'excès, ce qui induirait des lésions tissulaires (14).

L'idée d'avoir recours à des antioxydants exogènes est déjà ancienne. Il est aujourd'hui fréquent que les athlètes aient recours à des suppléments en divers substances antioxydantes afin d'aider à maintenir la balance oxydative lors de périodes d'entraînements intensifs. La question qui émerge toutefois aujourd'hui est de savoir si cette supplémentation ne serait pas au contraire néfaste pour les performances de par sa propension à diminuer la réponse adaptative. Les conclusions actuelles sont mitigées mais diverses études ont mis en évidence certains effets délétères de ces suppléments. Par exemple, une étude basée sur l'observation de la réponse adaptative secondaire à une supplémentation en vitamines C et E a démontré une inhibition de l'induction des facteurs de transcription PGC-1 α (responsable de la biogenèse mitochondriale), PPAR γ (augmentant la sensibilité à l'insuline) et de divers ARN messagers d'enzymes antioxydantes. Il est primordial de s'assurer de la maîtrise de ces risques lorsqu'on souhaite instaurer une supplémentation antioxydante et de privilégier une alimentation saine et équilibrée, riche en aliments antioxydants au lieu de concentrés moléculaires. Un autre facteur essentiel est de cibler des courtes périodes d'entraînements intensifs pour lesquelles une supplémentation serait plus à même d'être bénéfique (15).

A l'heure actuelle, il est possible de quantifier le stress oxydatif via la mesure de l'activité des enzymes antioxydantes, le dosage de divers antioxydants à bas poids moléculaire, des thiols, des TBARS (substances réactives à l'acide thiobarbiturique, mesure indirecte de la peroxydation lipidique), ou du rapport GSH/GSSG (glutathion réduit/oxydé) pour n'énumérer que quelques méthodes. Toutes ces mesures nécessitent une prise de sang et sont de ce fait qualifiées d'invasives (11-12). Face à un manque de méthodes rapides non invasives, une nouvelle machine a été développée et mise sur le marché, basée sur une mesure optique à l'aide d'un spectrophotomètre.

Son développement est intimement lié à celui du programme spatial russe. En effet, il fut remarqué qu'à leur retour sur Terre, les cosmonautes présentaient entre autres des atteintes osseuses, musculaires ou même oculaires. Différentes études furent également menées sur les astronautes de la NASA présentant des conclusions similaires telles qu'une diminution de la densité osseuse ou un turnover des protéines musculaires accéléré. Il s'avère qu'en réponse à la microgravité, la synthèse protéique augmente mais pas suffisamment pour compenser un catabolisme protéique bien plus important. Ce turnover est entre autres corrélé aux apports énergétiques abaissés des astronautes et résulte en une diminution des performances physiques. Il est également reconnu qu'un apport énergétique adéquat en protéines couplé à une supplémentation en vitamine D est nécessaire pour maintenir la densité osseuse lors des voyages dans l'espace (13). Pour pallier à ces inadéquations dans l'alimentation de ses cosmonautes, le programme spatial russe se mit à utiliser la spectrophotométrie afin de quantifier les différents oligoéléments présents dans les aliments, ceci dans le but d'optimiser au maximum les propriétés nutritives des repas ingérés au cours des vols.

La méthode dont il est ici question se base sur le même concept. Le principe de la mesure se base sur l'émission de 4 faisceaux lumineux compris entre 380-750nm qui illuminent alternativement 4 zones différentes réparties dans chacun des 4 quadrants de la main. En atteignant la couche basale de l'épiderme, les faisceaux lumineux interagissent avec les différents oligoéléments qui s'y trouvent. L'absorption différenciée des diverses longueurs d'onde utilisées par les différents oligoéléments conduit à une réflexion de la lumière proportionnelle à la concentration de ceux-ci. Les valeurs sont analysées dans une centrale au Luxembourg et les résultats rendus dans les minutes qui suivent le test. Traitées par des algorithmes complexes, les différentes concentrations des 20 oligoéléments et 14 métaux lourds mesurés permettent d'évaluer l'état de stress oxydatif de l'organisme sous la forme d'un pourcentage d'agression oxydante couplé à un pourcentage de protection antioxydante. Doté

depuis 2014 d'un marquage CE médical, cet appareil est de plus en plus utilisé en Europe ainsi qu'au-delà du continent européen.

Objectifs

L'objectif de cette étude est d'établir une validation de cette nouvelle technique de mesure spectrophotométrique. La démarche consiste à quantifier en utilisant un spectrophotomètre le stress oxydatif chez des sportifs professionnels de combiné nordique. En parallèle, nous mesurerons la motivation et la fatigue psychique selon une échelle POMS (Profile of Mood State). Nous tenterons de corriger le stress oxydatif par le biais de compléments alimentaires et observerons les impacts sur le POMS. Des résultats concluants fourniraient un argument en faveur de cette technique non invasive présente depuis peu sur le marché européen.

Méthodologie

Deux groupes sont formés. Le premier regroupe les athlètes tandis que le second est composé des membres du staff pour servir de groupe témoin. Par la suite, deux séries de mesures sont effectuées à trois mois d'intervalle, soit une première en août 2016 lors de la préparation physique estivale à haute charge et une deuxième en novembre 2016, juste avant le début des épreuves de coupe du monde. Les conditions d'entraînement des athlètes au moment des mesures sont similaires afin de réduire les biais au maximum (camp d'entraînement à haute intensité dans le cadre de la préparation à la saison de compétition). Les athlètes évoluent de ce fait dans le même environnement ce qui permet de diminuer les biais dus aux variations alimentaires. Chaque série de mesures comprend un bilan par spectrophotomètre, technique non-invasive visant à déterminer le niveau de stress oxydatif des sportifs par spectrophotométrie ainsi qu'une mesure de la fatigue psychique via une échelle POMS déterminée par le sportif lui-même. Les mesures par spectrophotomètre sont effectuées par le Dr. Capt de la clinique Lémanique à Lausanne et son équipe à l'aide de leur spectrophotomètre oligoscan. Les valeurs du POMS sont par la suite interprétées grâce à des intervalles standardisés adaptés à la charge d'entraînement, soit un premier intervalle correspondant aux sportifs d'élite et un second adapté au niveau d'entraînement des différents amateurs constituant le groupe contrôle. Sur la base des résultats des premières mesures, les athlètes reçoivent une prescription de compléments alimentaires et de chélateurs adaptés à leurs carences, leurs taux de métaux lourds et leur niveau individuel de stress oxydatif afin de corriger celui-ci au maximum. Les compléments alimentaires sont fournis par le Dr. Capt et son équipe. Le groupe témoin suit, quant à lui, une diète habituelle sans aucune modification. La seconde série de mesures est effectuée trois mois plus tard dans des conditions d'entraînement similaires afin d'établir un bilan de l'efficacité de la supplémentation orale. Les différents oligoéléments supplémentés varient selon les carences individuelles de chaque athlète mais englobent dans leur ensemble : le Magnésium, Phosphore, Cuivre, Iode ainsi que le Silicium ; ces divers oligoéléments ayant été sélectionnés de par leur rôle essentiel dans la balance antioxydante et le métabolisme énergétique. De plus, afin de ne pas surcharger les prises quotidiennes, il s'avère nécessaire de ne sélectionner qu'une partie des déficits à corriger, une supplémentation élargie serait onéreuse et trop contraignante. Les athlètes dont les taux de métaux lourds sont élevés ont également suivi une cure par Metout, soit un agent chélateur phytothérapique.

Substitution

Le tableau 1 ci-dessous, présente brièvement des propriétés essentielles des différents oligoéléments supplémentés dans le cadre de notre travail.

Magnésium	Cofacteur essentiel à plus de 300 systèmes enzymatiques, le magnésium agit tant sur la glycolyse que sur le métabolisme aérobie ou anaérobie, son action étant directe en tant qu'activateur enzymatique ou alors indirecte via le complexe Mg-ATP (nécessaire par exemple à la phosphorylation oxydative). Une carence en magnésium résulte également en une diminution d'apport nucléotidique et interagit de ce fait négativement sur la prolifération cellulaire en réduisant la synthèse d'ADN et d'ARN. Par ailleurs, une carence peut induire des arythmies (rôle du magnésium dans l'activité de la Na ⁺ -K ⁺ ATP-ase), des crampes musculaires, de l'hypertension ou encore des vasospasmes (une hypomagnésémie inhibant les canaux calciques et augmentant le calcium intracellulaire).
Phosphore	Présent principalement dans les os (85%), le phosphore remplit un rôle structurel important. Sous forme de phospholipide, il participe également au maintien structurel des membranes cellulaires, des nucléotides et des acides nucléiques. De plus, en agissant comme un tampon, il aide à stabiliser le pH et via son activité au sein de la phosphorylation, il active de multiples protéines et participe au métabolisme énergétique.
Cuivre	Cofacteur essentiel à l'activité d'un grand nombre de protéines agissant dans les réactions d'oxydoréduction, le cuivre est un oligoélément indispensable au contrôle du stress oxydatif. Il est, en outre, présent dans de nombreuses enzymes telles que la cytochrome C oxydase (présente dans la chaîne respiratoire), la dopamine-béta-hydroxylase (présente dans le cerveau et nécessaire à la synthèse de noradrénaline), la lysyl-oxydase (participant à la formation d'élastine et de collagène) et la SOD Cu-Zn des érythrocytes. Les déficits en cuivre se manifestent par une perturbation du métabolisme lipidique et glucidique résultant en une asthénie. Une anémie et une augmentation du stress oxydatif sont également observables.
Iode	Oligoélément exclusivement retrouvé au niveau des hormones thyroïdiennes T3 et T4, les déficits en iode sont relativement fréquents. Ils se manifestent par une fatigue accrue, une diminution de la thermogenèse, une altération cognitive, une hypercholestérolémie, une majoration du risque cardiovasculaire ainsi qu'une augmentation du risque ostéoporotique. Il est intéressant de noter une interaction entre le métabolisme iodé et celui de divers autres oligoéléments. Il a en effet été documenté qu'une carence sélénique aggrave un déficit iodé et qu'un taux sérique abaissé en zinc ou en fer sont associés à une baisse de la synthèse des hormones thyroïdiennes. Ceci est particulièrement relevant lors de l'initiation d'une supplémentation en iode, qu'il convient de compléter si nécessaire.
Silicium	Le silicium joue un rôle primordial dans la synthèse du tissu conjonctif en activant les fibroblastes nécessaires à la synthèse du collagène, de l'élastine et de l'acide hyaluronique. C'est de ce fait un élément nécessaire à la croissance tissulaire et osseuse. Il permet également d'atténuer la peroxydation lipidique en diminuant la production de malondialdéhyde. Avec le vieillissement, on observe une diminution de la teneur corporelle en silicium, qui se manifeste par une rigidification des parois artérielles, une augmentation des lésions athéromateuses ainsi qu'une accélération du vieillissement cutané et une efficacité cicatricielle appauvrie.

Metout 180	Composé principalement de Laminaria japonica, ce comprimé de phytothérapie contient également de la chlorophylline magnésienne, un antioxydant tiré de la chlorophylle. La Laminaria japonica est une algue qui fut notamment utilisée pour traiter les victimes de Tchernobyl. En effet, celle-ci possède une importante activité chélatrice permettant de diminuer efficacement les taux sériques de métaux lourds. Elle est par ailleurs riche en iode ce qui lui confère de surcroît une action de supplémentation.
------------	---

Tableau 1 : propriétés essentielles des principaux oligoéléments impliqués dans l'étude (16,17)

Résultats

Les bilans obtenus par spectrophotométrie sont présentés en 4 parties réparties sur 3 pages. Au niveau de la première page, les concentrations de 20 oligoéléments différents sont regroupées dans un tableau. Au niveau de la deuxième page, un tableau présente les concentrations de 14 métaux lourds. Au bas de cette page, on retrouve un pourcentage d'agression oxydative couplé à un pourcentage de protection antioxydante, ceux-ci sont calculés par des algorithmes se basant sur les concentrations des différents oligoéléments et leur rapport entre eux. La troisième et dernière page est composée d'une interprétation des corrélations oligo-minérales, soit une interprétation du fonctionnement de l'organisme se basant sur les valeurs obtenues précédemment. On y retrouve un pourcentage supposé refléter l'assimilation intestinale et une interprétation des fonctions cognitives, elle aussi évaluée par un pourcentage. Dans le cadre de notre travail, nous nous focalisons uniquement sur les 5 oligoéléments dont les carences respectives ont été supplémentées, les concentrations de ceux-ci ont donc été repris dans un nouveau tableau afin de faciliter la lecture des résultats. Les pourcentages de stress oxydatif et de défenses antioxydantes sont également repris dans l'analyse des résultats, tout comme la teneur en métaux lourds. Les interprétations des corrélations oligo-minérales n'ont quant à elles pas été analysées dans le cadre de cette étude. Toutes les valeurs utilisées dans le contexte de ce travail sont regroupées dans l'annexe 3.

Les bilans du spectrophotomètre oligoscan ayant servis à la réalisation de ce travail sont regroupés dans l'annexe 1.

Les évaluations POMS regroupent 65 critères correspondant à des adjectifs couvrant toute la panoplie émotionnelle. Ceux-ci sont quantifiés par les sujets sur une échelle de 1-5 (1=pas du tout, 5=extrêmement). Une fois la quantification effectuée, les 65 critères sont regroupés en 6 grandes catégories, soit : colère, confusion, dépression, fatigue, tension et énergie. A chacune de ces catégories est ainsi attribué un total de points, les différents totaux étant par la suite interprétés par rapport à une valeur moyenne de référence qui varie selon l'intensité d'entraînement fourni. Dans notre analyse, le groupe des athlètes est ainsi évalué selon une valeur représentative des sportifs d'élite alors que le groupe contrôle est analysé selon une toute autre valeur, celle d'une population de sportifs amateurs. Dans cette étude ne seront pris en compte que les niveaux d'énergie et de fatigue du POMS, susceptibles d'influencer l'état de stress oxydatif (un écart d'une unité est accepté en tant que variation standard et n'est donc pas considéré comme un changement du niveau de fatigue ou d'énergie).

POMS

Les bilans POMS remplis par les athlètes sont regroupés dans l'annexe 2.

Pour toutes les valeurs de POMS qui seront interprétées par la suite et regroupées dans le tableau 2, un code couleur a été appliqué afin de faciliter la lecture de celles-ci. En *noir*, sont regroupées les valeurs considérées dans la norme, soit des valeurs de POMS qui ne dépassent pas les moyennes standardisées. Coloré en *vert*, on retrouve les légères variations du POMS, soit un écart de moins de 1 unité comparé à la moyenne. Les variations plus significatives du POMS, allant d'un écart compris entre 1 et 4 unités seront quant à elles mises en évidence par une coloration *orangée*. Pour terminer, les variations sévères du POMS de plus de 4 unités seront reprises en *rouge*. Sous l'appellations (a) sont regroupées les valeurs récoltées en août, lors du premier bilan. (b) désigne toutes les valeurs obtenues durant le second bilan du mois de novembre.

	Fatigue	Energie
Athlète 1.a	1	26
Athlète 1.b	12	20
Athlète 2.a	3	18
Athlète 2.b	0	18
Athlète 3.a	1	21
Athlète 3.b	4	16
Athlète 4.a	2	28
Athlète 4.b	2	27
Athlète 5.a	10	21
Athlète 5.b	16	16
Athlète 6.a	1	21
Athlète 6.b	8	18
Athlète 7.a	10	24
Athlète 7.b	2	17

Tableau 2 : Résultats des évaluations faites par POMS axées sur la fatigue et l'énergie, soit les valeurs du POMS susceptibles de refléter le niveau de stress oxydatif.

Spectrophotomètre

		Limite inférieure	Limite supérieure
Magnésium	Mg	30.5	75.7
Phosphore	P	144.0	199.0
Cuivre	Cu	11.0	28.0
Iode	I	0.32	0.59
Silicium	Si	15.0	31.0

Tableau 3 : Normes des concentrations des différents oligoéléments analysés par le spectrophotomètre

Les figures 1-7 illustrent la variation relative des différents paramètres mesurés par le spectrophotomètre entre le premier et le second bilan chez les athlètes. On remarque une grande variabilité entre ceux-ci.

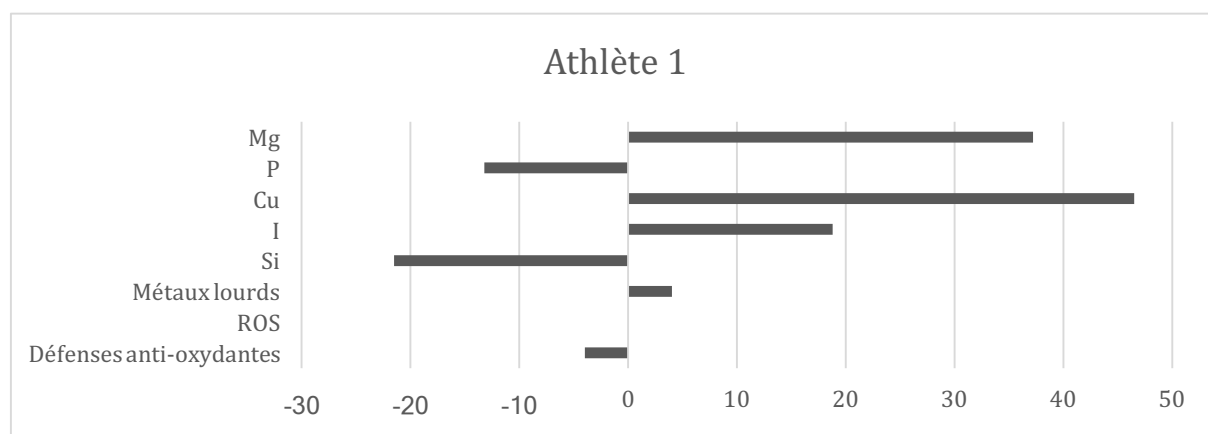


Figure 1 : Variations relatives des paramètres lors du deuxième bilan chez l'athlète 1

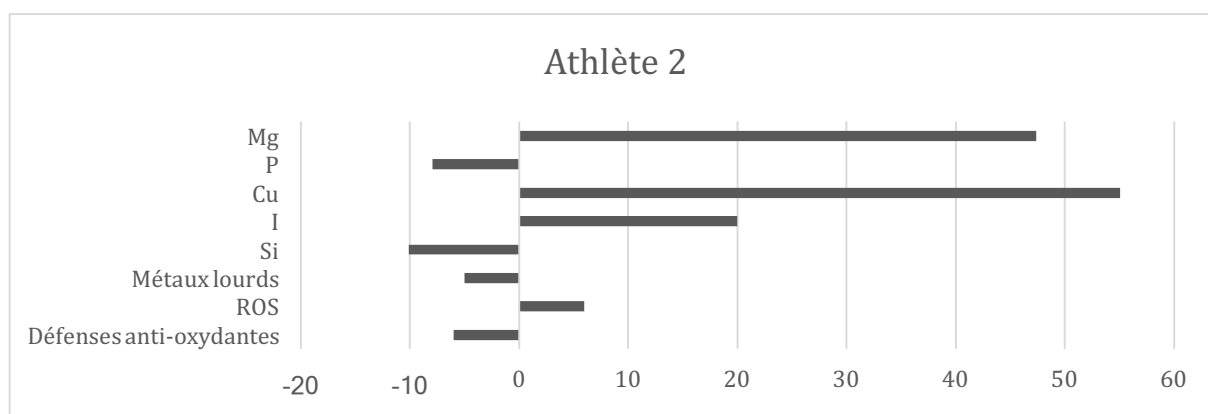


Figure 2 : Variations relatives des paramètres lors du deuxième bilan chez l'athlète 2

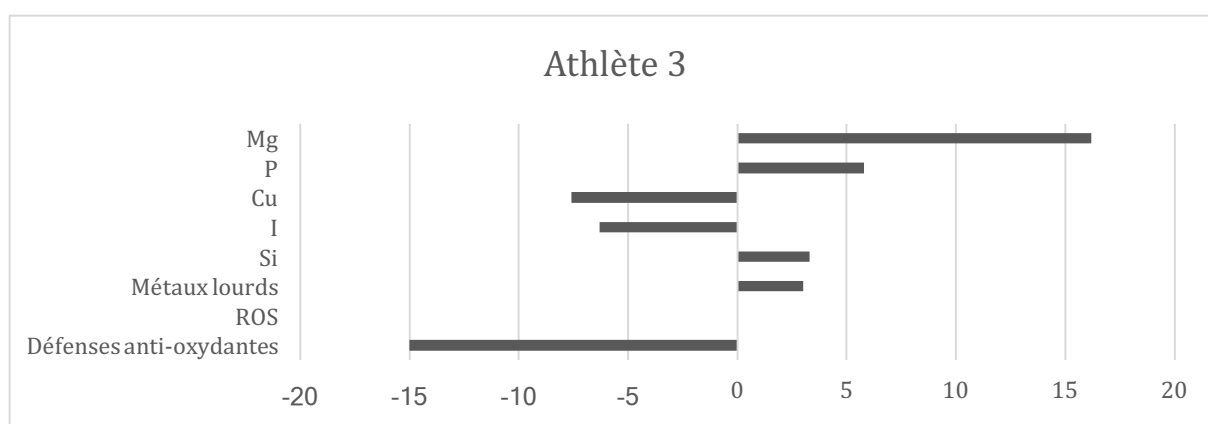


Figure 3 : Variations relatives des paramètres lors du deuxième bilan chez l'athlète 3

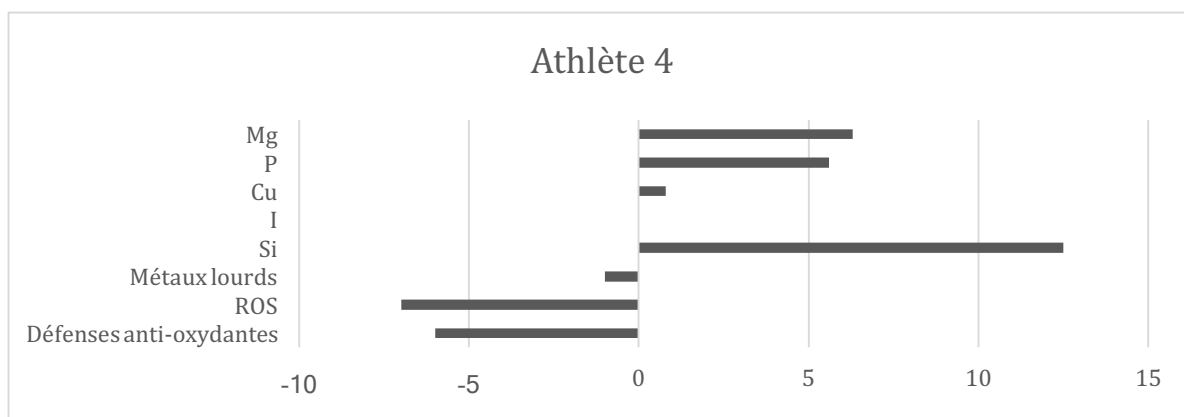


Figure 4 : Variations relatives des paramètres lors du deuxième bilan chez l'athlète 4

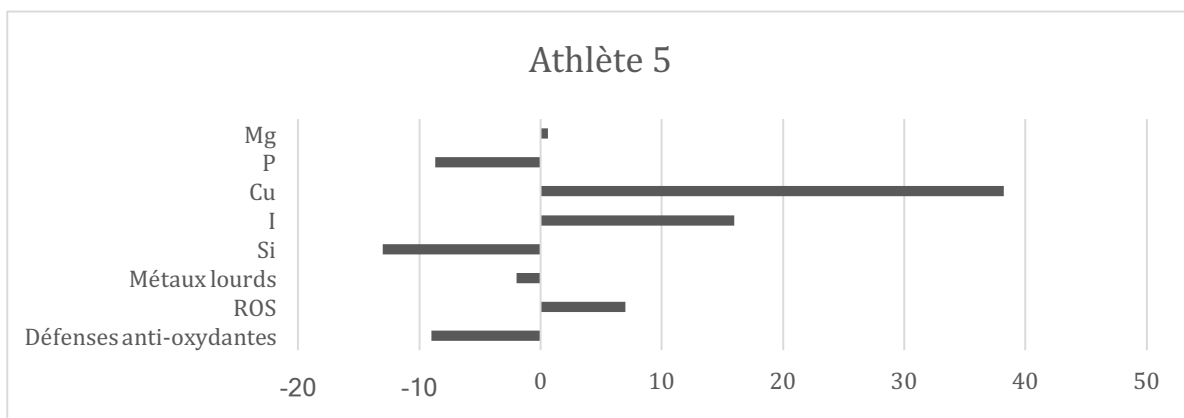


Figure 5 : Variations relatives des paramètres lors du deuxième bilan chez l'athlète 5

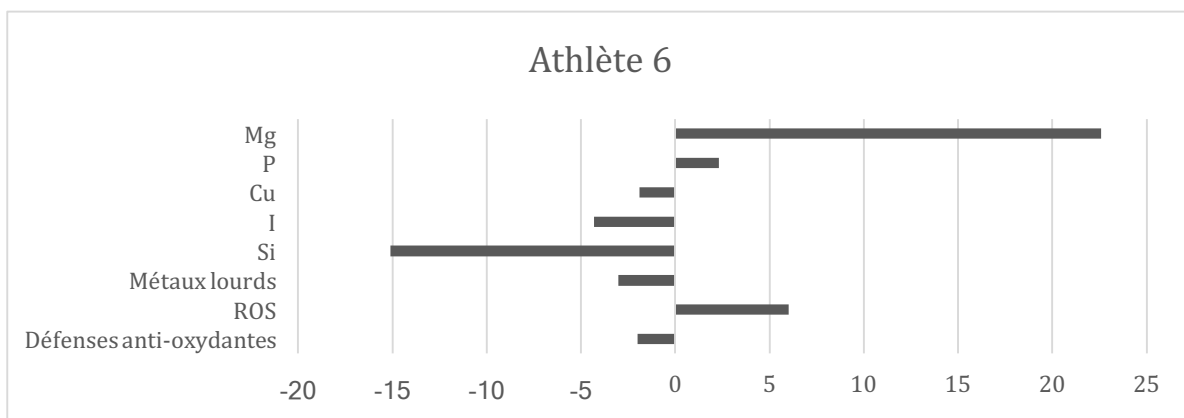


Figure 6 : Variations relatives des paramètres lors du deuxième bilan chez l'athlète 6

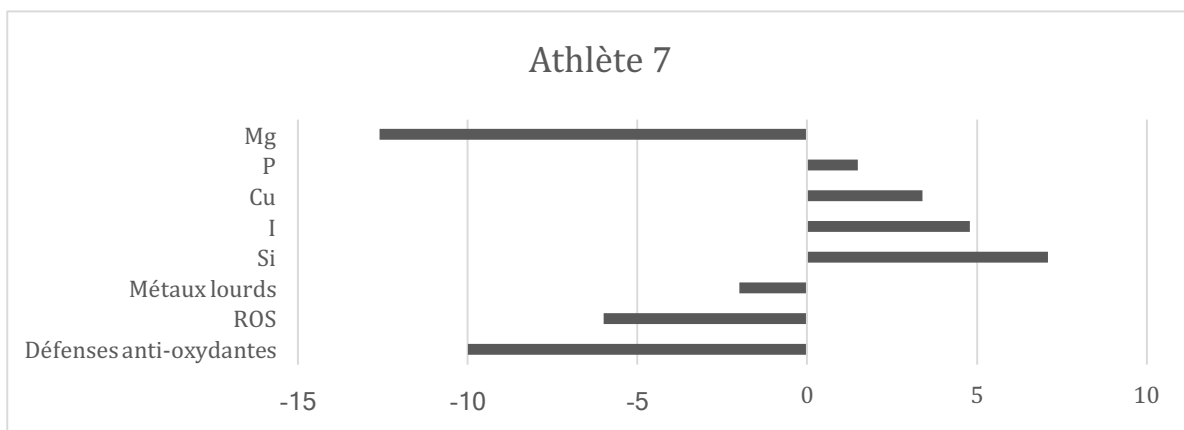


Figure 7 : Variations relatives des paramètres lors du deuxième bilan chez l'athlète 7.

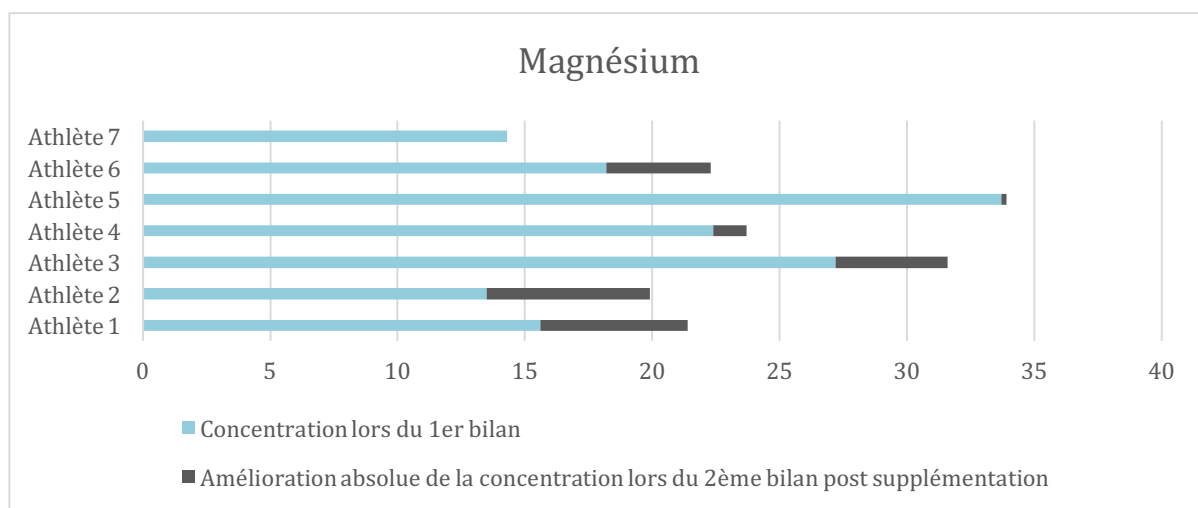


Figure 8 : Variation interbilan des concentrations en magnésium chez les athlètes

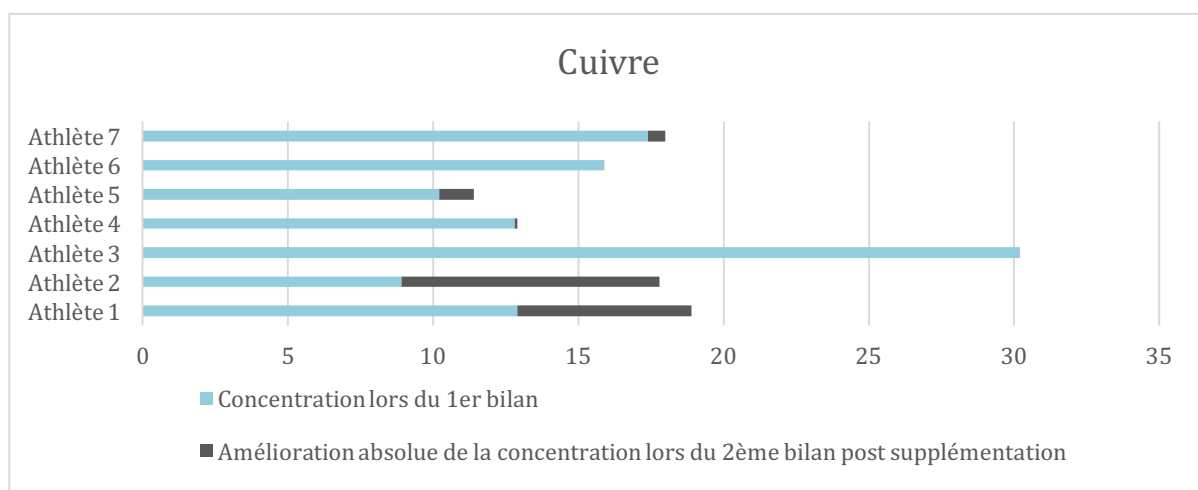


Figure 9 : Variation interbilan des concentrations en cuivre chez les athlètes

Oligoélément	Nombre de carences	Nombre de carences améliorées par la supplémentation	Efficacité de la supplémentation (%)
Mg	6	5	83
P	2	2	100
Cu	2	2	100
I	6	4	67
Si	3	2	67
Total	19	15	78.95

Tableau 4 : Efficacité de la supplémentation chez les athlètes

Les figures 10-12 illustrent de la même manière la variation relative des différents paramètres mesurés par le spectrophotomètre entre le premier et le second bilan chez les sujets contrôles. On retrouve également une grande variabilité entre les différents sujets.

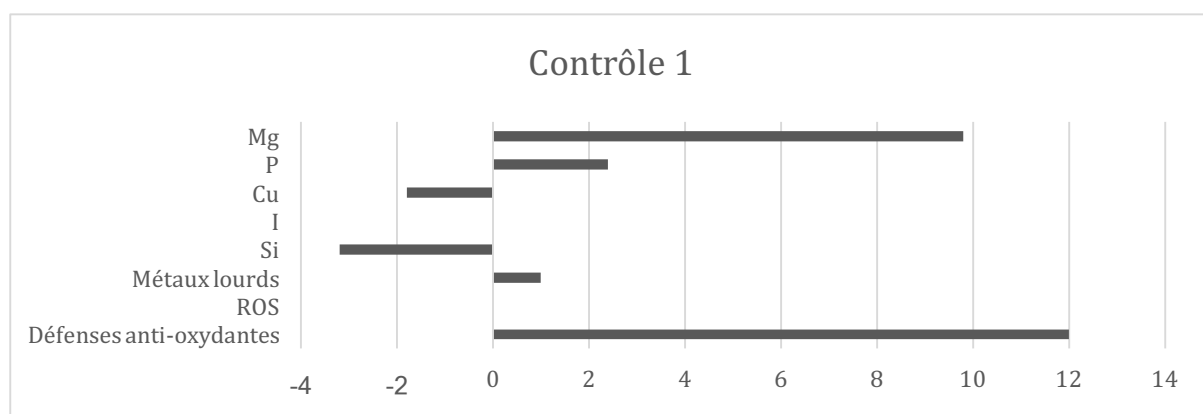


Figure 10 : Variations relatives des paramètres lors du deuxième bilan chez le sujet contrôle 1

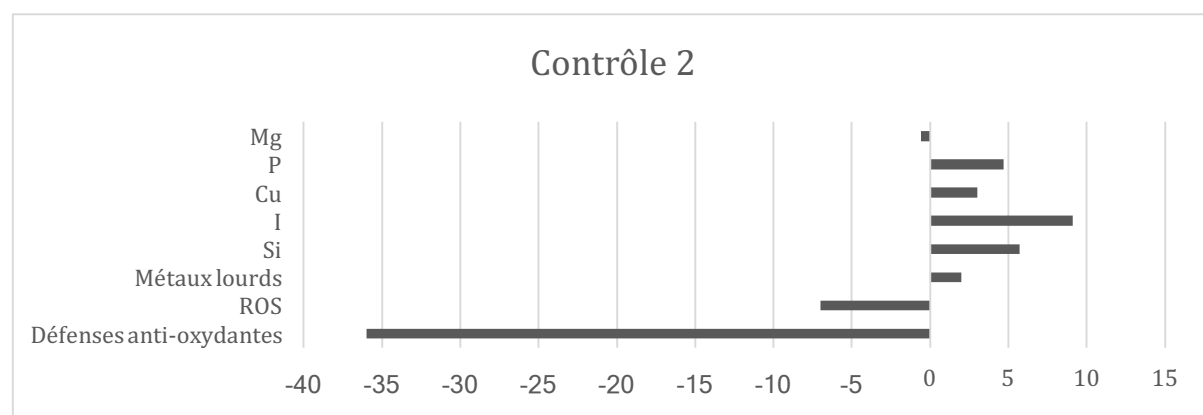


Figure 11 : Variations relatives des paramètres lors du deuxième bilan chez le sujet contrôle 2

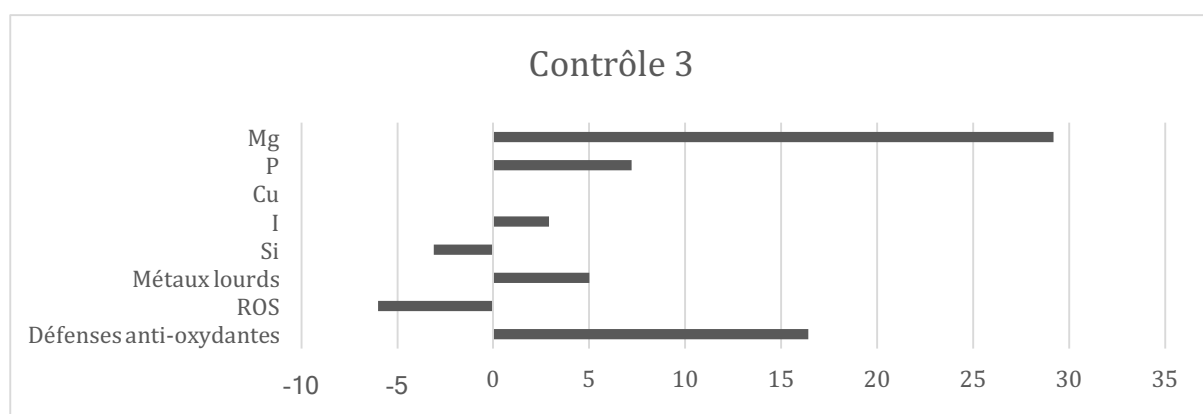


Figure 12 : Variations relatives des paramètres lors du deuxième bilan chez le sujet contrôle 3

Oligoélément	Nombre de carences	Nombre de carences améliorées naturellement	Amélioration naturelle (%)
Mg	3	2	67
P	1	1	100
Cu	0	0	-
I	2	1	50
Si	2	0	0
Total	8	4	50

Tableau 5 : Correction naturelle des carences entre les 2 bilans chez le groupe contrôle

Les figures 13 et 14 comparent les variations relatives entre les deux bilans des taux de métaux lourds, ROS et défenses antioxydantes entre les athlètes et les sujets contrôles. A remarquer qu'au niveau des métaux lourds, les athlètes tendent à s'améliorer tandis que le groupe contrôle se péjore. Autre constatation intéressante, la figure des ROS montre une évolution des deux groupes dans des directions opposées alors que la figure des défenses antioxydante montre, cette fois-ci, une évolution des deux groupes dans le même sens.

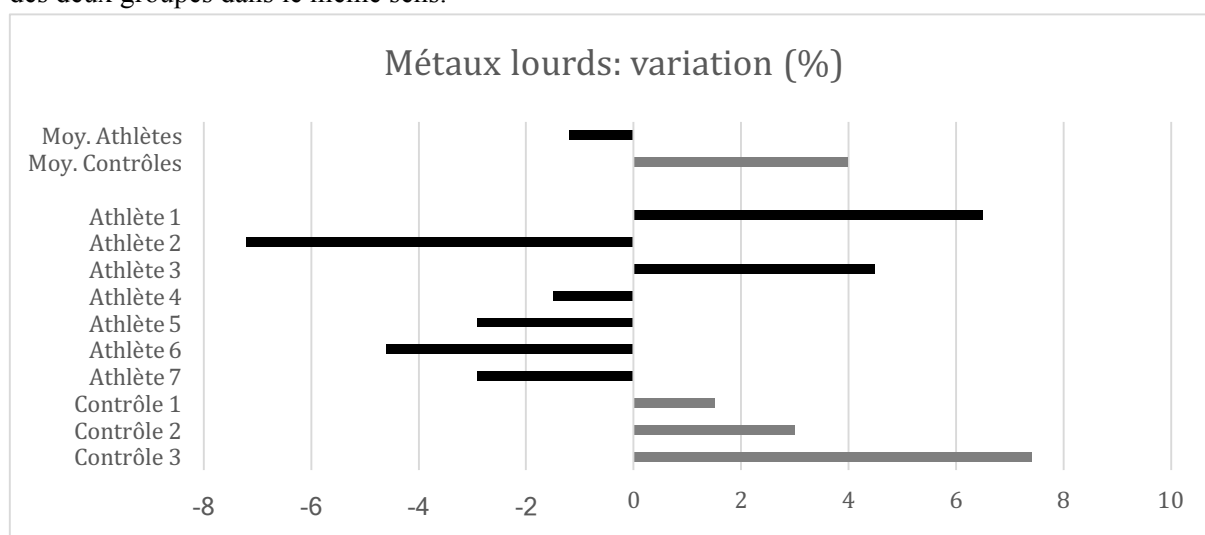


Figure 13 : Variation relative interbilan des taux de métaux lourds

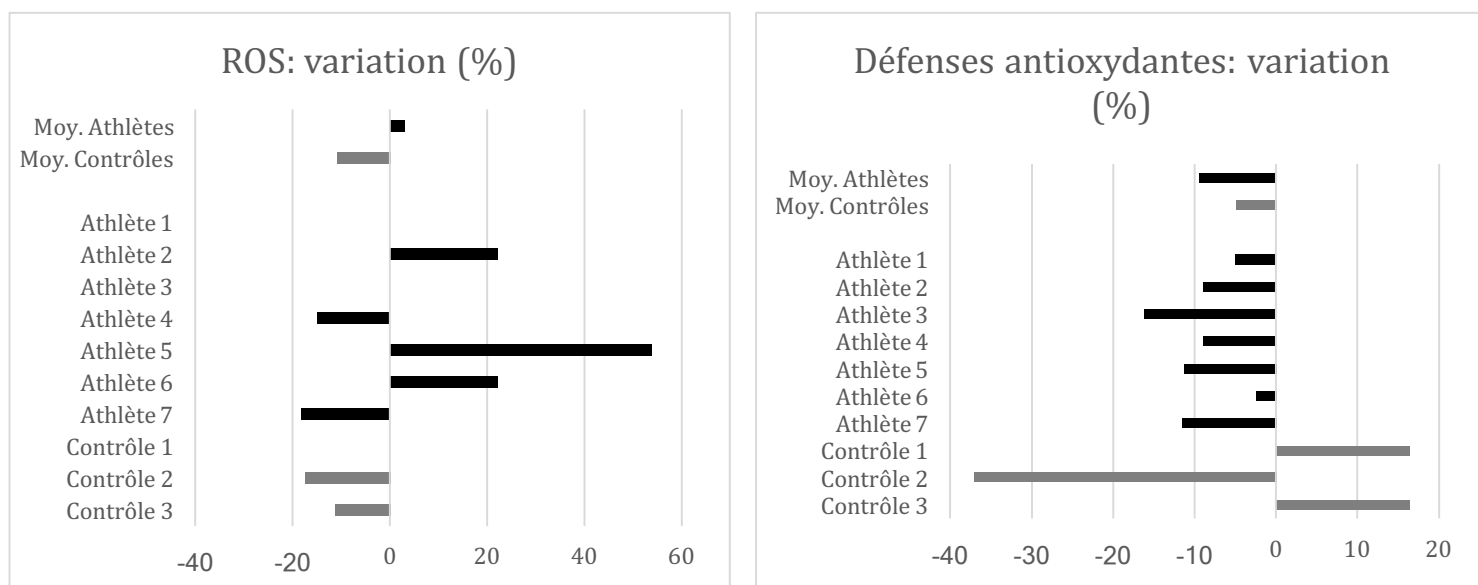


Figure 14 : Variation relative interbilan a) des radicaux libres d'oxygène, b) des défenses antioxydantes

La Figure 17 représente une comparaison des différentes variations relatives entre les 2 bilans. La barre fine illustre la plage de variation des mesures, certaines étant très variables comparées à d'autres. La barre épaisse représente quant à elle la valeur moyenne.

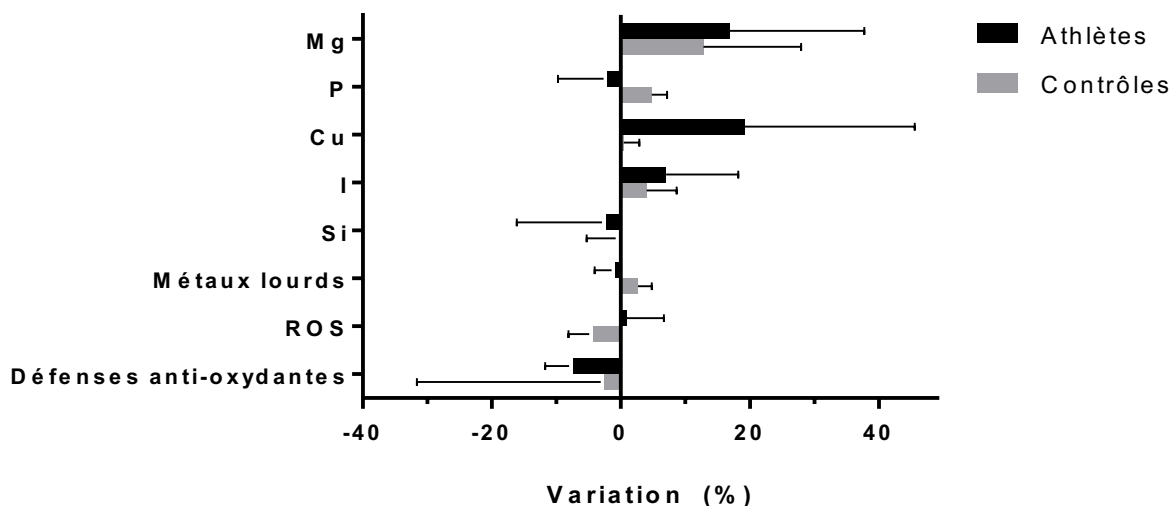


Figure 15 : Comparatif des variations relatives interbilan de l'ensemble des mesures entre le groupe des athlètes et celui des contrôles.

Analyse statistique

Après avoir analysé toutes les valeurs par un t-test de Student, les résultats du test sont regroupés dans le tableau 6 ci-dessous. A remarquer qu'aucune des valeurs n'est statistiquement significative.

	t test	significatif/ non significatif
Mg	0.78	non significatif
P	0.18	non significatif
Cu	0.27	non significatif
I	0.67	non significatif
Si	0.80	non significatif
Métaux lourds	0.13	non significatif
ROS	0.20	non significatif
Défenses anti-oxydantes	0.65	non significatif

Tableau 6 : Valeurs du t-test de Student pour chacun des paramètres mesurés par spectrophotomètre et leur interprétation statistique.

Analyse des résultats et discussion

Avant de se plonger dans une analyse détaillée des résultats, il est intéressant de noter l'importante disparité rencontrée au niveau des différentes concentrations en oligoéléments. En effet, les valeurs mesurées dans les deux groupes varient au minimum d'un facteur 1.7 (phosphore) et au maximum d'un facteur 3.4 (Cuivre et Iode). Une telle variabilité apparaissant déjà lors de mesures sur un groupe restreint de 10 sujets, il serait intéressant d'observer celle-ci lors d'analyses sur un groupe élargi.

Basé sur le travail effectué, une supplémentation systématique en oligoéléments ne semble pas être la solution idéale pour diminuer le stress oxydatif et ainsi optimiser au maximum la récupération des athlètes. En effets, les valeurs du POMS illustrées dans le tableau 2 tendent à montrer que malgré une vaste supplémentation visant à corriger les valeurs de 5 différents oligoéléments essentiels au maintien de la balance redox, un seul athlète sur 7 (athlète 2) a ressenti un effet bénéfique tant sur son niveau de fatigue que son niveau d'énergie. Une efficacité de 14.3% reste insuffisante, quand bien même la supplémentation serait le moteur de cette amélioration. L'échelle de POMS restant un outil sujet à des biais humains, notre humeur étant influençable tant positivement que négativement pas les aléas des événements de vie, il est impossible de dire avec les valeurs à disposition si cette amélioration est due à la supplémentation ou à un tout autre facteur extrinsèque à notre analyse. On remarque également une stabilisation du niveau de fatigue et d'énergie chez un autre des 7 athlètes participant à ce travail (athlète 4). Ce statut quo serait-il le fruit de la supplémentation qui aurait neutralisé l'effet délétère des 3 mois d'entraînement et ainsi maintenu un niveau stable de fatigue psychique chez cet athlète ? Il est à l'heure actuelle difficile de démêler les influences respectives des compléments alimentaires de celle de l'état émotionnel des sujets qui reste, malgré la standardisation du POMS, extrêmement sujet aux variations. Dans l'éventualité où cette stabilisation serait due à la supplémentation, un taux d'efficacité de 28.6% reste toutefois toujours trop bas pour préconiser une supplémentation systématique chez tous les athlètes de haut niveau carencés.

Il est néanmoins intéressant de noter que l'athlète 2, seul du groupe qui a présenté en début de saison une amélioration de ses valeurs de POMS, est également celui qui finit la saison 2016-2017 avec la meilleure place au classement mondial. L'athlète 4, avec sa fatigue psychique stabilisée, est quant à lui le 3^{ème} mieux classé parmi les sportifs analysés.

Au niveau des carences (tableau 4), une efficacité moyenne de 78.95%, avec une efficacité individuelle variant entre 67% et 100% selon l'oligoélément, reste satisfaisante à condition que les valeurs obtenues par le spectrophotomètre soient fiables. En observant chacun des oligoéléments supplémentés individuellement, on remarque qu'au niveau du magnésium (figure 8) ainsi qu'au niveau du cuivre (figure 9), les athlètes les plus carencés sont aussi ceux qui augmentent en valeur absolue le plus leur taux suite à la supplémentation. Autrement dit : ceux dont les carences sont les plus importantes sont ceux qui bénéficient le plus des compléments alimentaires prescrits. Par exemple, l'athlète le plus fortement carencé en magnésium, soit l'athlète 2, augmente de 6.4 points son taux en magnésium. Derrière lui, l'athlète 1, le deuxième athlète le plus carencé, augmente ses valeurs en magnésium de 5.8 points. En troisième position au niveau des carences, on retrouve l'athlète 6 qui lui, remonte son magnésium de 4.1 points. Par la suite, l'athlète 3 voit son taux de magnésium augmenter de 4.4 points (bien que légèrement supérieure à l'athlète 6, la valeur reste toutefois proche de la courbe carence-réponse à la supplémentation). L'athlète le plus légèrement carencé, l'athlète 4, n'augmente que de 1.3 point son magnésium tissulaire. Notons enfin que le seul athlète non carencé, soit l'athlète 5, n'élève que de 0.2 point ses valeurs magnésiques, autrement dit, presque pas. La même réflexion s'applique à la supplémentation en cuivre, où l'athlète 2, plus carencé que l'athlète 5 voit son taux

cuivré augmenter de 1 point de plus que celui-ci. Ceci nous oriente vers l'hypothèse qu'afin d'être efficace au maximum, la supplémentation devrait être réservée à ceux dont les carences sont les plus poussées, son bénéfice étant moindre chez les sujets légèrement carencés.

En comparant ces valeurs avec celles de l'échelle POMS, les athlètes n'ayant pas répondu favorablement à la supplémentation selon les valeurs mesurées par le spectrophotomètre ne sont pas ceux dont le POMS se dégrade le plus. En effet, l'athlète 2, le seul dont le POMS évolue positivement, est également le seul dont les taux de silicium ne s'améliorent pas sous supplémentation (figure 2). L'athlète 7 est, quant à lui, le seul athlète ne répondant pas à la supplémentation en magnésium (figure 7). Malgré cela, son niveau de fatigue régresse entre les 2 bilans. La supplémentation en iode semble à ce stade être la seule dont la non-efficacité est corrélée à une évolution négative de la fatigue psychique. En effet, les athlètes n'ayant pas répondu à la supplémentation iodée, soit les athlètes 3 et 6 font parties de ceux dont tant la fatigue que le niveau d'énergie se péjorent entre les 2 bilans. A noter toutefois que leur carence en iode ne s'accroît que très peu durant les 3 mois d'analyse. En vue du nombre restreint de valeurs mesurées, il est difficile de dire si ces divergences sont dues à des mesures non fiables du spectrophotomètre ou des variations de causes extrinsèques à l'étude des POMS. Concernant les carences en iode, il est reconnu qu'une concentration iodée abaissée est corrélée à une diminution du taux d'énergie et parallèlement à une majoration du niveau de fatigue. Cependant, il faut toutefois prendre en compte que chez 50% des athlètes ayant répondu à la supplémentation, soit 2 athlètes sur 4, l'amélioration de la concentration iodée est associée malgré tout à une évolution négative du POMS. Il n'est, dès lors, pas affirmable que la concentration iodée définie par le spectrophotomètre soit corrélable à la fatigue psychique et de ce fait validée en tant que valeur indicatrice des réserves énergétiques individuelles propres à chaque athlète.

Au niveau du groupe contrôle, non soumis à supplémentation, les carences magnésiques tendent à s'améliorer naturellement durant les 3 mois séparant les 2 bilans (tableau 5). On note une augmentation des taux de magnésium chez 2 des 3 sujets carencés, soit une amélioration de 67% qui reste toutefois inférieure à celle mesurée chez les athlètes soumis à la supplémentation orale, à savoir 83%. Il est bon de noter des concentrations iodées qui restent stables entre les 2 séries de mesures. Ceci permet d'accorder une plus-value aux résultats obtenus chez les athlètes. Pour rappel, 4 des 6 athlètes carencés avaient vu leur taux iodé remonter suite à la supplémentation, soit un effet bénéfique calculé à 67%. L'unique sujet contrôle présentant initialement un taux de phosphate abaissé a corrigé naturellement celui-ci au cours des 12 semaines, ce qui vient à l'inverse atténuer cette fois-ci les résultats obtenus chez les athlètes qui insinuaient une efficacité de la supplémentation en phosphore s'élevant à 100%.

Ces divergences dans l'efficacité des diverses supplémentations est explicable par deux hypothèses. La première étant la plus simple ; les valeurs mesurées par le spectrophotomètre ne sont pas entièrement fiables et ne permettent de ce fait pas de mesurer correctement les concentrations tissulaires des différents oligoéléments. La seconde est quant à elle bien plus complexe et fait entrer en jeu un autre concept primordial lorsqu'il s'agit d'initier une supplémentation. En effet, les différents oligoéléments ne peuvent être tous supplémentés en même temps, certains entrant en compétition au niveau des mêmes récepteurs nécessaires à leur absorption entérale. Une supplémentation ainsi élargie englobant parfois jusqu'à 4 oligoéléments différents n'est pas efficace, les divers oligoéléments ne pouvant être absorbés de manière optimale. Il advient dès lors de mettre en évidence ces possibles interactions et par la suite fractionner sur la journée les divers compléments alimentaires afin de garantir la plus haute efficacité possible.

Bien qu'efficace chez 5 athlètes sur 7 (figure 13), la chélation par Metout ne peut être considérée comme optimale, l'amélioration absolue maximale mesurée chez l'athlète 2 étant de 5%. Ce résultat reste trop faible pour qu'une chélation par extraits de *Laminaria japonica* ne soit systématiquement initiée, les pourcentages d'amélioration étant insuffisants pour qu'un véritable effet bénéfique soit observable. Bien que minime, l'effet bénéfique n'est quant à lui pas contesté. En effet, chez le groupe contrôle n'ayant pas suivi un traitement chélateur, les taux de métaux lourds augmentent chez 100% des sujets testés avec une augmentation maximale absolue mesurée à 5%, soit une augmentation relative de 7.4% (figure 13). Il convient également de noter que cette valeur maximale située à 73% représente la valeur la plus élevée mesurée tant chez le groupe contrôle que chez les athlètes. Autre constatation digne d'être relevée, lors du premier bilan effectué en août, les valeurs mesurées chez les athlètes mais également chez le groupe contrôle se situent dans le même intervalle, à savoir : 62-69%. En outre, aucune différence significative n'est à noter entre les valeurs moyennes respectives de ces deux groupes, les athlètes présentant une moyenne à 66.7% et les contrôles à 67%. Néanmoins, lors du deuxième bilan de novembre, le groupe des athlètes présente un intervalle se situant entre 62-70% tandis que le groupe contrôle voit son intervalle s'élever à 68-73%. Ceci représente une valeur moyenne des athlètes à 65.9% et une valeur moyenne du groupe contrôle à 69.7%. La figure 13 illustre bien cette tendance qu'a le groupe des athlètes à abaisser son taux de métaux lourds tandis que le groupe contrôle augmente le sien. Basé sur ces constatations, on peut admettre une activité bénéfique de *Laminaria japonica* sur la teneur en métaux lourds de l'organisme bien que celle-ci reste minime.

On relève lors de l'analyse de la teneur tissulaire en radicaux libres, une valeur moyenne de ROS pré-supplémentation de 29.6% chez les athlètes pour une moyenne post-supplémentation de 30.4%, soit une augmentation relative de 2.9% (figure 14). Cette stabilité du niveau moyen de radicaux libres chez les athlètes est surprenante si on la compare à une diminution de la valeur moyenne de ROS chez les sujets contrôles qui passe de 40.0% à 35.7%, soit une diminution relative de 10.9% malgré le fait que ceux-ci n'ont reçu aucune supplémentation destinée à abaisser ce taux. Les valeurs ainsi obtenues sont explicables par 2 hypothèses contradictoires. La première étant que les mesures ainsi que les calculs aboutissant à ces pourcentages ne sont pas fiables, voire pas corrects et de ce fait, ces résultats sont en partie, si ce n'est entièrement, erronés. La seconde hypothèse étant que contrairement aux athlètes, le groupe contrôle ne s'est pas entraîné intensément durant ces 12 semaines ce qui expliquerait ce taux de radicaux libres qui n'augmente pas. La question qui se profile alors est pourquoi celui-ci diminue au lieu de rester stable ? Cet aspect est difficilement explicable ce qui nous oriente préférentiellement vers la première hypothèse. Une autre constatation étonnante est que malgré un entraînement passablement moins intensif que celui des athlètes, le groupe contrôle présente un taux moyen de radicaux libres lors du premier bilan 10.4% plus élevé par-rapport aux athlètes et qui reste toujours plus élevé de 5.3% lors du deuxième bilan. A nouveau, deux explications sont envisageables. La première rejoint l'hypothèse précédente de calculs erronés tandis que la seconde envisage que l'entraînement intensif auquel s'astreignent les athlètes les prédispose également à une meilleure adaptation physiologique au stress oxydatif et, de ce fait, à de meilleures défenses antioxydantes leur permettant d'avoir, malgré une plus lourde charge d'entraînement, des taux tissulaires de radicaux libres plus faibles.

Afin de valider ou au contraire d'écarter cette hypothèse, il convient d'analyser les pourcentages de défenses antioxydantes de chacun des groupes (figure 14). Chez les athlètes, les défenses antioxydantes sont inférieures à celles du groupe contrôle tant en pré- qu'en post-supplémentation. Ceci vient contredire l'hypothèse et nous oriente à nouveau vers l'explication selon laquelle ces inadéquations dans les valeurs seraient le fruit de calculs inexacts ne reflétant pas l'état réel du stress oxydatif et des défenses antioxydantes tissulaires. De plus, si ces calculs devaient s'avérer corrects,

une diminution du stress oxydatif au cours des trois mois chez le groupe contrôle serait associé à une diminution des défenses antioxydantes au cours de la même période ce qui est contradictoire. Lorsqu'on observe les différentes valeurs individuellement, on peut voir que dans le groupe des athlètes, seulement 3 sur les 7 présentent une corrélation entre le taux de ROS et celui de l'état antioxydant, soit une diminution des défenses associée à une augmentation du taux de ROS. Ce manque de corrélation est également observable dans le groupe contrôle, où un seul des sujets exprime des valeurs concordantes, autrement dit une augmentation des défenses associée à une diminution du stress oxydatif. Lorsqu'on associe les deux groupes, on remarque que tant dans le groupe témoin que dans le groupe des athlètes, plus de la moitié des sujets présentent des valeurs discordantes.

L'analyse statistique des mesures, sous la forme d'un t-test de Student (figure 6) est non-conclusive. En effet, aucune des valeurs obtenues n'est inférieure à 0.05, autrement dit, aucune valeur obtenue n'est statistiquement significative. Sont incriminables la disparité des mesures effectuées ainsi que le nombre restreint de sujets inclus dans l'étude. La précision des mesures est également un facteur qui devrait être pris en considération dans l'étude : sa détermination est indispensable pour pouvoir interpréter de façon robuste les résultats des mesures. La documentation à disposition sur la technique de mesure était toutefois insuffisante sur ce point.

Face à ces constatations mitigées présentant parfois des incohérences, nous mettons en doute la fiabilité des résultats du spectrophotomètre. Malgré de multiples tentatives, nous n'avons malheureusement pas été en mesure d'obtenir des informations du fabricant concernant le mode d'acquisition de cet appareil et le lien entre les valeurs mesurées par la méthode optique et les diverses concentrations fournies par l'algorithme.

Conclusion

Conclusions liées à l'étude

Les analyses effectuées lors de ces 2 bilans ne permettent pas de valider les mesures obtenues par le spectrophotomètre en tant que mesure non invasive du stress oxydatif. En effet, les valeurs ne correspondent pas aux conclusions émanant de l'échelle POMS. Les améliorations observées lors des diverses supplémentations sont tant associées à une péjoration qu'à une amélioration de l'état de fatigue psychique. De plus, les corrections des taux tissulaires apparues naturellement dans le groupe contrôle permettent de douter d'une réelle stabilité et donc fiabilité des mesures obtenues. Ceux-ci auraient en effet dû rester stables tout au long des 12 semaines séparant les 2 séries de mesures. Ajoutons toutefois qu'avec un groupe d'athlètes et de sujets contrôles restreint tels que ceux utilisés dans le cadre de cette analyse, il n'est pas envisageable de prétendre pallier les variations dues au hasard et donc difficile de produire des résultats systématisés. Les contradictions observées lors de l'analyse des teneurs en radicaux libres et en défenses antioxydantes nous permettent d'exclure avec plus de conviction les valeurs obtenues par algorithmes sur la base des concentrations tissulaires des divers oligoéléments. Afin d'envisager de valider cette technique de mesure non invasive, il faudrait dans une éventuelle poursuite de cette étude étendre considérablement le nombre de sujets dans chacun des 2 groupes afin de garantir une homogénéité des mesures récoltées. De plus, il faudrait changer la technique de mesure standardisée servant de comparatif. En effet, l'échelle POMS, bien que standardisée ne reste que trop sujette aux variations de la perception humaine et n'est de ce fait pas suffisante pour assurer un comparatif fiable. Il faudrait préférentiellement utiliser une méthode

invasive de mesure du stress oxydatif et privilégier une analyse sanguine ou capillaire. Ceci permettrait de contourner les biais émotionnels extrêmement influençables par des facteurs extrinsèques non contrôlables par un cadre d'analyse.

Même si l'on admettait que les valeurs mesurées par le spectrophotomètre soient fiables, il faudrait toutefois adapter la méthode de supplémentation des carences mises en évidence. En effet, bien qu'apparaissant efficaces au-travers des valeurs mesurées, une supplémentation individuelle de tout athlète professionnel ne peut être systématiquement initiée. Comme discuté plus haut, au cours de l'analyse des résultats, le fait de supplémenter simultanément lors d'une prise unique différents oligoéléments qui entreront par la suite en compétition lors de l'absorption digestive reste un procédé contre-productif. De plus, les oligoéléments ne présentant qu'une carence minimale ne bénéficieront pas d'une efficacité optimale de la supplémentation. Il advient dès lors d'analyser méticuleusement les diverses carences et de définir avec précision un schéma de supplémentation tenant compte des contraintes liées à la prise orale en se focalisant principalement sur les carences les plus importantes. Ceci dans le but de garantir des résultats les plus rentables par-rapport à l'investissement. Les effets de mode actuels tendent à promouvoir les supplémentations considérées comme un moyen naturel d'améliorer son état de santé. Il convient cependant de garder à l'esprit que ces supplémentations peuvent également interférer négativement avec le fonctionnement de l'organisme. Bien entendu qu'une supplémentation ciblée et bien menée durant une période définie à l'avance comme à risque de surentraînement peut permettre d'améliorer les performances sportives en apportant le boost nécessaire à renforcer les défenses antioxydantes naturelles du corps humain. Il advient cependant de garder à l'esprit que pour optimiser une efficacité sur le long terme, cette supplémentation doit néanmoins rester soigneusement confinée à une période de temps donnée et s'associer en temps voulu à une récupération adéquate permettant de régénérer les dégâts occasionnés par l'effort physique.

Limites de l'étude

Les résultats obtenus suite à cette étude n'ont malheureusement pas été à la hauteur de nos attentes. Sont en cause divers éléments. Tout d'abord, le nombre restreint de sujets dans chacun des deux groupes. En effet, tant dans le groupe contrôle (3) que dans le groupe des athlètes (6), le nombre de sujets est insuffisant pour permettre de tirer des conclusions statistiquement significatives.

Est également incriminable le non-respect de la supplémentation. Suite à l'analyse des résultats et après discussion avec l'entraîneur, il s'avère que des bilans sanguins en péjoration ont poussé celui-ci à suspendre le protocole de supplémentation avant la fin des 3 mois prévus. Les résultats obtenus sont de ce fait biaisés par une supplémentation non conduite à terme.

De plus, bien que les athlètes évoluent dans le même environnement lors des camps d'entraînement, ceux-ci retournent chez eux pour des périodes plus ou moins longues entre ceux-ci. De ce fait, il convient de noter des disparités au niveau du régime alimentaire suivi par chacun des athlètes. Ces disparités pouvant interférer avec les variations interbilan, celles-ci ne pouvant dès lors plus être uniquement expliquées par la supplémentation en oligoéléments.

Une autre limite de notre étude réside dans l'utilisation d'un POMS en tant que mesure de validation des valeurs du spectrophotomètre. En effet, bien que les résultats soient interprétés par rapport à une valeur moyenne de référence variable selon l'intensité de l'entraînement fourni, l'évaluation du POMS reste une valeur trop subjective pour servir de système de validation. Il aurait fallu utiliser un système

plus stable et objectif, par exemple des mesures de laboratoire ou des mesures capillaires. Ceci aurait permis de pallier à cette subjectivité présente dans l'échelle POMS.

Enfin, le plus grand facteur limitant réside dans le manque d'informations quant au fonctionnement du spectrophotomètre. Malgré la lecture des divers documents transmis par le Dr. Capt, le mode de fonctionnement exact du spectrophotomètre n'a pas pu être entièrement expliqué. De plus, la recherche de documents sur pubmed s'est avérée infructueuse. En résumé, il réside de nombreuses zones d'ombre quant au mode d'acquisition de ces mesures, notamment les unités utilisées ! Zones d'ombre qui n'ont pu être éclairées par le Dr. Capt. Le procédé de mesure s'avérant peu clair et face à de nombreuses questions sans réponse, il est dès lors difficile d'analyser correctement les valeurs obtenues et les considérer comme étant fiables.

En conclusion, si une nouvelle étude devait être menée dans ce domaine, il conviendrait d'utiliser un procédé de validation plus objectif et de ce fait plus stable qu'une échelle POMS. De plus, avant de débiter l'étude, le mode de fonctionnement exact du spectrophotomètre devrait être transmis afin de pouvoir analyser plus correctement les valeurs obtenues. Par ailleurs, tant le nombre de sujets contrôles que le nombre d'athlètes devrait être majoré pour augmenter la valeur statistique de l'étude. Idéalement, il faudrait diviser un plus grand nombre d'athlètes en deux groupes, le premier servant de groupe contrôle tandis que le second serait suppléé en fonction des carences individuelles. Malheureusement, à un tel niveau, il s'avère délicat de ne suppléer que 50% des athlètes d'une équipe, raison pour laquelle, notre groupe contrôle est composé de membres du staff.

Références

- 1) Dillard, C. J., R. E. Litov, W. M. Savin, E. E. Dumelin, and A. L. Tappel. "Effects of Exercise, Vitamin E, and Ozone on Pulmonary Function and Lipid Peroxidation." *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology* 45, no. 6 (December 1978): 927–32.
- 2) Stanković, Marija, and Dragan Radovanović. "Oxidative Stress and Physical Activity." *SportLogia* 8, no. 1 (2012): 1–11.
- 3) Radovanović, D., & Ranković, G. (2004). Oxidative stress, stress proteins and antioxidants in exercise. *Acta Medica Medianae*, 43(4), 45–47.
- 4) Powers, Scott K., W. Bradley Nelson, and Matthew B. Hudson. "Exercise-Induced Oxidative Stress in Humans: Cause and Consequences." *Free Radical Biology & Medicine* 51, no. 5 (September 1, 2011): 942–50. doi:10.1016/j.freeradbiomed.2010.12.009.
- 5) McKenna, Michael J., Ivan Medved, Craig A. Goodman, Malcolm J. Brown, Andrew R. Bjorksten, Kate T. Murphy, Aaron C. Petersen, Simon Sostaric, and Xiaofei Gong. "N-Acetylcysteine Attenuates the Decline in Muscle Na⁺,K⁺-Pump Activity and Delays Fatigue during Prolonged Exercise in Humans." *The Journal of Physiology* 576, no. 1 (October 1, 2006): 279–88. doi:10.1113/jphysiol.2006.115352.
- 6) Davies, K. J., A. T. Quintanilha, G. A. Brooks, and L. Packer. "Free Radicals and Tissue Damage Produced by Exercise." *Biochemical and Biophysical Research Communications* 107, no. 4 (August 31, 1982): 1198–1205.
- 7) Gomez-Cabrera, Mari-Carmen, Consuelo Borrás, Federico V. Pallardó, Juan Sastre, Li Li Ji, and Jose Viña. "Decreasing Xanthine Oxidase-Mediated Oxidative Stress Prevents Useful Cellular Adaptations

to Exercise in Rats.” *The Journal of Physiology* 567, no. 1 (August 1, 2005): 113–20. doi:10.1113/jphysiol.2004.080564.

- 8) Powers, Scott K, Erin E Talbert, and Peter J Adhihetty. “Reactive Oxygen and Nitrogen Species as Intracellular Signals in Skeletal Muscle.” *The Journal of Physiology* 589, no. Pt 9 (May 1, 2011): 2129–38. doi:10.1113/jphysiol.2010.201327.
- 9) McArdle, F., S. Spiers, H. Aldemir, A. Vasilaki, A. Beaver, L. Iwanejko, A. McArdle, and M. J. Jackson. “Preconditioning of Skeletal Muscle against Contraction-Induced Damage: The Role of Adaptations to Oxidants in Mice.” *The Journal of Physiology* 561, no. Pt 1 (November 15, 2004): 233–44. doi:10.1113/jphysiol.2004.069914.
- 10) Gomez-Cabrera, Mari-Carmen, Elena Domenech, Marco Romagnoli, Alessandro Arduini, Consuelo Borrás, Federico V. Pallardo, Juan Sastre, and Jose Viña. “Oral Administration of Vitamin C Decreases Muscle Mitochondrial Biogenesis and Hampers Training-Induced Adaptations in Endurance Performance.” *The American Journal of Clinical Nutrition* 87, no. 1 (January 1, 2008): 142–49.
- 11) Steinberg, Jean Guillaume, Stéphane Delliaux, and Yves Jammes. “Reliability of Different Blood Indices to Explore the Oxidative Stress in Response to Maximal Cycling and Static Exercises.” *Clinical Physiology and Functional Imaging* 26, no. 2 (March 2006): 106–12. doi:10.1111/j.1475-097X.2006.00658.x.
- 12) A, Arsic, Vucic V, Glibetic M, Popovic T, Debeljak-Martacic J, Cubrilo D, Ahmetovic Z, et al. “Redox Balance in Elite Female Athletes: Differences Based on Sport Types.” *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 56, no. 1–2 (2016): 1–8.
- 13) Lane, Helen W., Charles Bourland, Ann Barrett, Martina Heer, and Scott M. Smith. “The Role of Nutritional Research in the Success of Human Space Flight12.” *Advances in Nutrition* 4, no. 5 (September 5, 2013): 521–23. doi:10.3945/an.113.004101.
- 14) Slattery, Katie, David Bentley, and Aaron J. Coutts. “The Role of Oxidative, Inflammatory and Neuroendocrinological Systems During Exercise Stress in Athletes: Implications of Antioxidant Supplementation on Physiological Adaptation During Intensified Physical Training.” *Sports Medicine* 45, no. 4 (April 1, 2015): 453–71. doi:10.1007/s40279-014-0282-7.
- 15) Ristow, Michael, Kim Zarse, Andreas Oberbach, Nora Klötting, Marc Birringer, Michael Kiehnopf, Michael Stumvoll, C. Ronald Kahn, and Matthias Blüher. “Antioxidants Prevent Health-Promoting Effects of Physical Exercise in Humans.” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106, no. 21 (May 26, 2009): 8665–70. doi:10.1073/pnas.0903485106.
- 16) Didier Quilliot, Ronan Thibault, Patrick Bachmann, Esther Guex, Gilbert Zéanandin, Pauline Coti-Bertrand, Béatrice Dubern, Noël Peretti, Dominique Caldari. “Traité de nutrition Clinique à tous les âges de la vie”, SFNEP, édition 2016
- 17) www.physiosens.fr