

Mémoire du Diplôme Inter-Universitaire Européen
MICRONUTRITION, ALIMENTATION ET PRÉVENTION SANTÉ (MAPS)

2025

Université PARIS CITÉ

Cécile BLANC BIARD – Docteur en Pharmacie

MISE EN PLACE D'UN PROTOCOLE DE MICRONUTRITION SUR LA
PRÉVENTION DES CRAMPES MUSCULAIRES PENDANT LES
ÉPREUVES D'ULTRA-ENDURANCE

RESUME

Les crampes musculaires constituent un motif fréquent de contre-performance, voire d'abandon, chez les sportifs d'ultra-endurance. Malgré leur prévalence élevée, leurs mécanismes restent multifactoriels et encore partiellement élucidés. Ce mémoire a pour objectif de proposer un protocole de micronutrition visant à prévenir l'apparition de ces crampes dans un contexte d'effort prolongé. Après une revue approfondie de la littérature, plusieurs pistes sont explorées : équilibre électrolytique, statut hydrique, apport en vitamines et minéraux (magnésium, sodium, potassium, calcium), rôle de la coenzyme Q10, de la vitamine D, des oméga-3, du zinc et du Pycnogenol®, ainsi que leur impact sur la fonction neuromusculaire et mitochondriale. Une attention est portée aux spécificités physiologiques des athlètes d'ultra-endurance et aux besoins liés à la durée et à l'intensité de l'effort. Le protocole proposé s'inscrit dans une approche individualisée, fondée sur l'évaluation des déficits et des habitudes alimentaires, en intégrant des recommandations pratiques préventives applicables sur le terrain.

Mots-clés : crampes musculaires, ultra-endurance, micronutrition, électrolytes, magnésium, coenzyme Q10, Pycnogenol®, vitamine D, oméga-3, prévention

ABSTRACT

Muscle cramps are a common cause of underperformance, and even withdrawal, among ultra-endurance athletes. Despite their high prevalence, the underlying mechanisms remain multifactorial and only partially understood. This thesis aims to propose a micronutritional protocol to help prevent the onset of cramps in the context of prolonged physical effort.

Following a thorough review of the literature, several avenues are explored: electrolyte balance, hydration status, intake of vitamins and minerals (magnesium, sodium, potassium, calcium), the role of coenzyme Q10, vitamin D, omega-3 fatty acids, zinc, and Pycnogenol®, as well as their impact on neuromuscular and mitochondrial function. Specific attention is given to the physiological characteristics of ultra-endurance athletes and the demands associated with both the duration and intensity of effort. The proposed protocol adopts an individualized approach, based on the assessment of nutritional deficiencies and dietary habits, and integrates practical preventive recommendations applicable in the field.

Les épreuves d'ultra-distance mettent à rude épreuve le système musculosquelettique et la physiologie globale de l'athlète. Parmi les contraintes les plus handicapantes figurent les crampes musculaires, dont la survenue est fréquente et peut entraîner l'arrêt de la course ou une diminution significative des performances.

La prévention des crampes musculaires constitue un enjeu majeur pour les sportifs d'endurance. La compréhension des mécanismes impliqués, encore partielle, oriente aujourd'hui vers une approche multifactorielle. Le rôle des déséquilibres électrolytiques, de la fatigue neuromusculaire, du stress oxydatif, ainsi que des carences micronutritionnelles est de plus en plus reconnu. Dans ce contexte, la micronutrition fonctionnelle propose une prise en charge personnalisée visant à rééquilibrer ces paramètres pour limiter la fréquence et l'intensité des crampes.

Ce mémoire a pour objectif de comprendre la physiopathologie (entre les croyances populaires et les études cliniques) et de faire une proposition de protocole micronutritionnel pour prévenir les crampes musculaires lors d'épreuves d'ultra-distance, à travers une revue des données scientifiques.

1. Physiopathologie des crampes musculaires en ultra-distance

Les crampes musculaires d'effort (EAMC = Exercise-associated muscle cramps) sont définies comme des contractions involontaires, souvent brèves et soudaines, d'un ou plusieurs groupes musculaires, accompagnées d'une douleur aiguë. Elles concernent particulièrement les muscles sollicités de façon répétée et intense, notamment les quadriceps, les ischio-jambiers, les muscles jumeaux et soléaires du mollet et les muscles fléchisseurs et extenseurs du pied. En ultra-distance, leur prévalence est élevée, atteignant jusqu'à 70% selon certaines études (1).

Leur **physiopathologie** est mal comprise. Plusieurs hypothèses coexistent ce jour ; historiquement les causes de l'EAMC ont été proposées comme suit (2) : anomalies héréditaires du métabolisme des substrats (« théorie métabolique »), anomalies de l'équilibre hydrique (« théorie de la déshydratation »), anomalies des concentrations sériques des électrolytes (« théorie des électrolytes »), conditions environnementales extrêmes de chaleur et/ou de froid (« théorie de l'environnement »).

Ces hypothèses sont aujourd'hui peu soutenues dans la littérature scientifique. Par contre l'hypothèse du contrôle neuromusculaire altéré est mis en avant dès 2008 dans le British Journal of Sports Medicine (4). En 2013, dans la revue Exercise and Sport Sciences (American college of sports Medicine) (3), les hypothèses étaient les suivantes : modification de l'excitabilité des motoneurones (origine centrale) et décharges spontanées des nerfs moteurs (origine périphérique).

Communément, les sportifs croient aussi beaucoup à la théorie de l'acide lactique : rappelons qu'il s'agit d'un produit normal de l'effort intense ; lorsque l'oxygène est insuffisant, le pyruvate issu de la glycolyse ne peut pas entrer dans le cycle de Krebs et est alors transformé en lactate ce qui permet de régénérer le NAD⁺ et de continuer à produire de l'ATP, les muscles peuvent alors continuer à fonctionner. Le lactate est alors retransformé en glucose dans le foie (cycle de Cori, néoglucogénèse lactique). L'accumulation de lactate peut entraîner une acidification locale (brûlures, douleurs), ce qui contribue à la sensation de fatigue musculaire. L'acide lactique est aussi un chélateur de magnésium, celui-ci peut donc être moins disponible pour la production d'ATP. Mais l'acide lactique n'est pas la cause directe des crampes.

Afin d'établir un protocole de micronutrition pour les sportifs d'endurance souffrant régulièrement de crampes musculaires à l'effort, nous retiendrons les deux grandes causes que sont le déséquilibre électrolytique et la fatigue musculaire, mais nous n'oublierons pas deux autres grands piliers de la médecine fonctionnelle que sont le stress oxydatif et l'inflammation et la perméabilité intestinale et la malabsorption.

- **Déséquilibre électrolytique**

Nous pouvons penser que la sudation intense et prolongée induit une perte importante de minéraux essentiels au bon fonctionnement musculaire et nerveux, notamment le **magnésium (Mg²⁺)** : cofacteur enzymatique essentiel à la production d'ATP, à la régulation du tonus musculaire et à la transmission nerveuse et le **potassium (K⁺)** et le **sodium (Na⁺)** : ions indispensables à la polarisation membranaire, à la contraction musculaire et à l'hydratation cellulaire.

La carence ou le déficit en ces électrolytes pourrait provoquer une hyperexcitabilité neuromusculaire et des dysfonctionnements de la contraction musculaire, favorisant la survenue de crampes (5). Cette théorie est supportée principalement par des études de cas et des recherches observationnelles, mais aucune recherche n'a pu mettre en évidence un effet de causalité. En 2010, le American College of Sports Medicine (ACSM) a finalement défini comme

« faible » le niveau d'évidence de l'association entre la déshydratation et l'apparition de crampes. Pourtant elle reste très répandue dans les convictions populaires. Selon Jahic et Begic (2018) (18), il y a de plus en plus d'évidences que cette théorie ne soit pas exacte et que ces deux facteurs ne soient pas les causes de l'apparition des crampes musculaires. En effet, après un marathon, Schwellnus et al. (2004) (19) n'ont observé aucune différence du niveau d'hydratation et de concentration d'électrolytes dans le sang entre les sujets qui ont été victimes de crampes et ceux qui n'en ont pas eu.

- **Fatigue neuromusculaire et altération du contrôle neuromusculaire**

La deuxième et plus récente théorie, est liée à l'altération du contrôle neuromusculaire. Ces facteurs semblent être plus susceptibles de provoquer des crampes que la déshydratation. En tout cas, il semble assez évident que l'apparition des crampes musculaires est multifactorielle et qu'elle se manifeste de façon différente pour chaque individu. Généralement, les crampes se présentent lors d'un état de fatigue sévère, un faible niveau d'entraînement ou un historique de dommages musculaires (Schwellnus et al., 2011). En fait, plusieurs études ont montré que les crampes sont plus fréquentes chez des personnes qui ont déjà été victimes de contractions ou de blessures musculaires ou qui sont en train d'effectuer un exercice à une intensité plus élevée que celle utilisée d'habitude non supportée par le degré d'entraînement de la personne (Schwellnus et al., 2011) (20). La fatigue induite lors d'un exercice intense provoque une augmentation de l'activité des fuseaux neuromusculaires et diminue l'activité de l'organe tendineux de Golgi, qui pourrait donc se traduire par une activation plus importante des motoneurones alpha. Effectivement, les personnes qui souffrent de sclérose latérale amyotrophique (SLA), une maladie qui est associée à une altération des mécanismes d'inhibition, sont beaucoup plus sujettes à ce type de problème (Obi et al., 1993) (21).

La fatigue prolongée sur une course d'ultra-endurance modifie donc le contrôle spinal des motoneurones, entraînant une réduction des mécanismes inhibiteurs et une augmentation de la décharge nerveuse motrice, source de crampes. Ce déséquilibre entre excitation et inhibition spinales est exacerbé par l'épuisement énergétique musculaire et les désordres ioniques.

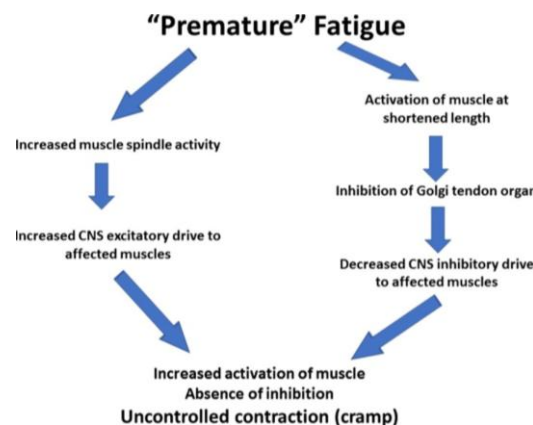


Fig 1 = Contrôle anormal de la fonction des motoneurones pendant la crampe musculaire associée à l'exercice. Sur la base d'une proposition de Schwellnus et al (2).

- **Stress oxydatif et inflammation**

On sait que l'effort prolongé génère un excès de radicaux libres qui provoque un stress oxydatif, endommage les membranes cellulaires musculaires et aggrave la fatigue contractile. Ce phénomène est certainement accentué en cas de déficit en antioxydants, entraînant une récupération plus lente et une vulnérabilité accrue aux crampes. Des chercheurs grecs (6) ont constaté que des composés comme CoQ10, DHA, curcuma, quercétine, NAC, etc., réduisent les marqueurs d'inflammation et stress oxydatif après l'effort, mais l'impact direct sur les crampes n'est pas évalué ici.

- **Perméabilité intestinale et malabsorption**

Une méta-analyse de 2020 (8) a montré que l'exercice induit systématiquement des signes de dommages endothéliaux intestinaux et une augmentation modérée de la perméabilité intestinale, indépendamment de l'état de santé initial des participants. L'hypoxie locale, le stress oxydatif et la reperfusion sont les principaux mécanismes évoqués. Cette perméabilité intestinale accrue (leaky gut) en ultra-endurance, est responsable de troubles digestifs et d'une absorption réduite des micronutriments essentiels (magnésium, vitamines B). Cette situation aggrave les déficits nutritionnels, favorisant les crampes et la fatigue chronique.

2. Micronutrition ciblée dans la prévention des crampes musculaires

2.1 Rôle clé du magnésium et de la vitamine B6

Le magnésium joue un rôle central dans la contraction musculaire (équilibre avec le calcium) (15), en régulant la pompe Na^+/K^+ ATPase, la synthèse d'ATP (sans Mg, la cellule ne produit ni ne consomme correctement l'énergie, ce qui favorise la fatigue musculaire) et la transmission neuromusculaire (stabilisation des membranes). Il nous paraît donc évident de contrôler si le sportif ne présente pas de carence, surtout que des données issues de l'étude INCA2 et de la cohorte SU.VI.MAX indiquent que 77 % des femmes et 72 % des hommes (en France) ont des apports en magnésium inférieurs aux recommandations journalières établies. Une étude de 2024 a montré que la supplémentation en magnésium réduisait les douleurs musculaires, améliorait les performances, la récupération et induisait un effet protecteur sur les lésions musculaires (16). Une carence induirait une hyperexcitabilité nerveuse, des spasmes musculaires et potentiellement des crampes.

Sources alimentaires : **Graines (courge, sésame), oléagineux (amandes, noix), cacao et eaux minérales riches (Hépar, Rozana).**

La vitamine B6 favorise la biodisponibilité et l'absorption cellulaire du magnésium et optimise la synthèse des neurotransmetteurs (GABA, sérotonine) impliqués dans le contrôle neuromusculaire. Une étude de 2018 rapporte un plus grand bénéfice du magnésium associé à la vitamine B6 (9).

Sources alimentaires : **Foie, volaille, poisson gras (thon, saumon), banane, avocat, pois chiches, céréales complètes.**

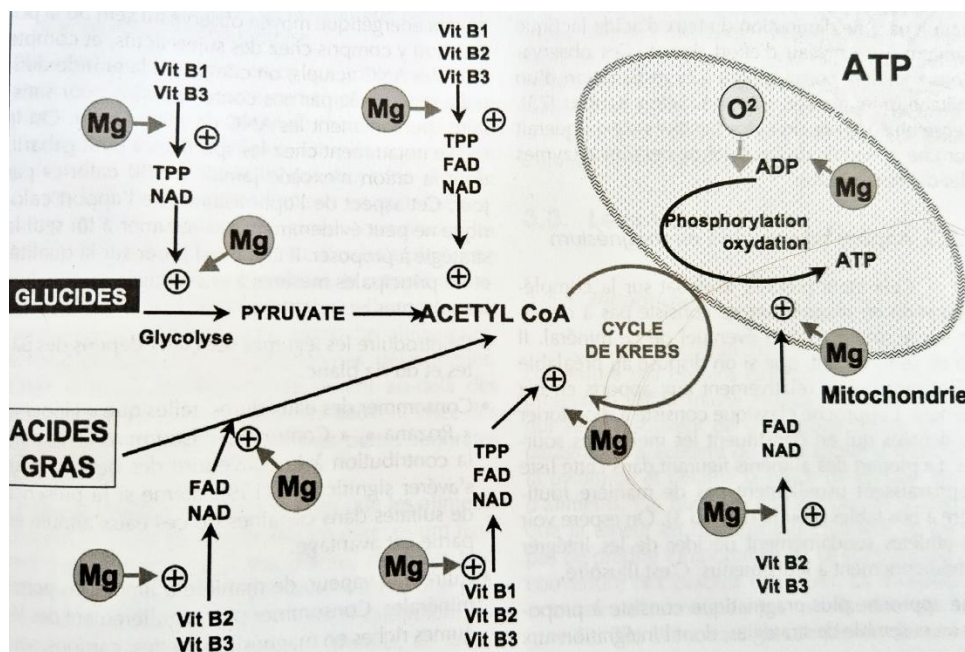


Fig 2 : Les rôles métaboliques du magnésium : ce graphique schématise l'intervention du magnésium dans l'ensemble des métabolismes, où il participe, en particulier à toutes les réactions mettant en jeu l'échange ou l'utilisation des groupements phosphate. Cela permet de comprendre pourquoi sa déficience peut occasionner de la fatigue et une altération des performances. (Document IEDM, Denis Riché, Micronutrition, santé et performance)

2.2 Autres électrolytes

- **Sodium** : régule l'équilibre hydrique, la conduction nerveuse et le potentiel d'action. En cas d'hyponatrémie : baisse de l'excitabilité neuromusculaire, troubles nerveux, risque de crampes. **Sport** : pertes importantes par sudation, surtout en climat chaud ou effort prolongé → à compenser avec boissons riches en électrolytes.
- **Potassium** : participe à la repolarisation des cellules musculaires après contraction. En cas d'hypokaliémie : altère le relâchement musculaire, provoque crampes, faiblesse musculaire, fatigue. **Sport** : pertes via sueur, surtout si régime pauvre en végétaux.

- **Calcium** : impliqué dans la contraction musculaire, mais souvent bien régulé si l'équilibre magnésium est assuré, déclenche la contraction musculaire via interaction avec la troponine dans la cellule musculaire. Déficit : mauvaise libération de calcium → contractions désorganisées, fatigue rapide, tétanie ou crampes. **Sport** : besoins augmentés à long terme, surtout si apport alimentaire bas (végans, intolérants au lactose).

Une étude (22) suggère que les processus de transport musculaires Na^+ , K^+ et Ca^{2+} fortement régulés peuvent être des facteurs importants de fatigue lors d'un exercice prolongé, cela expliquerait l'effet indirect de ces électrolytes sur les EAMC.

Sources alimentaires pour le potassium : **Légumes (épinards, pommes de terre, betteraves), fruits (banane, avocat, melon), légumineuses et eaux minérales riches (type St-Yorre, Vichy)** et pour le calcium : **Produits laitiers (fromage, yaourt, lait), eaux minérales riches (Contrex, Hépar), choux, amandes, sardines avec arêtes.**

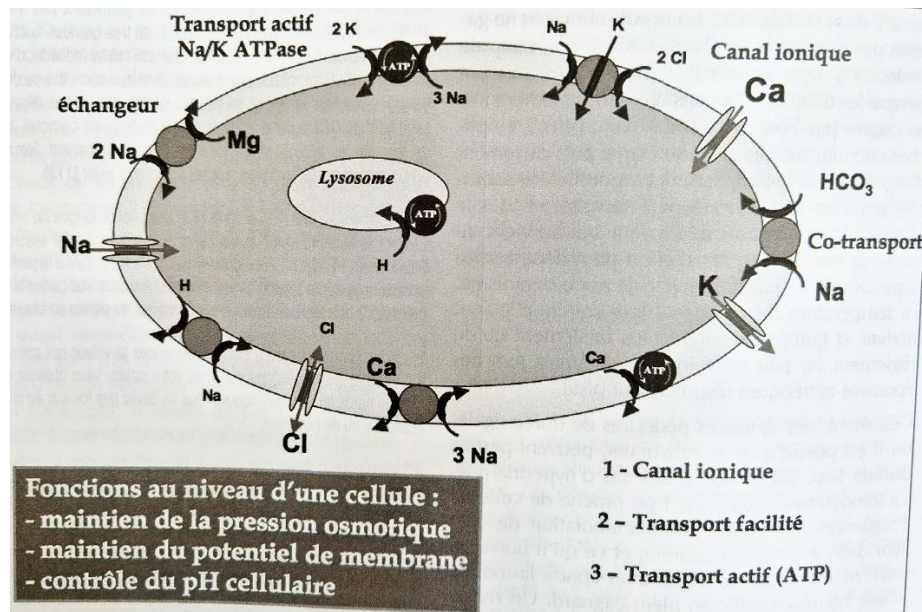


Fig 3 : Les principaux échanges ioniques cellulaires : l'homéostasie ionique est assurée par des échanges ioniques, s'effectuant par divers mécanismes au niveau cellulaire. Les principaux échanges sont les suivants : les canaux calciques, sodiques ou potassiques, ils peuvent nécessiter ou non un activateur (canaux potassique calcium dépendant), les transports facilités comme le cotransport Na/HCO_3 ou les transports actifs : nécessitant de l'énergie comme la Na/H ATPase. Ces canaux participent au maintien de la pression osmotique, du potentiel de membrane et au contrôle du pH cellulaire. C'est pour cette raison que l'on trouve un effet indirect des électrolytes sur les EAMC. (Document IEDM, Denis Riché, Micronutrition, santé et performance)

2.3 Antioxydants et anti-inflammatoires

2.3.1 Vitamines C et E

Elles sont de puissants anti-oxydants. Les études montrent une réduction du stress oxydatif et des marqueurs de dommage musculaire (10). Par contre, une autre étude sur les sports d'endurance montre aucun gain supplémentaire en VO_2max ou performance par rapport au placebo et par contre, une atténuation des adaptations cellulaires (biogenèse mitochondriale, expression PGC-1 α et COX4) dans le groupe supplémenté, comparé au placebo (11). Conclusion : les vitamines C/E peuvent gêner certaines adaptations à l'entraînement en endurance. Nous ne les utiliserons pas dans notre protocole.

2.3.2 Le zinc

C'est un oligo-élément essentiel à la fonction musculaire, c'est un co-facteur clé qui participe à plus de 300 réactions enzymatiques, dont celles liées à la synthèse des protéines musculaires, la réparation cellulaire et la neutralisation du stress oxydatif (via la superoxyde dismutase SOD1). Il paraît donc indispensable à la régénération musculaire après l'effort. Le zinc a également un rôle très important sur l'immunité en soutenant les défenses post-effort (12). Il limite le stress oxydatif immunitaire induit par l'exercice prolongé. Un statut en zinc adéquat contribuerait indirectement à prévenir les crampes via meilleure fonction musculaire, fluidité sanguine et oxygénation, réduction du stress oxydatif et inflammatoire. Mais il n'existe pas à ce jour d'essai clinique qui a spécifiquement testé l'effet du zinc sur les crampes musculaires chez des sportifs d'endurance.

2.3.3 Le Coenzyme Q10

Aucune étude clinique publiée n'a observé directement l'impact de la CoQ₁₀ sur la fréquence ou l'intensité des crampes chez les coureurs, cyclistes ou triathlètes. Mais une revue systématique, publiée dans *Nutriments* en 2023, conclut que la supplémentation en CoQ₁₀ administrée par voie orale (30-300 mg) a pu potentialiser l'activité antioxydante plasmatique et les performances anaérobies, réduisant les marqueurs liés au stress oxydatif chez les athlètes (14). Les bénéfices sur la récupération et la fatigue suggèrent un effet indirect possible, mais sans preuve solide.

2.3.4 Oméga-3

Les oméga-3 jouent un rôle essentiel chez les sportifs (en endurance et en récupération). Ils ont un rôle anti-inflammatoire puissant : EPA & DHA réduisent les cytokines pro-inflammatoires (IL-6, TNF- α) et modulent les prostaglandines → moins de douleurs musculaires (23) et d'inflammation après l'effort et améliorent la récupération musculaire : réduction des douleurs musculaires post-effort et diminution des microlésions grâce à une meilleure fluidité membranaire et une régulation du stress oxydatif. Plusieurs mécanismes physiopathologiques clés des crampes sont modulés par les oméga-3 mais à ce jour, aucune étude clinique n'a démontré directement que les oméga-3 réduisent les EAMC.

Sources alimentaires pour les oméga-3 : **Poissons gras** (sardine, maquereau, saumon, hareng), **graines de lin et de chia, noix, huile de colza ou lin.**

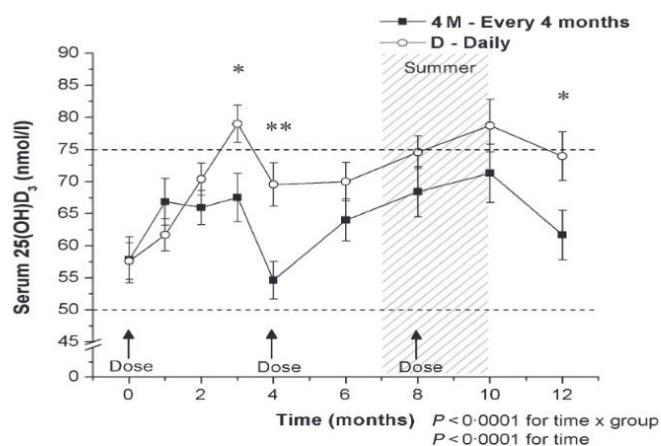
2.3.5 Pycnogenol®

Vinciguerra et al. en 2006 (7) ont étudié le Pycnogenol® qui est un extrait breveté d'écorce de pin maritime des Landes (*Pinus pinaster*), originaire du sud-ouest de la France. Il est riche en polyphénols, en particulier en procyanidines, catéchines, acides phénoliques et flavonoïdes. C'est un puissant antioxydant naturel, largement étudié pour ses effets sur la santé vasculaire, l'inflammation et le stress oxydatif. Les expérimentateurs concluent que Pycnogenol® réduit efficacement les douleurs et les crampes survenant pendant l'exercice physique augmentant ainsi l'efficacité des programmes d'entraînement chez le sportif de loisir, tout comme chez l'athlète de compétition.

2.4 La vitamine D

La vitamine D joue un rôle essentiel dans la santé neuromusculaire, sa carence pourrait-elle favoriser les crampes ? La vitamine D agit sur la transmission neuromusculaire (régule l'excitabilité des neurones moteurs), la contraction musculaire (homéostasie du calcium intracellulaire) et la santé osseuse et musculaire globale (une carence réduit la force et augmente le risque de spasmes). Elle est cruciale pour optimiser la fonction mitochondriale, essentielle à la production d'énergie musculaire lors de l'effort. Les déficits entraînent une fatigue plus rapide, une récupération inefficace et une moindre capacité de régénération musculaire (24). Même si peu d'essais ciblent spécifiquement les performances sportives, les données disponibles renforcent l'importance d'un statut optimal pour les athlètes.

Sources alimentaires : **Poissons gras (saumon, maquereau, sardine), huile de foie de morue, jaune d'œuf.**



Zheng, Y. T., Cui, Q. Q., Hong, Y. M., & Yao, W. G. (2015). A meta-analysis of high dose, intermittent vitamin D supplementation among older adults. *PLoS one*, 10(1), e0115850.
Pekkarinen, T., Valimäki, V. V., Aarum, S., Turpeinen, U., Härmäläinen, E., Löytyniemi, E., & Valimäki, M. J. (2010). The same annual dose of 292000 IU of vitamin D3 (cholecalciferol) on either daily or four monthly basis for elderly women: 1-year comparative study of the effects on serum 25 (OH) D3 concentrations and renal function. *Clinical endocrinology*, 72(4), 455-461.

Fig 4 : Intérêt de la supplémentation quotidienne vs mensuelle pour la vitamine D

2.5 Micronutriments de soutien

Le fer et la vitamine B12, souvent déficitaires chez les ultra-endurants (25), soutiennent la capacité aérobie et la récupération.

Le fer chez le sportif assure le transport de l'oxygène → essentiel à l'endurance et à la production de l'énergie : participe à la synthèse d'ATP dans les mitochondries donc sans fer → moins d'ATP → fatigue musculaire plus rapide. Une carence peut entraîner : détérioration de la force musculaire, fatigue, et dysfonctionnement neuromusculaire, ce qui constitue un terrain favorable aux crampes musculaires (13). Il n'y a pas d'étude clinique ciblée mesurant directement l'effet de la supplémentation en fer sur les EAMC.

Sources alimentaires : **Abats (foie), viandes rouges, boudin noir** (fer héminique, bien absorbé), et **légumineuses, lentilles, épinards, tofu** (fer non héminique, mieux absorbé avec vitamine C).

Bien que peu d'études cliniques ciblent spécifiquement la **vitamine B12** et les crampes, plusieurs données cliniques et mécanismes biologiques soutiennent un lien plausible : la B12 a un rôle neurologique majeur, elle est essentielle à la myélinisation des nerfs périphériques. Une carence provoque des neuropathies périphériques, responsables de crampes, fourmillements, engourdissements ou spasmes. Plusieurs cas cliniques rapportent des crampes et douleurs musculaires chez des patients carencés en B12, avec résolution après supplémentation (26). Elle intervient aussi dans la synthèse des neurotransmetteurs et la fonction neuromusculaire (carence → altération de la commande musculaire, favorisant les décharges involontaires → crampes ?) et une carence en B12 entraîne une anémie macrocytaire, une mauvaise oxygénation musculaire → Moins d'ATP → muscles plus sujets aux spasmes et contractures.

Le lien entre carence en B12 et crampes est documenté en neurologie clinique, bien que peu étudié spécifiquement chez les sportifs. Une supplémentation peut être efficace en cas de carence avérée, notamment chez les végétariens, les végétans, les seniors, sportifs avec troubles digestifs ou malabsorption.

Sources alimentaires : **Abats (foie, rognons), viandes, poissons, fruits de mer, œufs et produits laitiers**. (Vitamine absente des aliments végétaux non enrichis.)

	Normal absorption	Malabsorptive disease (eg, PA)
Estimated daily loss/requirement	~ 1 µg/day	~ 2 µg/day*
Recommended daily allowance	2.4 µg/day†	Supplements are required
Average body stores of cobalamin	~ 2500 µg	Depends on stage of depletion
Ratio of stores to daily losses	2500:1	~ 1200:1‡
Amount (percentage) absorbed from a single oral dose of:		
1 µg	0.56 µg (56%)	0.01 µg (1.2%)
10 µg	1.6 µg (16%)	0.1 µg (1.2%)
50 µg	1.5 µg (3%)	0.6 µg (1.2%)
500 µg	9.7 µg (2%)	7.0 µg (1.3%)
1000 µg	~ 13 µg (1.3%)	~ 12 µg (1.2%)
Amount (percentage) retained from a single injection of:		
10 µg	9.7 µg (97%)	Same as normal
100 µg	55 µg (55%)	Same as normal
1000 µg	150 µg (15%)	Same as normal

Fig 5 : Supplémentation en vitamine B12 chez les adultes végétariens en bonne santé : un apport oral de 50 à 100 µg / jour ou 2 mg / semaine (divisé en 2 doses orales) semble suffisante pour couvrir les besoins de 2,4 µg / jour pour les adultes végétariens en bonne santé en tenant compte de l'efficacité de l'absorption et de la voie passive (27).

2.6 Protection de la barrière intestinale et microbiote

Le maintien d'un microbiote équilibré, par une alimentation riche en fibres et en probiotiques, et la supplémentation en glutamine, sont essentiels pour limiter la perméabilité intestinale, améliorer la digestion, et optimiser l'absorption des micronutriments. Un microbiote déséquilibré (dysbiose) pourrait favoriser l'apparition de crampes en perturbant l'absorption de minéraux essentiels (magnésium, potassium, calcium), modifiant la réactivité neuromusculaire via l'inflammation et les neuromodulateurs et provoquant un stress oxydatif par perméabilité intestinale accrue. Agir sur le microbiote (fibres, aliments fermentés, probiotiques) peut donc réduire le terrain favorable aux crampes, surtout chez les sportifs. Il n'existe pas encore d'études cliniques directes établissant un lien entre les crampes musculaires et le microbiote intestinal chez les humains. Toutefois, ces mécanismes physiologiques suggèrent une connexion plausible et pertinente et un article de 2014 émet des hypothèses d'amélioration des symptômes fréquents des sportifs d'endurance (17).

3. Protocole micronutritionnel adapté aux sportifs d'ultra-distance

Le protocole vise à :

- Optimiser les réserves de magnésium et de cofacteurs essentiels ;
- Maintenir l'équilibre électrolytique pendant l'effort ;
- Réduire la fatigue neuromusculaire et le stress oxydatif ;
- Favoriser une récupération musculaire rapide et efficace.

Calendrier de mise en œuvre :

Phase	Durée	Objectifs	Compléments recommandés
Préparation	3 à 4 semaines	Constitution des réserves	Mg bisglycinate (300–400 mg/j), vit B6 (25-50 mg), Vit D3 (2000 UI), Zinc (15-30 mg), Pycnogenol® (100-150 mg/jour)
Pré-compétition	7 à 10 jours	Stabilisation intestinale	Probiotiques, Pycnogenol®, glutamine
Avant course	48h	Chargement électrolytique	Boisson hydratante riche en Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺
Pendant la course	Pendant la course	Maintien de l'équilibre	Boissons glucido-électrolytiques + nutrition effort
Récupération	7 à 10 jours	Réparation musculaire	Mg+B6, Oméga-3, Protéines, Zinc, Q10 (100mg)

Dans l'idéal et afin de personnaliser au mieux, un bilan complet sera effectué en amont pour adapter au mieux ce protocole. Le bilan martial, le taux de vitamine B12 et le microbiote du sportif seront testés afin de ne pas compléter à l'aveugle. Et pourquoi pas, pour aller plus loin, les polymorphismes génétiques afin de personnaliser encore mieux le protocole nutritionnel et micro-nutritionnel du sportif.

Nous serons attentifs sur les compléments proposés à nos sportifs sur leur conformité avec les règles anti-dopage et le risque de contamination.

4. Résultats attendus, discussion et limites et Conclusion

Résultats attendus : Une réduction significative de la fréquence et de la gravité des crampes, une amélioration des performances et de la récupération, ainsi qu'une meilleure qualité de vie pendant la préparation et après l'effort.

Discussion : La prévention des crampes repose sur une approche holistique, intégrant micronutrition, hydratation, entraînement et récupération. Le magnésium, en synergie avec la vitamine B6, joue un rôle fondamental, mais le maintien de l'équilibre global est indispensable. La variabilité individuelle impose une personnalisation des protocoles.

Limite : Le manque d'études randomisées à grande échelle limite la généralisation des conclusions. La variabilité interindividuelle et les facteurs environnementaux (climat, durée d'effort) compliquent l'évaluation précise. L'absence de biomarqueurs fiables pour le statut magnésium intracellulaire est un frein à l'ajustement personnalisé (on préférera le Mg érythrocytaire au dosage plasmatique).

Conclusion et perspectives : Le protocole micronutritionnel proposé constitue une stratégie prometteuse pour la prévention des EAMC en ultra-distance. Son application dans la pratique clinique doit être encouragée, accompagnée d'études contrôlées pour affiner les recommandations. L'avenir réside dans la médecine fonctionnelle personnalisée, avec un suivi biologique rigoureux et l'intégration de la micronutrition au cœur de la préparation sportive d'endurance.

Références bibliographiques

1. Kantarowski P, Hiller W, Garrett W. Etudes sur les crampes chez 2600 athlètes d'endurance. *Med Sci Sports Exerc.* 1990 ; 22 : S104
2. M P Schwellnus ¹, E W Derman, T D Noakes, Etiologie des crampes musculaires squelettiques pendant l'exercice : une hypothèse inédite. *J Sports Sci.* 1997 juin ; 15(3) : 277-85. DOI : 10.1080/026404197367281.
3. Marco Alessandro Minetto ¹, Aleš Holobar, Alberto Botter, Dario Farina, origines et développement des crampes musculaires. *Exerc Sport Sci Rev.* 2013 Janv ; 41(1) :3-10. Doi : 10.1097/JES.0b013e3182724817
4. P. Schwellnus, M., Derman, E. W. et Noakes, T. D. (1997). Étiologie des « crampes » musculaires squelettiques pendant l'exercice : une hypothèse nouvelle. *Journal des sciences du sport*, 15(3), 277-285. <https://doi.org/10.1080/026404197367281>
5. de Baaij JHF, Hoenderop JGJ, Bindels RJM. Magnesium in Man: Implications for Health and Disease. *Physiol Rev.* 2015;95(1):1-46. doi:10.1152/physrev.00012.2014
6. Poullos A, Papanikolaou K, Draganidis D, Tsimeas P, Chatzinikolaou A, Tsiokanos A, Jamurtas AZ, Fatouros IG. Les effets de la supplémentation en antioxydants sur les performances et la récupération au football : un examen critique des preuves disponibles. *Nutriments.* 6 novembre 2024 ; 16(22):3803. DOI : 10.3390/nu16223803. PMID : 39599590 ; PMCID : PMC11597853.
7. Vinciguerra G, Belcaro G, Cesarone MR, Rohdewald P, Stuard S, Ricci A, Di Renzo A, Hosoi M, Dugall M, Ledda A, Cacchio M, Acerbi G, Fano F. Crampes et douleurs musculaires : prévention par le pycnogenol chez les sujets normaux, les patients veineux, les athlètes, les claudicants et dans la microangiopathie diabétique. *Angiologie.* 2006 mai-juin ; 57(3):331-9. DOI : 10.1177/000331970605700309. PMID : 16703193.
8. Chantler S, Griffiths A, Matu J, Davison G, Jones B, Deighton K. Les effets de l'exercice sur les marqueurs indirects des dommages intestinaux et de la perméabilité : une revue systématique et une méta-analyse. 2021 janv. ; 51(1):113-124. DOI : 10.1007/S40279-020-01348-Y. PMID : 33201454 ; PMCID : PMC7806566.
9. Pouteau E, Kabir-Ahmadi M, Noah L, Mazur A, Dye L, Hellhammer J, Pickering G, Dubray C. Supériorité du magnésium et de la vitamine B6 sur le magnésium seul sur le stress sévère chez les adultes en bonne santé atteints de magnésémie faible : un essai clinique randomisé en simple aveugle. *PLoS One.* 18 décembre 2018 ; 13(12) :e0208454. DOI : 10.1371/journal.pone.0208454. PMID : 30562392 ; PMCID : PMC6298677.
10. Taghiyar M, Darvishi L, Askari G, Feizi A, Hariri M, Mashhadi NS, Ghiasvand R. L'effet de la supplémentation en vitamine C et e sur les lésions musculaires et le stress oxydatif chez les athlètes féminines : un essai clinique. *Int J Prev Med.* 2013 avr. 4(Suppl 1) :S16-23. PMID : 23717764 ; PMCID : PMC3665020.
11. Paulsen G, Cumming KT, Holden G, Hallén J, Rønnestad BR, Sveen O, Skaug A, Paur I, Bastani NE, Østgaard HN, Buer C, Midttun M, Freuchen F, Wiig H, Ulseth ET, Garthe I, Blomhoff R, Benestad HB, Raastad T. La supplémentation en vitamine C et E entrave l'adaptation cellulaire à l'entraînement d'endurance chez l'homme : un essai contrôlé randomisé en double aveugle. *J Physiol.* 15 avril 2014 ; 592(8):1887-901. DOI : 10.1113/jphysiol.2013.267419. Epub 3 février 2014. PMID : 24492839 ; PMCID : PMC4001759.
12. Singh A, Failla ML, Deuster PA. Changements de la fonction immunitaire induits par l'exercice : effets de la supplémentation en zinc. *J Appl Physiol* (1985). 1994 juin ; 76(6):2298-303. DOI : 10.1152/jappl.1994.76.6.2298. PMID : 7928850.
13. Stugiewicz M, Tkaczyszyn M, Kasztura M, Banasiak W, Ponikowski P, Jankowska EA. L'influence de la carence en fer sur le fonctionnement des muscles squelettiques : preuves expérimentales et implications cliniques. *Eur J Échec cardiaque.* Juillet 2016 ; 18(7):762-73. DOI : 10.1002/ejhf.467. Epub 21 janvier 2016. PMID : 26800032.
14. Fernandes MSS, Fidelis DEDS, Aidar FJ, Badicu G, Greco G, Cataldi S, Santos GCJ, de Souza RF, Ardigò LP. Supplémentation en coenzyme Q10 chez les athlètes : une revue systématique. *Nutriments.* 15 sept. 2023 ; 15(18):3990. DOI : 10.3390/nu15183990. PMID : 37764774 ; PMCID : PMC10535924.
15. Volpe SL. Le magnésium et l'athlète. *Curr Sports Med Rep.* 2015 juillet-août ; 14(4):279-83. doi : 10.1249/JSR.000000000000178. PMID : 26166051.
16. Tarsitano MG, Quinzi F, Folino K, Greco F, Oranges FP, Cerulli C, Emerenziani GP. Effets de la supplémentation en magnésium sur les douleurs musculaires dans différents types d'activités physiques : une revue systématique. *J Transl Med.* 5 juillet 2024 ; 22(1):629. DOI : 10.1186/S12967-024-05434-X. PMID : 38970118 ; PMCID : PMC11227245.
17. Pyne DB, West NP, Cox AJ, Cripps AW. Supplémentation en probiotiques pour les athlètes - effets cliniques et physiologiques. *Eur J Sport Sci.* 2015 ; 15(1):63-72. DOI : 10.1080/17461391.2014.971879. Epub 23 octobre 2014. PMID : 25339255.
18. Jahic D, Begic E. Crampes musculaires associées à l'exercice - doutes sur la cause. *Mater Sociomed.* mars 2018 ; 30(1):67-69. DOI : 10.5455/MSM.2018.30.67-69. PMID : 29670481 ; PMCID : PMC5857054.

19. Schwellnus MP, Nicol J, Laubscher R, Noakes TD. Les concentrations sériques d'électrolytes et l'état d'hydratation ne sont pas associés aux crampes musculaires associées à l'exercice (EAMC) chez les coureurs de fond. *Br J Sports Med.* août 2004 ; 38(4):488-92. DOI : 10.1136/BJSM.2003.007021. PMID : 15273192 ; PMCID : PMC1724901.
20. Schwellnus MP, Allie S, Derman W, Collins M. Augmentation de la vitesse de course et lésions musculaires avant la course en tant que facteurs de risque de crampes musculaires associées à l'exercice dans un ultra-marathon de 56 km : une étude de cohorte prospective. *Br J Sports Med.* 2011 nov. ; 45(14):1132-6. DOI : 10.1136/BJSM.2010.082677. Epub 13 mars 2011. PMID : 21402566.
21. Obi T, Mizoguchi K, Matsuoka H, Takatsu M, Nishimura Y. Crampe musculaire à la suite d'une altération de la fonction GABA - une observation électrophysiologique et pharmacologique. *Nerf musculaire.* 1993 novembre ; 16(11):1228-31. DOI : 10.1002/mus.880161113. PMID : 8413375.
22. Leppik JA, Aughey RJ, Medved I, Fairweather I, Carey MF, McKenna MJ. L'exercice prolongé jusqu'à la fatigue chez l'homme altère l'activité de la Na⁺-K⁺-ATPase du muscle squelettique, la libération de Ca²⁺ du réticulum sarcoplasmique et l'absorption de Ca²⁺. *J Appl Physiol* (1985). octobre 2004 ; 97(4):1414-23. DOI : 10.1152/japplphysiol.00964.2003. Epub 2004 21 mai. PMID : 15155714.
23. Kyriakidou Y, Wood C, Ferrier C, Dolci A, Elliott B. L'effet de la supplémentation en acides gras polyinsaturés oméga-3 sur les lésions musculaires induites par l'exercice. *J Int Soc Sports Nutr.* 13 janvier 2021 ; 18(1):9. DOI : 10.1186/s12970-020-00405-1. PMID : 33441158 ; PMCID : PMC7807509.
24. Agoncillo M, Yu J, Gunton JE. Le rôle de la vitamine D dans la réparation et la régénération des muscles squelettiques chez les modèles animaux et les humains : une revue systématique. *Nutriments.* 16 octobre 2023 ; 15(20):4377. DOI : 10.3390/nu15204377. PMID : 37892452 ; PMCID : PMC10609905.
25. Hinton PS. Le fer et l'athlète d'endurance. *Appl Physiol Nutr Metab.* Septembre 2014 ; 39(9):1012-8. DOI : 10.1139/APNM-2014-0147. Epub 2014 27 mai. PMID : 25017111.
26. Scalabrino G. Les bases à multiples facettes de la neurotrophie de la vitamine B12 (cobalamine) dans le système nerveux central adulte : leçons tirées de sa carence. *Prog Neurobiol.* Juillet 2009 ; 88(3):203-20. DOI : 10.1016/j.pneurobio.2009.04.004. Epub 24 avril 2009. PMID : 19394404.
27. Carmel R. Comment je traite la carence en cobalamine (vitamine B12). *Sang.* 15 septembre 2008 ; 112(6):2214-21. DOI : 10.1182/blood-2008-03-040253. Epub le 7 juillet 2008. PMID : 18606874 ; PMCID : PMC2532799.