

**THESE  
POUR LE DIPLOME D'ETAT  
DE DOCTEUR EN PHARMACIE**

**Soutenu publiquement le 20 Octobre 2023  
Par M. Germain Lestavel**

---

**« Place de la nutrition dans les sports d'endurance »**

---

**Membres du jury :**

**Président :** Anne Muhr-Tailleux, Professeurs des Universités

**Assesseur :** Françoise Martin, Maitre de Conférences des Universités

**Membre extérieur :** Bruno Moncomble, Pharmacien d'Officine à Hellemmes-Lille





**DEMANDE D'AUTORISATION DE SOUTENANCE - THÈSE D'EXERCICE**

Nom et Prénom de l'étudiant : Lestavel Germain ..... INE : 21404776 .....

Date, heure et lieu de soutenance

Le 20/10/2023 ..... à 18h15 .. Amphithéâtre ou salle : Allais .....

**Engagement de l'étudiant - Charte de non-plagiat**

J'atteste sur l'honneur que tout contenu qui n'est pas explicitement présenté comme une citation est un contenu personnel et original.

Signature de l'étudiant

**Avis du directeur de thèse**

Nom : Martin .....

Prénom : Françoise .....

Favorable

Défavorable

Motif de l'avis défavorable : .....

Je certifie que la thèse provisoire de M LESTAVEL Germain ..... ne nécessite plus de modifications majeures avant la soutenance de thèse

Date : 21/09/23

Signature :

**Avis du président du jury**

Nom : Muhr-Tailleux .....

Prénom : Anne .....

Favorable

Défavorable

Motif de l'avis défavorable : .....

Date : 18/09/2023

Signature :

**Décision du Doyen**

Favorable

**Le Premier Assesseur,**  Défavorable

Le 10/10/23

Le Doyen

**Anne GARAT**  
  
**A. GARAT**

D. ALLORGE



ND : La faculté n'entend donner aucune approbation ou improbation aux opinions émises dans les thèses : qui doivent être regardées comme propres à leurs auteurs

**Faculté de Pharmacie de Lille**  
**3 Rue du Professeur Laguesse – 59000 Lille**  
**03 20 96 40 40**  
**<https://pharmacie.univ-lille.fr>**

### Université de Lille

Président  
Premier Vice-président  
Vice-présidente Formation  
Vice-président Recherche  
Vice-présidente Réseaux internationaux et européens  
Vice-président Ressources humaines  
Directrice Générale des Services

Régis BORDET  
Etienne PEYRAT  
Christel BEAUCOURT  
Olivier COLOT  
Kathleen O'CONNOR  
Jérôme FONCEL  
Marie-Dominique SAVINA

### UFR3S

Doyen  
Premier Vice-Doyen  
Vice-Doyen Recherche  
Vice-Doyen Finances et Patrimoine  
Vice-Doyen Coordination pluriprofessionnelle et Formations sanitaires  
Vice-Doyen RH, SI et Qualité  
Vice-Doyenne Formation tout au long de la vie  
Vice-Doyen Territoires-Partenariats  
Vice-Doyenne Vie de Campus  
Vice-Doyen International et Communication  
Vice-Doyen étudiant

Dominique LACROIX  
Guillaume PENEL  
Éric BOULANGER  
Damien CUNY  
Sébastien D'HARANCY  
Hervé HUBERT  
Caroline LANIER  
Thomas MORGENROTH  
Claire PINÇON  
Vincent SOBANSKI  
Dorian QUINZAIN

### Faculté de Pharmacie

Doyen  
Premier Assesseur et Assesseur en charge des études  
Assesseur aux Ressources et Personnels  
Assesseur à la Santé et à l'Accompagnement  
Assesseur à la Vie de la Faculté  
Responsable des Services  
Représentant étudiant

Delphine ALLORGE  
Benjamin BERTIN  
Stéphanie DELBAERE  
Anne GARAT  
Emmanuelle LIPKA  
Cyrille PORTA  
Honoré GUISE

**Professeurs des Universités - Praticiens Hospitaliers (PU-PH)**

| Civ. | Nom          | Prénom    | Service d'enseignement                                 | Section CNU |
|------|--------------|-----------|--|-------------|
| Mme  | ALLORGE      | Delphine  | Toxicologie et Santé publique                          | 81          |
| M.   | BROUSSEAU    | Thierry   | Biochimie  | 82          |
| M.   | DÉCAUDIN     | Bertrand  | Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière      | 81          |
| M.   | DINE         | Thierry   | Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique | 81          |
| Mme  | DUPONT-PRADO | Annabelle | Hématologie  | 82          |
| Mme  | GOFFARD      | Anne      | Bactériologie - Virologie                              | 82          |
| M.   | GRESSIER     | Bernard   | Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique | 81          |
| M.   | ODOU         | Pascal    | Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière      | 80          |
| Mme  | POULAIN      | Stéphanie | Hématologie  | 82          |
| M.   | SIMON        | Nicolas   | Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique | 81          |
| M.   | STAELS       | Bart      | Biologie cellulaire                                    | 82          |

**Professeurs des Universités (PU)**

| Civ. | Nom          | Prénom      | Service d'enseignement                                 | Section CNU |
|------|--------------|-------------|--|-------------|
| M.   | ALIOUAT      | El Moukhtar | Parasitologie - Biologie animale                       | 87          |
| Mme  | AZAROUAL     | Nathalie    | Biophysique - RMN                                      | 85          |
| M.   | BLANCHEMAIN  | Nicolas     | Pharmacotechnie industrielle                           | 85          |
| M.   | CARNOY       | Christophe  | Immunologie  | 87          |
| M.   | CAZIN        | Jean-Louis  | Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique | 86          |
| M.   | CHAVATTE     | Philippe    | Institut de Chimie Pharmaceutique Albert Lespagnol     | 86          |
| M.   | COURTECUISSÉ | Régis       | Sciences végétales et fongiques                        | 87          |
| M.   | CUNY         | Damien      | Sciences végétales et fongiques                        | 87          |
| Mme  | DELBAERE     | Stéphanie   | Biophysique - RMN                                      | 85          |
| Mme  | DEPREZ       | Rebecca     | Chimie thérapeutique                                   | 86          |

|     |               |                 |   |    |
|-----|---------------|-----------------|---|----|
| M.  | DEPREZ        | Benoît          | Chimie bioinorganique                                 | 85 |
| M.  | DUPONT        | Frédéric        | Sciences végétales et fongiques                       | 87 |
| M.  | DURIEZ        | Patrick         | Physiologie   | 86 |
| M.  | ELATI         | Mohamed         | Biomathématiques                                      | 27 |
| M.  | FOLIGNÉ       | Benoît          | Bactériologie - Virologie                             | 87 |
| Mme | FOULON        | Catherine       | Chimie analytique                                     | 85 |
| M.  | GARÇON        | Guillaume       | Toxicologie et Santé publique                         | 86 |
| M.  | GOOSSENS      | Jean-François   | Chimie analytique                                     | 85 |
| M.  | HENNEBELLE    | Thierry         | Pharmacognosie  | 86 |
| M.  | LEBEGUE       | Nicolas         | Chimie thérapeutique                                  | 86 |
| M.  | LEMDANI       | Mohamed         | Biomathématiques                                      | 26 |
| Mme | LESTAVEL      | Sophie          | Biologie cellulaire                                   | 87 |
| Mme | LESTRELIN     | Réjane          | Biologie cellulaire                                   | 87 |
| Mme | MELNYK        | Patricia        | Chimie physique                                       | 85 |
| M.  | MILLET        | Régis           | Institut de Chimie Pharmaceutique<br>Albert Lespagnol | 86 |
| Mme | MUHR-TAILLEUX | Anne            | Biochimie   | 87 |
| Mme | PERROY        | Anne-Catherine  | Droit et Economie pharmaceutique                      | 86 |
| Mme | ROMOND        | Marie-Bénédicte | Bactériologie - Virologie                             | 87 |
| Mme | SAHPAZ        | Sevser          | Pharmacognosie  | 86 |
| M.  | SERGHERAERT   | Éric            | Droit et Economie pharmaceutique                      | 86 |
| M.  | SIEPMANN      | Juergen         | Pharmacotechnie industrielle                          | 85 |
| Mme | SIEPMANN      | Florence        | Pharmacotechnie industrielle                          | 85 |
| M.  | WILLAND       | Nicolas         | Chimie organique                                      | 86 |

### Maîtres de Conférences - Praticiens Hospitaliers (MCU-PH)

| Civ. | Nom       | Prénom          | Service d'enseignement                            | Section CNU |
|------|-----------|-----------------|---|-------------|
| M.   | BLONDIAUX | Nicolas         | Bactériologie - Virologie                         | 82          |
| Mme  | DEMARET   | Julie           | Immunologie                                       | 82          |
| Mme  | GARAT     | Anne            | Toxicologie et Santé publique                     | 81          |
| Mme  | GENAY     | Stéphanie       | Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière | 81          |
| M.   | LANNOY    | Damien          | Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière | 80          |
| Mme  | ODOU      | Marie-Françoise | Bactériologie - Virologie                         | 82          |

### Maîtres de Conférences des Universités (MCU)

| Civ. | Nom             | Prénom       | Service d'enseignement                                 | Section CNU |
|------|-----------------|--------------|--|-------------|
| M.   | AGOURIDAS       | Laurence     | Chimie thérapeutique                                   | 85          |
| Mme  | ALIOUAT         | Cécile-Marie | Parasitologie - Biologie animale                       | 87          |
| M.   | ANTHÉRIEU       | Sébastien    | Toxicologie et Santé publique                          | 86          |
| Mme  | AUMERCIER       | Pierrette    | Biochimie  | 87          |
| M.   | BANTUBUNGI-BLUM | Kadiombo     | Biologie cellulaire                                    | 87          |
| Mme  | BARTHELEMY      | Christine    | Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière      | 85          |
| Mme  | BEHRA           | Josette      | Bactériologie - Virologie                              | 87          |
| M.   | BELARBI         | Karim-Ali    | Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique | 86          |
| M.   | BERTHET         | Jérôme       | Biophysique - RMN                                      | 85          |
| M.   | BERTIN          | Benjamin     | Immunologie  | 87          |
| M.   | BOCHU           | Christophe   | Biophysique - RMN                                      | 85          |
| M.   | BORDAGE         | Simon        | Pharmacognosie   | 86          |
| M.   | BOSC            | Damien       | Chimie thérapeutique                                   | 86          |
| M.   | BRIAND          | Olivier      | Biochimie  | 87          |
| Mme  | CARON-HOUDE     | Sandrine     | Biologie cellulaire                                    | 87          |
| Mme  | CARRIÉ          | Hélène       | Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique | 86          |

|     |                       |                 |   |    |
|-----|-----------------------|-----------------|---|----|
| Mme | CHABÉ                 | Magali          | Parasitologie - Biologie animale                          | 87 |
| Mme | CHARTON               | Julie           | Chimie organique  | 86 |
| M.  | CHEVALIER             | Dany            | Toxicologie et Santé publique                             | 86 |
| Mme | DANEL                 | Cécile          | Chimie analytique   | 85 |
| Mme | DEMANCHE              | Christine       | Parasitologie - Biologie animale                          | 87 |
| Mme | DEMARQUILLY           | Catherine       | Biomathématiques  | 85 |
| M.  | DHIFLI                | Wajdi           | Biomathématiques  | 27 |
| Mme | DUMONT                | Julie           | Biologie cellulaire                                       | 87 |
| M.  | EL BAKALI             | Jamal           | Chimie thérapeutique                                      | 86 |
| M.  | FARCE                 | Amaury          | Institut de Chimie Pharmaceutique<br>Albert Lespagnol     | 86 |
| M.  | FLIPO                 | Marion          | Chimie organique  | 86 |
| M.  | FURMAN                | Christophe      | Institut de Chimie Pharmaceutique<br>Albert Lespagnol     | 86 |
| M.  | GERVOIS               | Philippe        | Biochimie   | 87 |
| Mme | GOOSSENS              | Laurence        | Institut de Chimie Pharmaceutique<br>Albert Lespagnol     | 86 |
| Mme | GRAVE                 | Béatrice        | Toxicologie et Santé publique                             | 86 |
| Mme | GROSS                 | Barbara         | Biochimie   | 87 |
| M.  | HAMONIER              | Julien          | Biomathématiques  | 26 |
| Mme | HAMOUDI-BEN<br>YELLES | Chérifa-Mounira | Pharmacotechnie industrielle                              | 85 |
| Mme | HANNOTHIAUX           | Marie-Hélène    | Toxicologie et Santé publique                             | 86 |
| Mme | HELLEBOID             | Audrey          | Physiologie   | 86 |
| M.  | HERMANN               | Emmanuel        | Immunologie   | 87 |
| M.  | KAMBIA KPAKPAGA       | Nicolas         | Pharmacologie, Pharmacocinétique et<br>Pharmacie clinique | 86 |
| M.  | KARROUT               | Younes          | Pharmacotechnie industrielle                              | 85 |
| Mme | LALLOYER              | Fanny           | Biochimie   | 87 |
| Mme | LECOEUR               | Marie           | Chimie analytique   | 85 |
| Mme | LEHMANN               | Hélène          | Droit et Economie pharmaceutique                          | 86 |
| Mme | LELEU                 | Natascha        | Institut de Chimie Pharmaceutique<br>Albert Lespagnol     | 86 |



|     |             |               |   |    |
|-----|-------------|---------------|---|----|
| Mme | LIPKA       | Emmanuelle    | Chimie analytique                           | 85 |
| Mme | LOINGEVILLE | Florence      | Biomathématiques                            | 26 |
| Mme | MARTIN      | Françoise     | Physiologie                                 | 86 |
| M.  | MOREAU      | Pierre-Arthur | Sciences végétales et fongiques             | 87 |
| M.  | MORGENROTH  | Thomas        | Droit et Economie pharmaceutique            | 86 |
| Mme | MUSCHERT    | Susanne       | Pharmacotechnie industrielle                | 85 |
| Mme | NIKASINOVIC | Lydia         | Toxicologie et Santé publique               | 86 |
| Mme | PINÇON      | Claire        | Biomathématiques                            | 85 |
| M.  | PIVA        | Frank         | Biochimie                                   | 85 |
| Mme | PLATEL      | Anne          | Toxicologie et Santé publique               | 86 |
| M.  | POURCET     | Benoît        | Biochimie                                   | 87 |
| M.  | RAVAUX      | Pierre        | Biomathématiques / Innovations pédagogiques | 85 |
| Mme | RAVEZ       | Séverine      | Chimie thérapeutique                        | 86 |
| Mme | RIVIÈRE     | Céline        | Pharmacognosie                              | 86 |
| M.  | ROUMY       | Vincent       | Pharmacognosie                              | 86 |
| Mme | SEBTI       | Yasmine       | Biochimie                                   | 87 |
| Mme | SINGER      | Elisabeth     | Bactériologie - Virologie                   | 87 |
| Mme | STANDAERT   | Annie         | Parasitologie - Biologie animale            | 87 |
| M.  | TAGZIRT     | Madjid        | Hématologie                                 | 87 |
| M.  | VILLEMAGNE  | Baptiste      | Chimie organique                            | 86 |
| M.  | WELTI       | Stéphane      | Sciences végétales et fongiques             | 87 |
| M.  | YOUS        | Saïd          | Chimie thérapeutique                        | 86 |
| M.  | ZITOUNI     | Djamel        | Biomathématiques                            | 85 |

### Professeurs certifiés

| Civ. | Nom      | Prénom    | Service d'enseignement |
|------|----------|-----------|------------------------|
| Mme  | FAUQUANT | Soline    | Anglais                |
| M.   | HUGES    | Dominique | Anglais                |
| M.   | OSTYN    | Gaël      | Anglais                |

### Professeurs Associés

| Civ. | Nom      | Prénom     | Service d'enseignement           | Section CNU |
|------|----------|------------|----------------------------------|-------------|
| M.   | DAO PHAN | Haï Pascal | Chimie thérapeutique             | 86          |
| M.   | DHANANI  | Alban      | Droit et Economie pharmaceutique | 86          |

### Maîtres de Conférences Associés

| Civ. | Nom       | Prénom     | Service d'enseignement                                 | Section CNU |
|------|-----------|------------|--|-------------|
| Mme  | CUCCHI    | Malgorzata | Biomathématiques                                       | 85          |
| M.   | DUFOSSEZ  | François   | Biomathématiques                                       | 85          |
| M.   | FRIMAT    | Bruno      | Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique | 85          |
| M.   | GILLOT    | François   | Droit et Economie pharmaceutique                       | 86          |
| M.   | MASCAUT   | Daniel     | Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique | 86          |
| M.   | MITOUMBA  | Fabrice    | Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière      | 86          |
| M.   | PELLETIER | Franck     | Droit et Economie pharmaceutique                       | 86          |
| M.   | ZANETTI   | Sébastien  | Biomathématiques                                       | 85          |

### Assistants Hospitalo-Universitaire (AHU)

| Civ. | Nom      | Prénom    | Service d'enseignement                                 | Section CNU |
|------|----------|-----------|--|-------------|
| Mme  | CUVELIER | Élodie    | Pharmacologie, Pharmacocinétique et Pharmacie clinique | 81          |
| M.   | GRZYCH   | Guillaume | Biochimie  | 82          |
| Mme  | LENSKI   | Marie     | Toxicologie et Santé publique                          | 81          |
| Mme  | HENRY    | Héloïse   | Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière      | 80          |
| Mme  | MASSE    | Morgane   | Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière      | 81          |

### Attachés Temporaires d'Enseignement et de Recherche (ATER)

| Civ. | Nom       | Prénom  | Service d'enseignement                  | Section CNU |
|------|-----------|---------|---|-------------|
| Mme  | GEORGE    | Fanny   | Bactériologie - Virologie / Immunologie | 87          |
| Mme  | N'GUESSAN | Cécilia | Parasitologie - Biologie animale        | 87          |
| M.   | RUEZ      | Richard | Hématologie                             | 87          |
| M.   | SAIED     | Tarak   | Biophysique - RMN                       | 85          |
| M.   | SIEROCKI  | Pierre  | Chimie bioinorganique                   | 85          |

### Enseignant contractuel

| Civ. | Nom         | Prénom  | Service d'enseignement                            |
|------|-------------|---------|---|
| M.   | MARTIN MENA | Anthony | Biopharmacie, Pharmacie galénique et hospitalière |

## Faculté de Pharmacie de Lille

3 Rue du Professeur Laguesse – 59000 Lille  
03 20 96 40 40  
<https://pharmacie.univ-lille.fr>

**L'Université n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses ; celles-ci sont propres à leurs auteurs.**

## Remerciements

### **Aux membres du jury,**

**Madame Martin**, merci de m'avoir accompagné dans la rédaction de ma thèse et de siéger aujourd'hui dans ce jury.

**Madame Muhr-Tailleux**, merci pour ces années de cours et d'avoir accepté de siéger dans ce jury aujourd'hui.

**Monsieur Moncomble**, merci de m'avoir fait découvrir le monde de la pharmacie et pour le temps que vous m'avez consacré pendant mes différents stages effectués. Vous voir ici dans mon jury a toujours été dans un coin de ma tête et je ne voyais personne d'autre pour vous remplacer tant vous m'avez appris. Pour tout cela, encore un immense merci.

### **A mes proches,**

A **Claire**, de binôme de TP nous sommes devenus des binômes de vie. Merci pour ton soutien et ton amour pendant toutes ces années qui m'ont permis de devenir la personne que je suis aujourd'hui. Tu me pousses tous les jours à me surpasser. Merci pour tout cela et bien plus encore !

Merci **Papa et Maman** pour votre confiance accordée pendant ces années d'étude. Merci d'avoir supporté et résisté à mes techniques de révision stressante.

Merci **Baptiste**, je t'ai souvent attendu, que ce soit à vélo ou à pied, mais tu m'as rendu la pareille pour que l'on finisse nos études ensemble. Merci **Charlotte et Jade** qui partagent maintenant ta vie.

Merci **Mamie**, tu es d'un soutien et d'une gentillesse indéfectible. Grâce à toi et Papi, j'ai de superbes souvenirs gravés à jamais.

Merci **Germain et Marie** pour tous les bons moments passés et à venir à base de soirée, d'apéro et plus récemment de balade à vélo.

Merci **Charles**, même si je suis le plus nul de la famille, merci de m'avoir accueilli dans la tienne comme tu l'as fait.

Merci **Jacques et Laurence** de m'avoir accueilli dans votre famille.

Merci à **toute l'équipe de la pharmacie d'Hellemmes-Lille**, là où tout a commencé. Ce fut un réel plaisir de travailler avec vous et j'en garderai à jamais un excellent souvenir.

Merci à **toute l'équipe de la pharmacie Vauchel** de m'avoir accueillie dans votre équipe lors de mon arrivée sur la côte. C'est un réel plaisir de travailler dans la bonne humeur avec vous.



## Table des matières

|  |    |
|--|----|
| Liste des figures.....   | 18 |
| Liste des Tableaux .....   | 19 |
| Abréviations et acronymes.....                                   | 20 |
| 1. Introduction .....  | 21 |
| 2. Physiologie de l'effort .....                                 | 25 |
| a. Le corps humain .....   | 25 |
| i. Composition .....   | 25 |
| 1. Masse grasse .....  | 27 |
| 2. Masse maigre .....  | 27 |
| 3. Masse osseuse.....  | 27 |
| ii. Consommation de l'énergie au repos .....                     | 28 |
| b. Source et filière énergétique.....                            | 28 |
| i. Le cycle de Krebs .....                                       | 28 |
| 1. Potentiel énergétique du glucose .....                        | 30 |
| 2. Potentiel énergétique des acides gras .....                   | 30 |
| ii. Anaérobie .....  | 31 |
| 1. Anaérobie alactique .....                                     | 31 |
| 2. Anaérobie lactique .....                                      | 32 |
| iii. Aérobie .....   | 33 |
| iv. Bilan des voies énergétiques.....                            | 34 |
| c. L'endurance.....  | 35 |
| i. Définition.....   | 35 |
| ii. Exigence et demande énergétique des sports d'endurance ..... | 35 |
| 1. Dépenses de base.....   | 35 |
| 2. Dépenses liées aux sports d'endurance .....                   | 35 |
| a. La course à pied .....  | 35 |
| b. La natation .....   | 36 |
| c. Le cyclisme .....   | 36 |
| 3. Nutrition.....  | 37 |
| a. Base .....  | 37 |
| b. Balance nutritionnelle journalière .....                      | 38 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| c.    | Balance nutritionnelle pendant l'effort .....        | 40 |
| d.    | Analyse des éléments constituant l'alimentation..... | 40 |
| i.    | Macronutriments .....                                | 40 |
| 1.    | Glucides .....                                       | 40 |
| 2.    | Lipides.....   | 44 |
| 3.    | Les protéines .....                                  | 46 |
| ii.   | Micronutriments .....                                | 47 |
| 1.    | Vitamines.....                                       | 47 |
| a.    | Vitamines hydrosolubles .....                        | 47 |
| i.    | Vitamine B1 .....                                    | 48 |
| ii.   | Vitamine B2.....                                     | 48 |
| iii.  | Vitamine B3.....                                     | 48 |
| iv.   | Vitamine B5.....                                     | 49 |
| v.    | Vitamine B6.....                                     | 49 |
| vi.   | Vitamine B8.....                                     | 49 |
| vii.  | Vitamine B9.....                                     | 50 |
| viii. | Vitamine B12.....                                    | 50 |
| ix.   | Vitamine C.....                                      | 50 |
| b.    | Vitamines liposolubles.....                          | 51 |
| i.    | Vitamine A .....                                     | 51 |
| ii.   | Vitamine D.....                                      | 51 |
| iii.  | Vitamine E .....                                     | 52 |
| iv.   | Vitamine K.....                                      | 52 |
| 2.    | Minéraux .....                                       | 52 |
| a.    | Le calcium .....                                     | 52 |
| b.    | Le magnésium.....                                    | 53 |
| c.    | Le potassium.....                                    | 53 |
| d.    | Le sodium.....                                       | 54 |
| 3.    | Oligo-éléments .....                                 | 54 |
| a.    | Le cuivre.....                                       | 54 |
| b.    | Le fer .....   | 54 |
| c.    | Le sélénium .....                                    | 55 |
| d.    | Le zinc .....  | 55 |



|      |   |    |
|------|---|----|
| e.   | Hydratation .....   | 55 |
| i.   | Perte hydrique.....   | 56 |
| ii.  | Apport hydrique .....   | 56 |
| iii. | Balance hydrique.....   | 56 |
| 4.   | Mise en place du plan nutritionnel du sportif d'endurance ..... | 57 |
| a.   | Programme nutritionnel.....                                     | 57 |
| i.   | Avant l'effort .....  | 57 |
| 1.   | La charge glycolytique .....                                    | 57 |
| 2.   | Les dernières heures avant l'épreuve .....                      | 57 |
| ii.  | Pendant l'effort .....  | 58 |
| iii. | Après.....  | 59 |
| 1.   | Restauration hydrominérale .....                                | 59 |
| 2.   | Restauration des réserves glucidiques.....                      | 59 |
| 3.   | Maintien des acides aminés .....                                | 59 |
| b.   | Idées de recettes .....   | 60 |
| i.   | Avant .....   | 60 |
| 1.   | Le gâteau sport.....  | 60 |
| 2.   | La boule énergétique .....                                      | 62 |
| 3.   | La boisson d'attente .....                                      | 64 |
| ii.  | Pendant .....   | 65 |
| 1.   | La boisson d'effort.....  | 66 |
| 2.   | Le gel énergétique .....  | 68 |
| 3.   | La barre énergétique .....                                      | 70 |
| iii. | Après.....  | 72 |
| c.   | Entraînement à jeun ?.....                                      | 74 |
|      | Conclusion .....  | 75 |
|      | Bibliographie .....   | 77 |

## Liste des figures

Figure 1 : Evolution du nombre de courses à pied hors stade organisées par la FFA, la FFTri et la FFCO pour la période 2010-2018

Figure 2 : Evolution du nombre de licenciés FFA de 2004 à 2020

Figure 3 : Emplacement de 4 plis cutanés : bicipital, tricipital, sous-scapulaire, supra-iliaque

Figure 4 : Cycle de Krebs

Figure 5 : Cycle de la bêta-oxydation des acides gras

Figure 6 : Réaction de conversion de la créatine en créatine phosphate

Figure 7 : Plan National de Nutrition Santé

Figure 8 : Digestion de l'amidon

## Liste des Tableaux

Tableau 1 : Recensement du nombre de pratiquants de running et de pratiquants régulier en France en 2016.

Tableau 2 : Formules utilisées pour l'évaluation de la masse maigre par impédancemétrie.

Tableau 3 : Bilan des filières énergétiques

Tableau 4 : Classification des principaux glucides selon leur digestibilité

Tableau 5 : Index glycémique de 62 aliments publié par David Jenkins en 1981.

Tableau 6 : Apport Nutritionnel du gâteau sport

Tableau 7 : Apport Nutritionnel de la boule énergétique

Tableau 8 : Apport Nutritionnel de la boisson d'attente

Tableau 9 : Apport Nutritionnel de la boisson d'effort

Tableau 10 : Apport Nutritionnel du gel énergétique

Tableau 11 : Apport Nutritionnel de la barre énergétique

Tableau 12 : Apport Nutritionnel de la boisson de récupération

## Abréviations et acronymes

INJEP : Institut National de la Jeunesse et de l'Education Populaire

CREDOC : Centre de Recherche pour l'Etude et l'Observation des Conditions de vie

FFA : Fédération Française d'athlétisme

FFTri : Fédération Française de Triathlon

FFCO : Fédération Française de Course d'Orientation

ATP : Adénosine TriPhosphate

ADP : Adénosine DiPhosphate

NAD : Nicotinamide Adénine Dinucléotide

FAD : Flavine Adénine Dinucléotide

VO<sub>2</sub>max : Volume MAXimal de consommation d'Oxygène

HTA : Hypertension Artériel

PNNS : Programme National Nutrition Santé

GABA : Acide Gamma AminoButyrique

PLP : phosphate de pyridoxal

PMP : pyridoxamine 5'-phosphate

CAP : Course à Pied

Kj : kilojoule

kW : kilowatt

Mj : Mégajoule

## 1. Introduction

Depuis quelques années maintenant, un fort engouement pour les sports d'endurance se ressent en France. Ce phénomène s'observe en particulier sur la course à pied car cela ne demande que très peu de matériel : short, t-shirt, baskets. La course est donc pratiquée par beaucoup de monde, de l'amateur du dimanche à l'athlète de haut niveau tout en passant par « l'amateur éclairé » partageant le même terrain de jeu : la route, les chemins, la nature...

Si on regarde les chiffres, près de 40 % des plus de 15 ans en France déclaraient en 2018 avoir pratiqué une Activité Physique ou Sportive du domaine de la marche ou de la course durant les 12 mois précédents (1). De plus, 16 % de la population française, soit environ 12 millions de français, pratiquent au moins une fois par semaine (Tableau 1).

*Tableau 1 : Recensement du nombre de pratiquants de running et de pratiquants réguliers en France en 2016.*

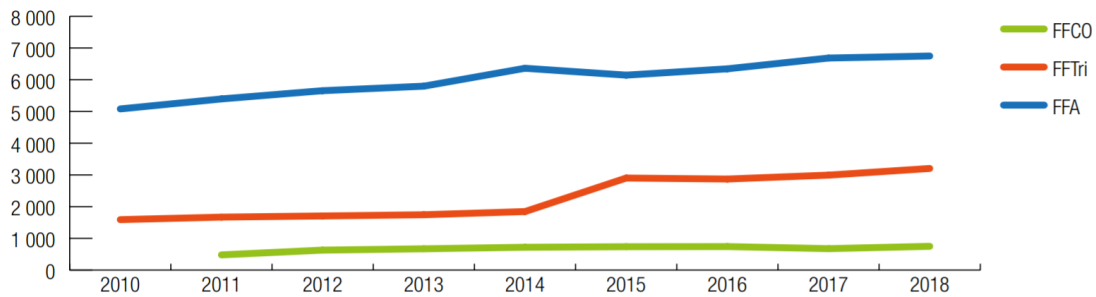
|  | FFA (Sportlab) 2016                      |                          |
|--|--|--------------------------|
|  | En % de la population des 15 ans et plus | En millions de personnes |
| Pratiquants de running   | 25                                       | 16,5                     |
| Pratiquants réguliers de running (au moins une fois par semaine) | 17                                       | 12                       |

*FFA : Fédération Française d'Athlétisme*

SOURCES : DONNEES OBTENUES D'APRES LA FEDERATION FRANÇAISE D'ATHLETISME (SPORTLAB), 2016.

De manière générale, la majorité des pratiquants de la course à pied est engagée dans une pratique amateur, plus ou moins régulière et autonome. A côté de cela, plus d'1,6 millions (soit 17 % des pratiquants de running en France) participent à des compétitions. Ce perfectionnement de la pratique se voit avec l'augmentation du nombre de manifestations sportives observées par les différentes fédérations de sport d'endurance (Figure 1).

L'ÉVOLUTION DU NOMBRE DE COURSES À PIED HORS STADE ORGANISÉES PAR LA FFA, LA FFTri ET LA FFCO POUR LA PÉRIODE 2010-2018.



Sources : Fédération Française d'Athlétisme (FFA), Fédération Française de Triathlon (FFTri) et Fédération Française de Course d'Orientation (FFCO), 2019.

Figure 1 : Evolution du nombre de courses à pied hors stade organisées par la FFA, la FFTri et la FFCO pour la période 2010-2018

Globalement, le nombre d'épreuves organisées a augmenté entre 2010 et 2018, résultat d'une demande croissante de perfectionnement de la part des pratiquants.

FFA : Fédération Française d'Athlétisme

FFTri : Fédération Française de Triathlon

FFCO : Fédération Française de Course d'Orientation

Pierre de Coubertin, fondateur des Jeux Olympiques modernes, nous a laissé plusieurs citations dont la plus connue est sûrement : « *l'important c'est de participer* ». Il y a donc de plus en plus de participants. Parmi eux certains ne veulent pas seulement être « finisher » mais cherchent la performance, leur meilleure version d'eux-mêmes afin de se surpasser. Ainsi on pourra se souvenir de cette autre citation : « *L'important dans la vie, ce n'est point le triomphe, mais le combat. L'essentiel n'est pas d'avoir vaincu, mais de s'être bien battu.* »

Cette quête de la performance passe par plusieurs leviers dont le principal est la préparation. Cette préparation va être optimale avec un entraînement de qualité et quoi de mieux qu'un entraîneur pour entraîner et donc une adhésion à une fédération ? Ainsi la part de licenciés FFA (Fédération Française d'Athlétisme) est en constante augmentation ces dernières années, même s'il y a eu un recul en 2020 suite à la crise sanitaire de la COVID, cette baisse étant commune à toutes les fédérations (Figure 2) (2).

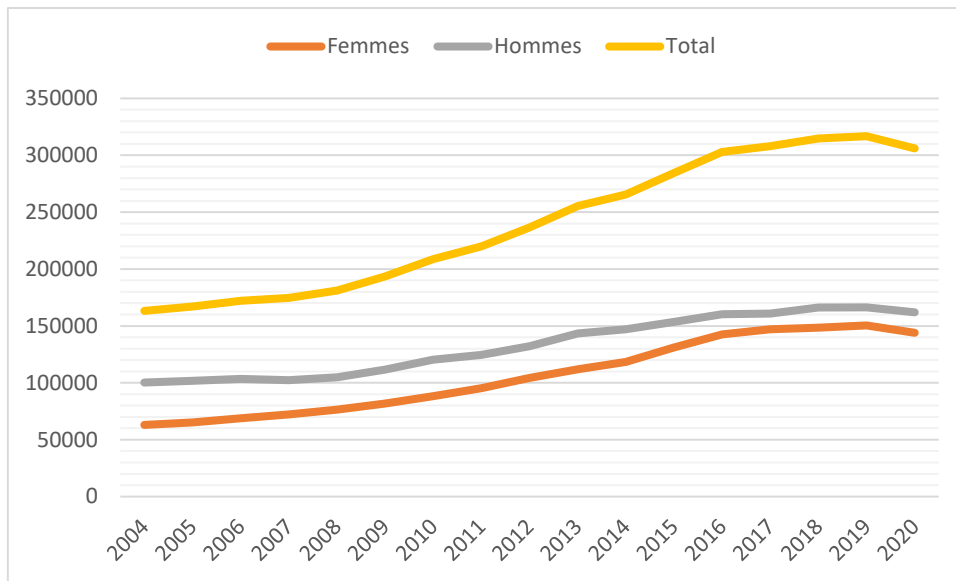


Figure 2 : Evolution du nombre de licenciés FFA de 2004 à 2020

*Malgré un recul en 2020 dû à la crise sanitaire du COVID, le nombre de licenciés a presque doublé en 16 ans qui montre l'engagement des pratiquants de la course à pied vers une pratique plus structurée.*

*FFA : Fédération Française d'Athlétisme*

Un deuxième levier de performance est la nutrition dont on va pouvoir identifier plusieurs niveaux. Le premier consiste à manger pour combler la faim et les besoins nutritionnels. Le niveau supérieur consiste quant à lui à personnaliser l'alimentation, en fonction de la situation, afin de répondre aux besoins réels du corps. La nutrition va donc pouvoir jouer un rôle pour parfaire la préparation et optimiser la performance.

Plusieurs questions peuvent ainsi se poser comme : quels sont mes besoins pour mon mode de vie et ma pratique sportive ? Que manger avant de faire l'effort physique ? Faut-il m'alimenter pendant l'effort ? Comment optimiser ma composition corporelle (optimisation du rapport masse maigre/masse grasse) ?

Cela passe donc par une alimentation adaptée avant, pendant et après l'effort.

Nous répondrons à ces différentes questions en présentant d'abord le corps humain associé à la physiologie de l'effort et plus particulièrement à l'endurance. La nutrition générale sera ensuite abordée avec les macros et micronutriments, pour ensuite se recentrer sur l'exercice physique avec l'application des conseils et recommandations donnés par l'intermédiaire de recettes et ingrédients détaillés faciles à mettre en place.





## 2. Physiologie de l'effort

### a. Le corps humain

#### i. Composition

Le corps humain est composé de masse grasse, de masse maigre et de masse osseuse dont les proportions varient tout au long de la vie (3).

L'évaluation de la composition corporelle peut se faire de différentes manières :

- Mesure à différents endroits du corps du pli sous cutané pris à l'aide d'une pince de Harpenden® et d'une équation, celle de Durnin et Wormseley datant de 1974 étant la plus utilisée. On va ainsi mesurer 4 plis cutanés : bicipital, tricipital, sous-scapulaire, supra-iliaque (figure 3) pour mesurer l'indice de masse graisseuse (IMG).

$$IMG = (495 / (C - (M \times \log(\text{somme des 4 plis cutanés})))) - 450$$

C'est une estimation qui a l'avantage d'être peu coûteuse mais malheureusement peu précise et reproductible donc difficile à mettre en place pour observer l'évolution de l'impédance d'un sujet. (4)

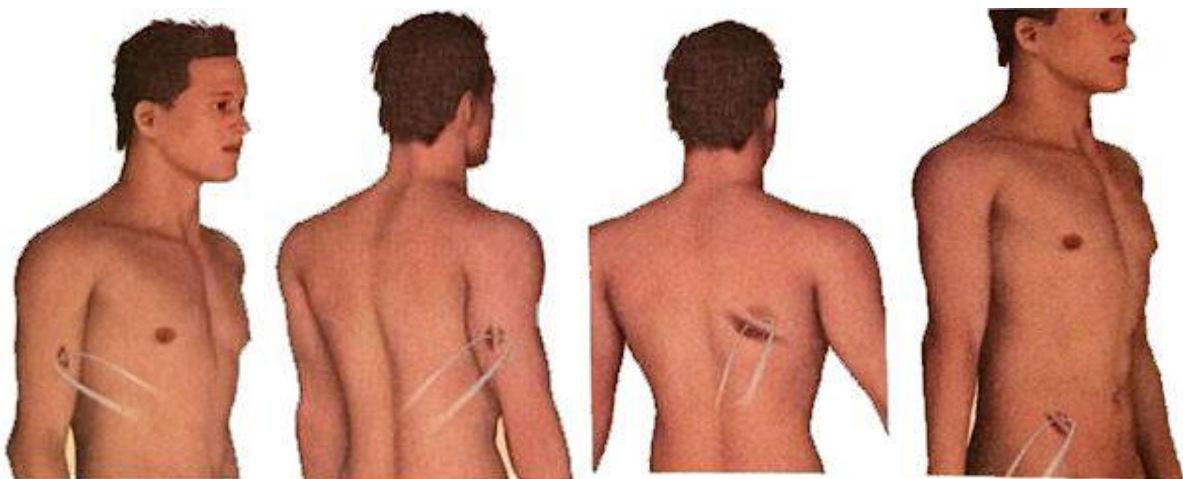


Figure 3 : Emplacement des 4 plis cutanés : bicipital, tricipital, sous-scapulaire, supra-iliaque

*Ces 4 plis cutanés pris grâce à une pince de Harpenden permettent avec l'utilisation de l'équation de Durnin et Wormsely de calculer l'indice de masse graisseuse chez les sujets de 17 à 72 ans.*

- Mesure de la radioactivité due au potassium K40 émise par le corps. Cette mesure nous permet d'avoir la masse cellulaire car le potassium est essentiellement intracellulaire et donc d'en déduire la masse maigre.

- Absorptiométrie biophotonique à rayons X qui consiste en deux balayages du corps par des rayons X d'énergies différentes afin d'en sortir les mesures de la masse calcique (osseuse) grasse, et maigre. C'est la méthode de référence car très précise mais coûteuse.
- Bio-impédance électrique : un courant électrique traverse le corps, on mesure alors la résistance et réactance du corps qui sont ensuite converties grâce à une équation en masse grasse et en eau corporelle totale. C'est la méthode la plus simple, la plus précise et la moins coûteuse. Il existe de nombreuses équations mises au point par différents scientifiques, avec une fiabilité qui varie et dont certaines sont spécifique à une population particulière : sujet âgé, obese, homme ou femme (tableau 2).

Tableau 2 : Formules utilisées pour l'évaluation de la masse maigre par impédancemétrie.

| Source                 | Population  | Équation   |
|------------------------|---|--|
| Boulier et al. [1]     | Sujets sains, 12–71 ans   | $6,37 + 0,64 \text{ poids} + 0,4 \cdot T^2/R_1 - 0,16 \cdot \text{âge} - 2,71 \cdot \text{sexe}$ (un homme ; deux femmes)  |
| Deurenberg et al. [3]  | Sujets sains, > 16 ans  | $-12,44 + 0,34 \cdot T^2/R_{50} + 0,1534 \cdot T + 0,273 \cdot \text{poids} - 0,127 \cdot \text{âge} + 4,56 \cdot \text{sexe}$   |
| Heitmann [6]           | Sujets sains, 35–65 ans   | $-14,94 + 0,279 \cdot T^2/R_{50} + 0,181 \cdot \text{poids} + 0,231 \cdot T + 0,064 \cdot (\text{sexe} \cdot \text{poids}) - 0,077 \cdot \text{âge}$   |
| Houtkooper et al. [7]  | Sujets sains  | $0,61 \cdot T^2/R_{50} + 0,25 \cdot \text{poids} + 1,31$   |
| Kotler et al. [9]      | Femmes saines, diversité ethnique<br>Hommes sains, diversité ethnique   | $0,07 + 0,88 \cdot (T^{1,97}/R_{50}^{0,49}) \cdot (1/22,22) + 0,081 \cdot \text{poids}$<br>$0,49 + 0,5 \cdot (T^{1,48}/R_{50}^{0,55}) \cdot (1/1,21) + 0,42 \cdot \text{poids}$  |
| Kyle et al. [10]       | Sujets sains, 18–94 ans   | $-4,104 + 0,518 \cdot T^2/R_{50} + 0,231 \cdot \text{poids} + 0,130 \cdot Xc + 4,229 \cdot \text{sexe}$  |
| Lohman [11]            | Femmes saines, 18–29 ans<br>Femmes saines, 30–49 ans<br>Femmes saines, 50–70 ans<br>Hommes sains, 18–29 ans<br>Hommes sains, 30–49 ans<br>Hommes sains, 50–70 ans | $5,49 + 0,476 \cdot T^2/R_{50} + 0,295 \cdot \text{poids}$<br>$11,59 + 0,493 \cdot T^2/R_{50} + 0,141 \cdot \text{poids}$<br>$6,34 + 0,474 \cdot T^2/R_{50} + 0,18 \cdot \text{poids}$<br>$5,32 + 0,485 \cdot T^2/R_{50} + 0,338 \cdot \text{poids}$<br>$4,51 + 0,549 \cdot T^2/R_{50} + 0,163 \cdot \text{poids} + 0,092 \cdot Xc$<br>$-11,41 + 0,6 \cdot T^2/R_{50} + 0,186 \cdot \text{poids} + 0,226 \cdot Xc$ |
| Lukaski et al. [12]    | Sujets sains  | $4,033 + 0,734 \cdot T^2/R + 0,096 \cdot Xc + 0,116 \cdot \text{poids} + 0,878 \cdot \text{sexe}$  |
| Mc Dougall et al. [13] | Sujets sains  | $16,4 + 0,61 \cdot T^2/R$  |
| Segal et al. [16]      | Hommes sains<br>Femmes saines   | $6,493 + 0,4936 \cdot T^2/R + 0,3736 \cdot \text{poids} - 0,0238 \cdot R$<br>$5,091 + 0,6483 \cdot T^2/R + 0,1699 \cdot \text{poids}$  |
| Stolarczyk et al. [15] | Femmes saines 18-60 ans   | $20,05 - 0,04904 \cdot R_{50} + 0,001254 \cdot T^2 + 0,1555 \cdot \text{poids} + 0,1417 \cdot Xc - 0,0833 \cdot \text{âge}$  |
| Sun et al. [17]        | Femmes saines, 12–94 ans<br>Hommes sains, 12–94 ans   | $-9,529 + 0,168 \cdot \text{poids} + 0,696 \cdot T^2/R_{50} + 0,016 \cdot R_{50}$<br>$-10,678 + 0,262 \cdot \text{poids} + 0,652 \cdot T^2/R_{50} + 0,015 \cdot R$   |
| Thomasset [18]         | Sujets sains  | $3,04 + 0,85 \cdot T^2/R$  |
| Van Loan et al. [19]   | Sujets sains  | $17,7868 + 0,000988 \cdot T^2 + 0,3736 \cdot \text{poids} - 0,0238 \cdot R - 4,2921 \cdot (1 - 0,1513 \cdot \text{âge})$   |
| Deurenberg et al. [2]  | Sujets âgés   | $3,9 + 0,672 \cdot T^2/R_{50} + 3,1 \cdot \text{sexe}$   |
| Dey et al. [4]         | Sujets âgés   | $11,78 + 0,499 \cdot T^2/R_{50} + 0,134 \cdot \text{poids} + 3,449 \cdot \text{sexe}$  |
| Haapala et al. [5]     | Femmes âgées 62–72 ans  | $-128,06 + 1,85 \cdot \text{IMC} - 0,63 \cdot \text{poids} + 1,07 \cdot T - 0,03 \cdot R_{50} + 10 \cdot \text{Rapport taille/hanches}$  |
| Roubenoff et al. [14]  | Femmes âgées<br>Hommes âgés<br>Hommes âgés  | $7,7435 + 0,4542 \cdot T^2/R_{50} + 0,119 \cdot \text{poids} + 0,0455 \cdot Xc$<br>$9,1536 + 0,4273 \cdot T^2/R_{50} + 0,1926 \cdot \text{poids} + 0,0667 \cdot Xc$<br>$5,741 + 0,4551 \cdot T^2/R_{50} + 0,1405 \cdot \text{poids} + 0,0573 \cdot Xc + 6,2467 \cdot \text{sexe}$  |
| Jakicic et al. [8]     | Femmes en surpoids, 25–45 ans   | $2,68 + 0,2 \cdot T^2/R_{50} + 0,19 \cdot \text{poids} + 2,55 \cdot \text{ethnie} + 0,1157 \cdot T$  |
| Jakicic et al. [8]     | Femmes en surpoids, 25–45 ans   | $2,04 - 0,02 \cdot R_{50} + 0,19 \cdot \text{poids} + 2,63 \cdot \text{ethnie} + 0,2583 \cdot T$   |

*R* : résistance

*T* : taille en cm

*Xc* : réactance

*Sexe* : un pour les hommes et zéro pour les femmes

*Poids* en kg

*BMI* en kg/m<sup>2</sup>

### 1. Masse grasse

La masse grasse représente environ 15 % de la masse corporelle totale chez l'homme et 23 % chez la femme. Celle-ci n'a pas de fonction vitale mais elle a pour but de protéger le corps, et plus particulièrement les organes vitaux, des différents chocs possibles. Ces chocs peuvent à la fois être thermiques avec une protection contre le froid, mais aussi mécaniques avec un amortissement des chocs physiques.

Le second rôle de la masse grasse est d'être un réservoir énergétique pour l'organisme. La masse grasse est composée en majorité de triglycérides.

Le suivi de la masse grasse peut être important dans le sport. Cela permet un suivi de la forme physique et présente un intérêt certain dans les sports à catégorie de poids ou dans les sports où avoir un rapport poids/puissance le plus élevé est nécessaire pour être le plus performant (les cyclistes grimpeurs, les coureurs, etc...). Ainsi elle peut donc beaucoup varier selon les sujets afin de baisser vers 6 % pour les athlètes de haut niveau en marathon par exemple ou d'augmenter pour les boxers en catégories poids lourd (5).

### 2. Masse maigre

Contrairement à la masse grasse, la masse maigre présente un rôle vital.

Elle est essentiellement composée d'eau à raison d'environ 25 % d'eau extracellulaire et 37 % d'eau intracellulaire. C'est donc ainsi que la masse corporelle est composée d'environ 60-70% d'eau.

Enfin, 16 % de la masse corporelle est composé de protéines. Ces protéines vont alors être les composants des muscles et des différents organes du corps.

Dans un objectif de performance, le rapport entre la masse maigre et la masse grasse doit donc être le plus en faveur de la masse maigre car c'est elle qui est responsable du mouvement quand la masse grasse n'est qu'un poids supplémentaire à déplacer (6).

### 3. Masse osseuse

La masse osseuse est principalement composée de cristaux de phosphate de calcium. Notre capital minéral osseux correspond à environ 6 % de la masse corporelle et représente donc principalement notre squelette et nos dents.

Ici les variations vont être faibles mais cependant délétères. En effet, la baisse de masse osseuse augmente avec le risque d'apparition de fractures : c'est l'origine de pathologies comme l'ostéoporose (6).

## ii. Consommation de l'énergie au repos

Les dépenses énergétiques se divisent en 3 grands postes : le métabolisme de base, la thermogénèse et l'exercice musculaire.

Le mot métabolisme vient du grec « μεταβολή » qui signifie changement ou transformation, associé au suffixe –sme qui correspond à concept ou idéologie. On peut donc conclure que le métabolisme, c'est l'ensemble des réactions physico-chimiques en vue de fournir de l'énergie à l'organisme.

Le métabolisme de base concentre 60 à 75 % des dépenses énergétique totales. Cela inclut l'énergie nécessaire minimale pour maintenir les fonctions vitales : foie, cœur, cerveau, reins. Ces organes vitaux consomment en moyenne 15 à 40 fois plus d'énergie qu'un muscle de masse similaire.

La thermogénèse, qui représente 10 % des dépenses énergétiques totales, est l'énergie dépensée pour la digestion des aliments, le stockage et l'utilisation de l'énergie. C'est cette énergie qui permet également de maintenir la température corporelle à 37°C lorsque la température ambiante est plus basse. C'est ce qu'on appelle l'effet thermique des aliments. Pour obtenir de l'énergie à partir de ce que l'on mange il faut en dépenser (c'est ce phénomène qui est responsable d'un dégagement de chaleur) pour la rendre utilisable afin d'effectuer un mouvement ou toute autre action de l'organisme. Le coût énergétique de chaque aliment est variable en fonction de la voie énergétique qu'il emprunte. Si le rapport est inversé, c'est-à-dire s'il consomme plus d'énergie qu'il n'en fournit, l'aliment est dit thermogénique. On peut par exemple citer la caféine, le guarana ou encore le maté.

L'exercice musculaire complète enfin les dépenses qui correspondent à environ 20 % chez une personne sédentaire. Plus l'activité physique de la journée sera intense et prolongée, plus la proportion dans les dépenses journalières sera importante (6).

## b. Source et filière énergétique

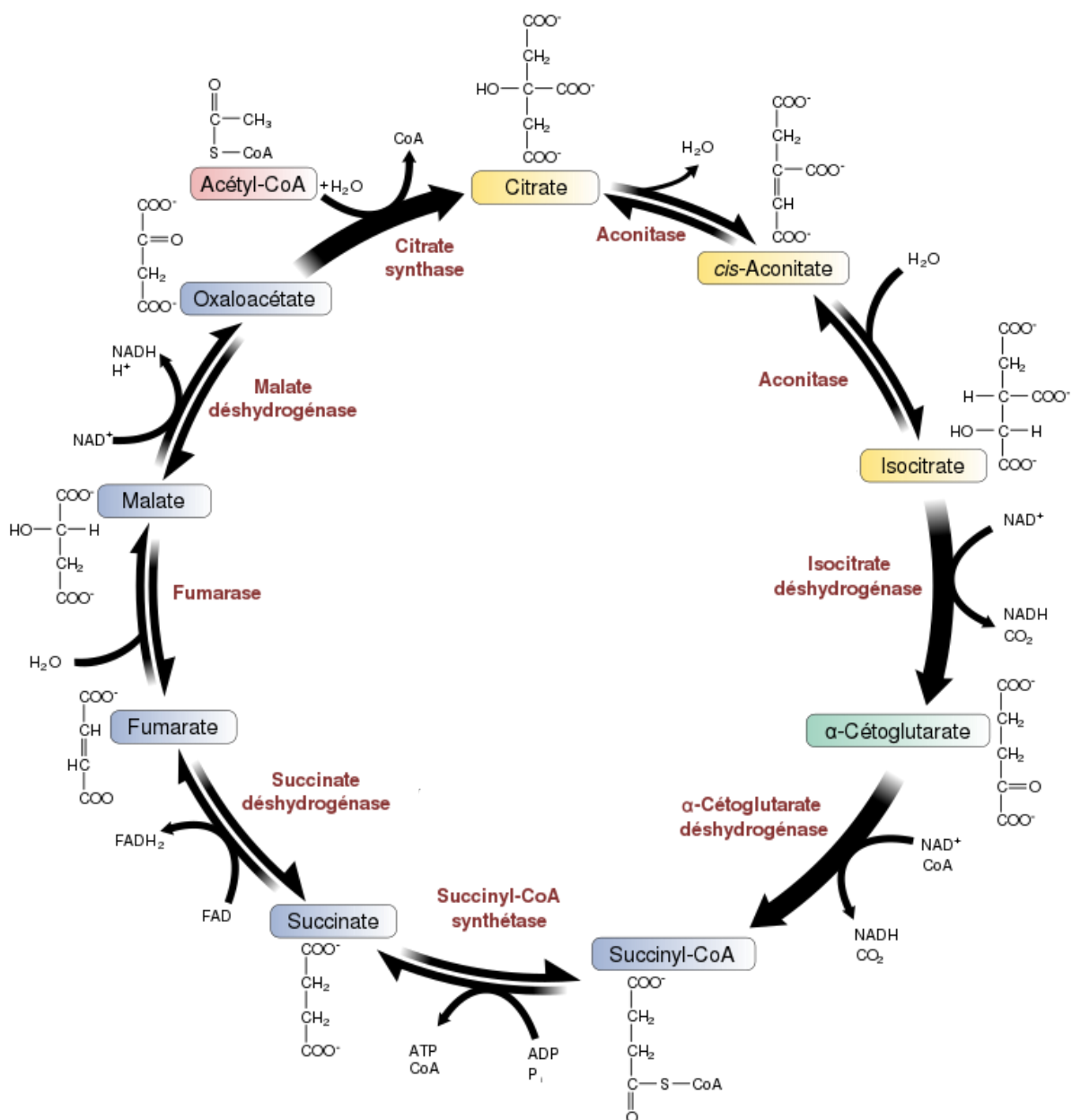
### i. Le cycle de Krebs

Le cycle de Krebs est composé d'un enchaînement de 10 réactions qui sont catalysées par 8 enzymes (Figure 4).

Le cycle de Krebs est également appelé cycle du citrate car pour chaque tour de cycle effectué, une molécule de citrate sera formée par réaction entre une molécule d'acétyl-CoA et une molécule d'oxaloacétate. Les réactions suivantes vont permettre au citrate de perdre des carbones pour régénérer l'oxaloacétate sous forme de CO<sub>2</sub>. Et à nouveau le cycle pourra recommencer.

Comme on peut le voir, au fur et mesure du cycle des produits de réaction seront formés. Une partie sera réintroduite dans le cycle et une autre sera composée de produits d'élimination comme le CO<sub>2</sub>. D'autres produits, comme le NADH et le FADH<sub>2</sub>, pourront être utilisés pour produire de l'énergie. En effet, les électrons qui seront produits par l'oxydation du NADH et du FADH<sub>2</sub> passeront à travers les différents complexes de la chaîne respiratoire, processus qui s'accompagne de la sortie de protons de la matrice vers l'espace intermembranaire, créant un gradient électrochimique. Le retour des protons dans la matrice par l'ATP-synthase permet de synthétiser l'ATP. Respectivement, le NADH pourra ainsi former l'équivalent de 2,5 molécules d'ATP et le FADH<sub>2</sub> l'équivalent de 1,5 molécule d'ATP. Une molécule d'ATP est également formée par tour de cycle lors de la transformation du succinyl-CoA en succinate (7)(8).

Au total, un tour de cycle de Krebs permet la formation de 10 ATP : 1 ATP, 7,5 ATP issus des 3 NADH et 1,5 ATP issus du FADH<sub>2</sub>.



#### Figure 4 : Cycle de Krebs

*Le cycle de Krebs ou cycle du citrate est une succession de 10 réactions qui ont pour but de fournir de l'énergie soit en formant directement de l'ATP, ou par l'intermédiaire du NADH ou du FADH<sub>2</sub>. Ainsi 12 molécules d'ATP seront formées par tour de cycle.*

##### 1. Potentiel énergétique du glucose

A partir d'une molécule de glucose, 2 molécules de pyruvate seront produites par la glycolyse afin d'alimenter le cycle de Krebs. Cette glycolyse libère également 2 molécules d'ATP et 2 NADH<sub>2</sub>. Ce NADH<sub>2</sub> cytosolique conduira à la formation de 1,5 ATP et non 2,5 comme le NADH<sub>2</sub> mitochondrial.

Ensuite les 2 molécules de pyruvate seront décarboxylées par le complexe multi-enzymatique de la pyruvate déshydrogénase en acétyl-CoA. A la fin de cette étape, on obtient donc 2 acétyl-CoA pour alimenter le cycle de Krebs et 2 NADH<sub>2</sub>.

Le bilan final de la dégradation d'une molécule de glucose sera donc de 2 ATP issus de la glycolyse et 2 ATP libérés par les 2 cycles de Krebs effectués, cela fait donc 4 molécules d'ATP.

Les 2 cycles de Krebs effectués vont également produire 6 NADH<sub>2</sub> et 2 FADH qui contiennent également de l'énergie. Chacun des 8 NADH<sub>2</sub> seront transformés en 2,5 ATP chacun lors de l'étape suivante et le FADH<sub>2</sub> sera capable d'en produire 1,5 et donc 3 au total. C'est donc un total de 30 molécules d'ATP produites par l'oxydation complète d'une molécule de glucose (7).

##### 2. Potentiel énergétique des acides gras

L'énergie des acides gras sera libérée par la bêta-oxydation (Figure 5). Pour ce faire, l'acide gras, dont  $n$  est la longueur de sa chaîne carbonée, sera en premier lieu activé grâce à l'acyl-CoA synthétase et l'utilisation de 2 liaisons riches en énergie, soit 2 équivalents d'ATP. Ainsi on obtiendra un Acyl-CoA à  $n$  carbones qui pourra entrer dans le cycle de la bêta-oxydation. Pour les acides gras avec un  $n$  qui est pair on aura  $(n/2 - 1)$  tours. Au fur et à mesure des tours effectués, la chaîne carbonée diminuera de 2 carbones qui correspondent à la molécule d'acétyl-CoA qui pourra intégrer le cycle de Krebs comme vu précédemment. D'autres molécules possédant un potentiel énergétique sont formées : FADH<sub>2</sub> et NADH<sub>2</sub>.

Ainsi l'acide arachidonique, acide gras à 20 carbones, sera activé en arachidyl-CoA à 20 carbones qui pourra faire 9 tours de bêta-oxydation afin de libérer 10 acétyl-CoA, 9 FADH<sub>2</sub> et 9 NADH. Après 10 tours de cycle de Krebs, un total de 39 NADH<sub>2</sub>, 19 FADH<sub>2</sub> et 10 ATP sont produits, conduisant à la formation de 134 molécules d'ATP par l'oxydation complète d'une molécule d'acide arachidonique (8).

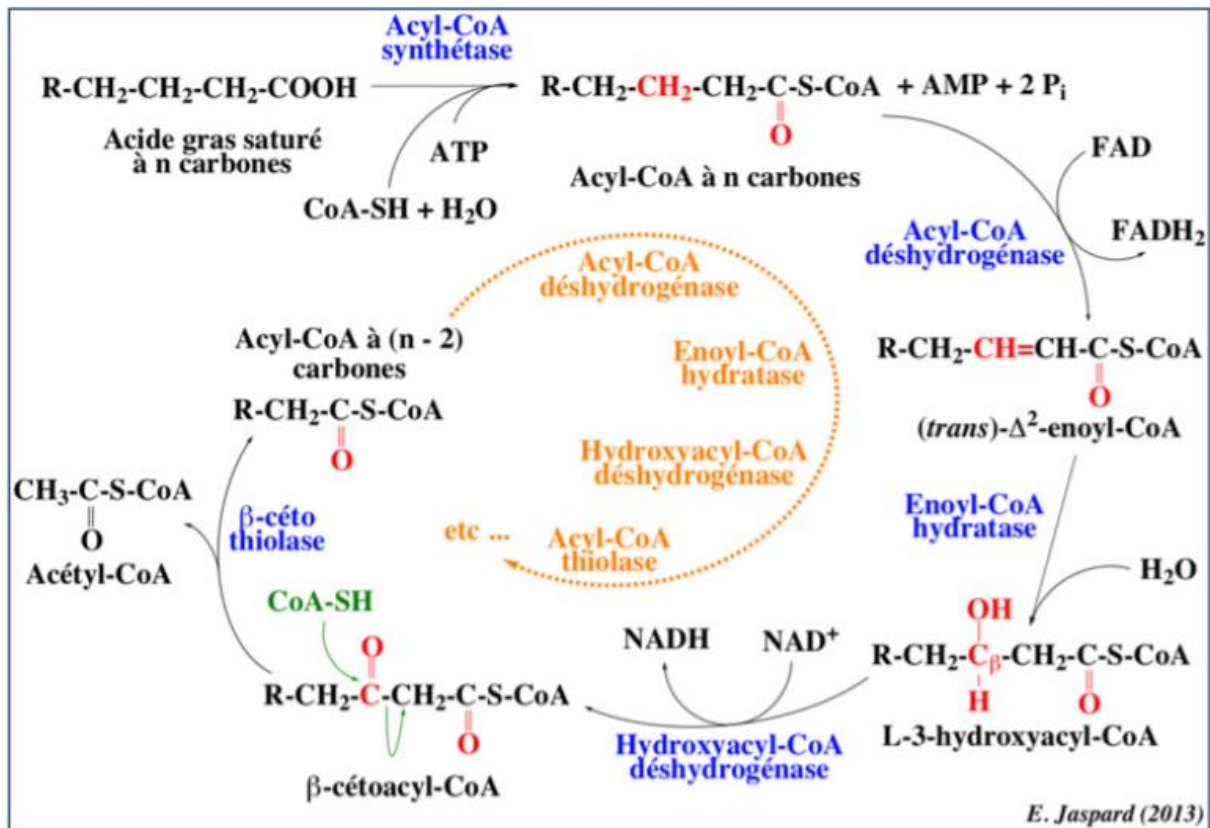


Figure 5 : Cycle de la bêta-oxydation des acides gras

Le cycle de bêta-oxydation permet d'utiliser les acides gras pour produire de l'énergie. Il consiste à faire perdre 2 carbones aux acides gras par tour afin de former un acétyl-CoA qui pourra alors entrer dans le cycle de Krebs et ainsi produire de l'énergie.

## ii. Anaérobie

Les voies anaérobies sont de mise en route très rapide, elles permettent ainsi une action ou effort physique intense et puissant. En contrepartie, cet effort ne pourra durer dans le temps et sera donc de courte durée.

### 1. Anaérobie alactique

Comme son nom l'indique, cette filière énergétique fonctionne sans oxygène ni production de lactate. Dans ces conditions la formation d'énergie se déroule dans les mitochondries par l'intermédiaire d'une enzyme : la créatine kinase. La créatine kinase va catalyser la conversion de la créatine en créatine phosphate ce qui engendre également la conversion d'adénosine triphosphate en adénosine diphosphate (Figure 6).

Au cours de l'effort la teneur en ATP diminue donc très rapidement quand en parallèle la teneur en ADP augmente. Ainsi lorsque l'équilibre est inversé, la créatine kinase catalyse la

réaction inverse afin de régénérer rapidement le stock d'ATP. Ce stock étant limité, l'effort maintenu est de faible durée avant l'intervention des autres filières énergétiques (9).

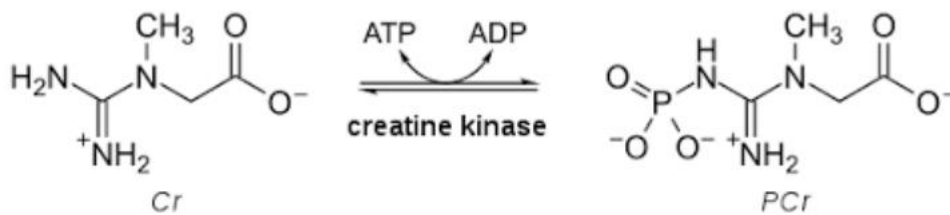


Figure 6 : Réaction de conversion de la créatine en créatine phosphate

*La transformation réversible de la créatine en créatine phosphate permet une utilisation rapide d'ATP par les muscles et une restauration rapide des réserves d'ATP pendant la période de repos qui suit l'effort.*

La puissance qui résulte de cette filière énergétique est très élevée : environ 3 à 4 kW pour une personne lambda et jusqu'à 8 kW pour les sprinters de haut niveau par exemple (10).

Cette efficacité pourra être améliorée par l'augmentation de la masse musculaire. Mais pour cela, un apport alimentaire protéique supplémentaire sera nécessaire afin d'augmenter la synthèse protéique et donc l'accroissement de la masse musculaire. L'entraînement, avec un travail d'exercices de musculation et de vitesse, ainsi que des efforts répétés de courte durée (environ 5 à 15 secondes) sera aussi à privilégier.

Dans ce cas, la nutrition aura un impact fort lors de la préparation et la phase de récupération après l'effort afin de restaurer les réserves qui ne peuvent être augmentées.

## 2. Anaérobie lactique

La deuxième filière anaérobie est l'anaérobie lactique qui utilise quant à elle le glycogène musculaire. Cependant, en l'absence d'oxygène, la dégradation des molécules de glucose ne se fera que jusqu'au lactate. En effet, l'oxydation des corps réduits n'étant pas possible et dans le but d'éviter leur accumulation en excès, le pyruvate se voit transféré un ion H<sup>+</sup> qui le transforme en lactate.

La puissance qui résulte de cette filière énergétique est également élevée : environ 2 à 5k W. Le délai de mise en route étant de quelques secondes pour une durée jusqu'à 1 minute et 30 secondes environ, l'utilisation de cette filière se fait à puissance maximale pendant une vingtaine de secondes en parallèle de la filière anaérobie. Ensuite la puissance baisse progressivement jusqu'à 1 minute et 30 secondes. A ce moment-là c'est la filière aérobie qui assure la plus grande partie de la formation d'énergie.

L'efficacité de l'anaérobie lactique pourra être améliorée par l'augmentation de la masse musculaire et l'entraînement via des efforts répétés de courte à moyenne durée (15 secondes à 1 minute 30 sec) à des vitesses supérieures à la vitesse maximale aérobie, avec une récupération environ deux fois supérieure au temps de travail.



Les limites de cette filière sont principalement dues aux ions  $H^+$  qui diminuent le pH et provoquent l'accumulation du lactate dans les muscles. L'acidité qui est présente dans les muscles pourrait être en partie gommée par l'apport de boissons bicarbonatées qui augmenteraient le pouvoir tampon du corps ce qui retarderait l'apparition de la fatigue musculaire. Cependant le rapport bénéfice/risque n'est pas en faveur de l'utilisation de ces boissons à cause de l'action gastro-intestinale du bicarbonate et, à haute dose, du risque d'alcalose métabolique et donc à l'arrêt respiratoire qui en découle. Les réserves de glycogène sont suffisantes pour pallier aux demandes pour la personne lambda. Elles peuvent être cependant limitantes dans le cas d'un sportif de haut niveau. Pour augmenter le stock de glycogène musculaire, une alimentation hyper glucidique pourrait être mise en place (9).

### iii. Aérobie

La filière aérobie va quant à elle aller jusqu'au bout de l'utilisation des différents substrats énergétiques, à savoir le glucose et les acides gras, grâce à l'apport d'oxygène qui permet l'oxydation dans les mitochondries. C'est à ce moment donc que la consommation maximale d'oxygène ( $VO_2max$ ) devient un facteur limitant la puissance. La  $VO_2max$  s'exprimant en volume d'oxygène utilisable par unité de temps, la valeur la plus élevée sera un avantage certain. Les différents facteurs influant sur la  $VO_2max$  sont la capacité respiratoire, la quantité et la rapidité du transport de l'oxygène dans le sang (lié à la surface d'échange dans les poumons, la quantité de globules rouges et leur affinité pour l'oxygène, la force de contraction du cœur) ainsi que la capacité du muscle strié à extraire l'oxygène du sang.

Le délai de mise en route de la filière aérobie est un peu plus tardif que la filière anaérobie, avec environ 2 à 3 minutes pour être réellement efficace (car la filière aérobie est en activité tout le temps pour le métabolisme basal). Sa puissance est plus basse que les autres filières : 0,8 à 1,7 kW, mais sa durée d'action est bien plus longue. En effet sa puissance maximale est maintenue pendant 6 minutes en moyenne. Cette durée est dépendante de l'entraînement dont le but est d'augmenter la puissance et/ou la durée de la puissance maximale aérobie.

C'est le pyruvate entrant dans le cycle de Krebs qui va marquer le début de la filière aérobie. En effet il sera transformé en acétyl-CoA afin de suivre le cycle de Krebs (8).

D'autres substrats vont également pouvoir produire de l'acétyl-CoA. Les acides gras vont être catabolisés en acétyl-CoA par la bêta-oxydation. Cette source d'énergie commence en retard par rapport au glucose mais devient de plus en plus prépondérante au fil du temps pour être majoritaire après environ 2 heures d'effort (7).

Les protéines peuvent également prendre part au cycle de Krebs, par la transformation d'acides aminés en glucose ou en pyruvate ou encore en acétyl-CoA selon les acides aminés.

#### iv. Bilan des voies énergétiques

Toutes les voies énergétiques que nous venons de décrire interviennent donc selon le type d'épreuve physique dans des proportions différentes (Tableau 3). Ainsi pour une épreuve de sprint, la puissance explosive de la voie anaérobie alactique sera la principale mais deviendra de moins en moins utilisée si la durée de l'effort augmente. La voie anaérobie lactique prendra donc le relais si la durée s'allonge pour ensuite laisser à son tour la place à la voie aérobie pour prolonger encore l'effort. Mais bien que ces 3 filières soient étudiées séparément, elles ne peuvent être interprétées qu'ensemble car l'une de ne peut fonctionner sans l'autre.

Tableau 3 : Bilan des filières énergétiques

|   | Anaérobie Alactique                  | Anaérobie Lactique                            | Aérobie   |
|---|--------------------------------------|---|---|
| Substrats énergétiques                    | ATP<br>Phosphocréatine               | Glucose                                       | Glucose<br>Acides Gras  |
| Métabolites                               | ADP<br>Créatine                      | H <sup>+</sup><br>Acide Lactique              | CO <sub>2</sub><br>H <sub>2</sub> O<br>Urée                   |
| Implication de l'oxygène                  | Non                                  | Non   | Oui   |
| Réserves d'énergie                        | Muscle                               | Muscle  | Muscle<br>Tissus adipeux                                      |
| Capacités énergétiques (facteur limitant) | 15 à 30 kJ (phosphocréatine)         | 100 à 200 kJ (pH et lactate)                  | 1 à 400 MJ (glycogène musculaire)                             |
| Puissance (facteur limitant)              | 4 à 12 kW (neuromusculaire)          | 3 à 8 kW (activité enzymatique)               | 0,8 à 1,7 kW (débit cardiaque et masse musculaire)            |
| Durée de l'épreuve                        | 0 à <20 sec                          | 20 sec à <2 min                               | 2 min à plusieurs heures                                      |
| Exemples d'épreuve                        | 100 m cap<br>Haltérophilie<br>Lancer | 400 m cap<br>100 m nage<br>Cyclisme sur piste | Du 1500 m au marathon<br>Ironman<br>Epreuve du tour de France |
| Temps de récupération                     | 10 min                               | Plus d'une heure                              | Plusieurs heures à plusieurs jours                            |

*ATP : Adénosine Triphosphate*

*ADP : Adénosine Diphosphate*

*CAP : Course à Pied*

*Kj : kilojoule*

*kW : kilowatt*

*Mj : Mégajoule*

## c. L'endurance

### i. Définition

Selon le Larousse, l'endurance est l'aptitude à résister aux fatigues physiques ou aux épreuves morales (11). Ainsi pour la course on peut le comprendre de 2 façons : courir lentement mais le plus longtemps possible, ou courir le plus rapidement une distance donnée.

La première idée serait donc de partir pour de très longues sorties comme lors d'ultra trails de plus de 100 kilomètres et d'arriver au bout. La deuxième serait par exemple d'aller le plus vite possible pour terminer un marathon.

### ii. Exigence et demande énergétique des sports d'endurance

#### 1. Dépenses de base

Tout d'abord, la demande pendant un effort va dépendre de la dépense énergétique au repos et donc du métabolisme de base. En effet on a vu précédemment qu'elle variait selon plusieurs critères.

Le poids corporel va par exemple avoir un impact et donc plus particulièrement la répartition masse maigre/masse grasse.

L'âge va également diminuer d'environ 2 % le métabolisme de base tous les 10 ans, et ceci par la baisse de la masse maigre.

La composition corporelle différente des hommes par rapport aux femmes va également augmenter les dépenses énergétiques d'environ 10 % chez les hommes, essentiellement du fait de leur musculature plus importante (12) (13).

#### 2. Dépenses liées aux sports d'endurance

Chaque sport, qu'il relève de l'endurance ou non, demande une dépense énergétique différente. En effet chaque sport va avoir un coût énergétique propre. Ce coût dépend de la durée de l'activité et de la nature de l'exercice mais également des conditions climatiques par exemple qui peuvent le majorer. Ce coût énergétique va venir s'ajouter au métabolisme de base (14).

##### a. La course à pied

La course à pied est en fait un ensemble d'épreuves de course du sprint aux ultra-trails en passant par le marathon. L'énergie dépensée pour courir est proportionnelle à la vitesse de

déplacement : seuls l'équipement et bien évidemment le dénivelé peuvent faire varier cette relation linéaire.

Le coût énergétique de la course à pied est de 400 à 800 kcal par heure. C'est ainsi qu'un marathon va coûter environ 3000 kcal (14).

#### b. La natation

La natation regroupe quant à elle toutes les distances que ce soit en piscine ou eau libre (lac, mer, etc...) avec comme seul moyen de locomotion son corps. Le coût énergétique va dépendre ici principalement de la technique de nage, des résistances que rencontre le nageur (hydrodynamie et courant), ainsi que de la flottaison qui augmentera par exemple par le port d'une combinaison néoprène ou par l'eau salée. La température de l'eau va également majorer la dépense énergétique afin de maintenir une température corporelle de 37°C.

La dépense sera entre 400 et 800 kcal par heure de nage (14).

#### c. Le cyclisme

Le cyclisme va regrouper toutes les activités à vélo : le vélotaf, le cyclisme sur piste ou sur route, le VTT ou encore le cyclo-cross. Les résistances vont être l'air avec l'aérodynamie, la gravité en fonction du dénivelé et les frottements des pneus sur la chaussée.

Là encore le coût énergétique sera de 400 à 800 kcal par heure. Ainsi une étape du tour de France coûte entre 3000 et 4000 kcal (14).

Ainsi, pour un triathlon et les autres disciplines enchainées ou combinées, il faut additionner les dépenses énergétiques de chaque sport afin d'obtenir le coût énergétique de la discipline.

## 3. Nutrition

### a. Base

Sportif ou non, tout le monde doit avoir une alimentation équilibrée pour maintenir une bonne santé. Ainsi, les recommandations du plan national de nutrition et santé (PNNS) lancé en 2001 sont une bonne base, qui sera ensuite à adapter en fonction de l'activité physique et ce d'autant plus qu'il s'agit d'un sport d'endurance.

Le PNNS détaille ainsi à travers plusieurs objectifs les différentes actions mises en place et à venir pour rendre l'environnement alimentaire et physique plus favorable à la santé (Figure 7).

Parmi tous ces objectifs, certains sont très connus avec les slogans « Ne pas manger trop gras, trop sucré, trop salé », « Manger 5 fruits et légumes par jour » ou bien le nutri-score. Pour l'exercice, la recommandation est diffusée sous la forme d'encouragement à « Bouger au moins 30 minutes par jour ».

Ainsi les recommandations de base pour l'alimentation sont une alimentation variée avec des légumes secs, des fruits à coques, une alimentation riche en fruits et légumes. Il faut également favoriser les poissons et la volaille plutôt que la viande rouge ou la charcuterie, ainsi que les produits de saisons, le fait-maison à la place des produits ayant un nutri-score élevé. A tout cela il faut ajouter une activité physique d'au moins 30 minutes par jour.

Il faudra néanmoins adapter ces différentes recommandations à certaines situations comme la grossesse, l'obésité ou les maladies chroniques (diabète, hypertension artérielle (HTA)...), la restauration collective (cantines scolaires des plus jeunes, restauration en milieu carcéral...), l'âge avec les risques de dénutrition, etc... (15)

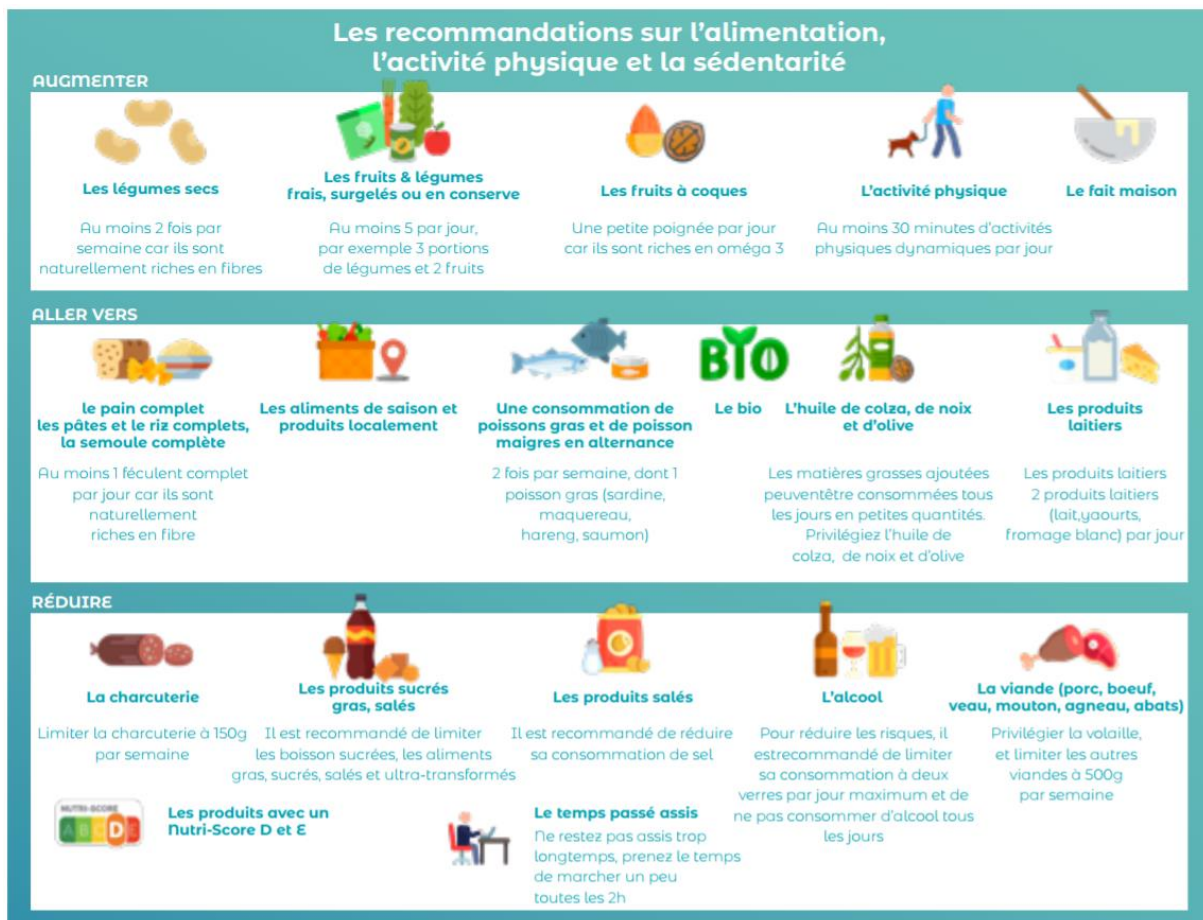


Figure 7 : Plan National de Nutrition Santé

Le PNNS donne pour l'athlète d'endurance une base qu'il faudra respecter concernant l'alimentation puis adapter pour faire face aux activités effectuées. Sans les bases, l'équilibre nutritionnel ne sera pas bon et le risque est alors d'avoir des carences.

### b. Balance nutritionnelle journalière

La balance nutritionnelle est l'équilibre énergétique entre les dépenses et les apports. Si la balance est à l'équilibre, il n'y a pas de variation de poids. En revanche, si l'équilibre penche en faveur des apports le poids corporel augmentera. A l'inverse, si l'objectif est la perte de poids, il faudra faire pencher la balance en faveur des dépenses soit en baissant les calories absorbées soit en augmentant les dépenses par l'exercice.

La plus grande partie des dépenses énergétiques est assurée par le métabolisme de base qui dépend, comme on l'a vu, de l'âge, du sexe, du poids et de la taille.

Pour calculer le métabolisme de base (MB) il existe des formules mathématiques. Une des plus utilisées aujourd'hui pour les moins de 60 ans et sans surpoids est la formule améliorée de Harris et Benedict par Roza et Shizgal qui a été publiée en 1984 (16).

$$MB(\text{homme}) = 13,707 \times \text{Poids}(kg) + 492,3 \times \text{Taille}(m) - 6,673 \times \text{Age}(an) + 77,607$$

$$MB(\text{femme}) = 9,740 \times \text{Poids}(kg) + 172,9 \times \text{Taille}(m) - 4,737 \times \text{Age}(an) + 667,051$$

Pour les personnes plus âgées ou en surpoids, on utilise une formule plus récente, celle de Black *et al.* datant de 1996.

$$MB(\text{homme}) = 259 \times \text{Poids}(kg)^{0,48} \times \text{Taille}(m)^{0,50} \times \text{Age}(an)^{-0,13}$$

$$MB(\text{femme}) = 230 \times \text{Poids}(kg)^{0,48} \times \text{Taille}(m)^{0,50} \times \text{Age}(an)^{-0,13}$$

Le résultat ainsi obtenu est donc l'énergie nécessaire aux dépenses minimales de l'organisme. Ainsi seule la masse maigre et plus particulièrement les organes nobles comme le foie, le cœur, le cerveau, pourront fonctionner (16).

Environ 10 % supplémentaires vont ensuite servir à la thermogénèse. C'est l'énergie qui est utilisée pour l'homéostasie de la température corporelle, la digestion et le stockage des nutriments. En effet, l'énergie chimique qui est transformée en énergie mécanique via la production d'ATP inclut également une perte d'énergie sous forme de chaleur. Le cout énergétique des aliments varie en fonction de la voie métabolique qu'ils empruntent et ainsi certains aliments deviennent des aliments « minceur ». Par exemple la caféine, le maté, le guarana, ou la nicotine sont des aliments qui apportent moins de calories qu'ils n'en font consommer, ils sont dits aliments thermogéniques.

Enfin, environ 20-25% de l'énergie nécessaire sera dédié à l'exercice musculaire pour un sujet sédentaire.

C'est cette dernière partie qui varie avec l'activité physique et donc qui peut faire augmenter les dépenses énergétiques totales en représentant 60 à 70 % de l'énergie consommée d'une journée très active sur le plan physique.

Au total, la consommation sera d'environ 1900 à 2000 kcal pour une femme et entre 2000 et 2300 kcal pour un homme avec un mode de vie peu ou pas sportif.

En revanche la consommation peut être bien plus élevée chez un sportif d'endurance qui s'entraîne régulièrement et donc atteindre entre 2600 et 3300 kcal pour une femme et entre 3500 et 3800 kcal pour un homme, soit environ 50 kcal par kilos (15).

Il faudra donc faire attention d'avoir les apports en relations avec les dépenses et l'objectif visé par le sujet : perte de poids ou non par exemple.

### c. Balance nutritionnelle pendant l'effort

On a vu que les apports énergétiques doivent être supérieurs pour les sportifs que pour les sédentaires dans leur vie de tous les jours mais c'est encore plus le cas lors d'efforts de longue durée.

En effet, on peut constater une augmentation de 500 à 1000 kcal par heure pendant l'effort voire jusqu'à 1500 kcal dans le cas des sports extrêmes comme le marathon, l'Ironman ou les ultra-trails.

Par exemple lors d'une course comme un marathon, la dépense énergétique va varier avec l'intensité ou la puissance fournie et donc la vitesse mais globalement un marathon va coûter 3000 kcal pour tous les participants. Ces 3000 kcal seront donc partagées différemment soit en 2 x 1500 kcal pour l'élite mondiale qui terminera l'épreuve en un peu plus de 2 heures (record du monde en 2h01min09sec chez les hommes et 2h14min04sec chez les femmes) ou en 4 x 750 kcal pour un coureur « classique » qui le terminera en environ 4 heures (temps moyen de 4h13 chez les hommes et 4h42 chez les femmes selon ASICS) (15).

Ces dépenses viennent évidemment en plus du métabolisme de base, ce qui amène la nécessité d'un apport de plus de 6000 kcal sur la journée de l'épreuve (17).

### d. Analyse des éléments constituant l'alimentation

#### i. Macronutriments

##### 1. Glucides

Les glucides, communément appelé sucre, sont également connus sous le nom d'hydrates de carbone. Leur structure chimique est composée d'une chaîne carbonée, d'une fonction aldéhyde ou cétone, et de plusieurs fonctions alcool. La formule brute qui en résulte est donc  $C_n(H_2O)_n$  ( $n > 3$ ) (18).

La concentration en glucose dans le sang est appelée glycémie. La glycémie à jeun normale est comprise entre 0,7 et 1 g/L. Au cours de la journée, il est important que cette glycémie reste stable.

La régulation de la glycémie, ou homéostasie du glucose, se fait grâce à 2 hormones :

- L'insuline est sécrétée par les cellules bêta du pancréas lorsque la glycémie est élevée, et en particulier juste après un repas. L'insuline induit un stockage du glucose sous forme de glycogène dans le foie et les muscles (19).



- Le glucagon est secrété par les cellules alpha du pancréas lorsque la glycémie est basse. Il induit alors une redistribution de glucose (glucose-6-phosphate) qui était stocké sous forme de glycogène (20).

Différentes pathologies sont liées à des défauts de contrôle de la glycémie :

- Le diabète : reflet d'une hyperglycémie chronique, il est délétère pour l'organisme à moyen et long terme car l'hyperglycémie engendre des complications macro- et microvasculaires telles que infarctus du myocarde, rétinopathie, néphropathie, neuropathie...
- L'hypoglycémie : le cerveau n'ayant que le glucose comme carburant, l'hypoglycémie a des conséquences immédiates telles que sueurs, pâleur, faim, vertige, faiblesse, tachycardie, perte de conscience, etc....

Les glucides peuvent dans un premier temps être classés selon leur digestibilité (Tableau 4). On va ainsi trouver des glucides non digestibles aussi appelé fibres. Ces fibres ne seront pas assimilées telles quelles mais vont être fermentées par le microbiote dans la partie terminale du système digestif. Elles ont, ainsi que les produits de leur dégradation, un impact positif sur la santé du microbiote intestinal lui-même et de leur hôte, elles favorisent le transit intestinal et ralentissent la vidange gastrique. Les glucides digestibles quant à eux sont ceux avec une saveur sucrée. Ils sont issus de l'amidon et de ses différents hydrolats tels les malto-dextrines ou polyols (21).

Tableau 4 : Classification des principaux glucides selon leur digestibilité

| Groupes                         | Sous-groupes                 | Principaux composés  |
|---------------------------------|------------------------------|--|
| <b>Glucides digestibles</b>     |                              |  |
| Sucres (DP = 1 à 2)             | Monosaccharides              | Glucose, galactose, fructose, tagatose   |
|                                 | Disaccharides                | Saccharose, lactose, tréhalose, maltose, isomaltulose  |
| Oligosaccharides (DP = 3 à 9)   | Malto-oligosaccharides       | Malto-dextrines  |
| Polysaccharides (DP > 9)        |                              | Amylose, amylopectine, amidons transformés   |
| Polyols (glucides hydrogénés)   | Monosaccharidique            | Sorbitol, mannitol, xylitol, érythritol  |
|                                 | Disaccharidique              | Isomalt, lactitol, maltitol  |
| <b>Glucides non digestibles</b> |                              |  |
| Oligosaccharides (DP = 3 à 9)   | Oligosaccharides             | Raffinose, stachyose, verbascose, ajugose, fructo-oligo-saccharides, galacto-oligo-saccharides                                     |
| Polysaccharides (DP > 9)        | Polysaccharides non amylacés | Cellulose, hémicellulose, pectines, inuline, et divers hydro-colloïdes (alginates, carraghénanes, gomme de guar, de caroube, etc.) |

*DP : degré de polymérisation*

La deuxième façon de différencier les glucides est basée sur leur degré de polymérisation. On va ainsi retrouver les oses simples ou monosaccharides (1 ou 2 oses polymérisés), les oligosaccharides (entre 2 et 10 oses) et les polyosides ou polysaccharides (plus de 10 oses) (18).

Un monosaccharide va au minimum avoir 4 atomes de carbone et sera sous forme cyclique et l'énantiomère dextrogyre est le plus représenté (lié un carbone asymétrique le plus éloigné de la fonction carbonyle). Les monosaccharides à 5 ou 6 carbones sont les plus courants : ce sont les pentoses et les hexoses. On retrouve ainsi le fructose, le galactose ou encore le glucose. Ils sont rapidement absorbés par l'intestin (22).

Les disaccharides sont le résultat de l'association de 2 unités saccharidiques par une liaison glycosidique par une réaction de déshydratation qui libèrera une molécule d'eau H<sub>2</sub>O. Parmi eux on retrouve le lactose, le maltose et le saccharose.

Les polysaccharides sont donc le résultat de la polymérisation de plusieurs glucides simples. Ils peuvent être sous forme linéaire (amylose) ou ramifiée (amylopectine) et vont former ensemble l'amidon qui représente la principale réserve d'énergie des végétaux (pomme de terre ou céréales par exemple). Chez l'Homme, le glucose est stocké sous l'action de l'insuline sous forme de glycogène dans le foie et dans les muscles.

Le but de la digestion va être de découper par l'action de différentes enzymes les sucres complexes pour en extraire les sucres simples. Cette hydrolyse est nécessaire car l'absorption des glucides ne peut se faire que sous forme de monosaccharides qui pourront ainsi être assimilés, puis transportés par le sang et enfin utilisés ou stockés. La digestion va commencer dans la cavité buccale par l'action d'une enzyme : l'amylase, qui va hydrolyser l'amidon en maltose et malto-dextrines. Ces derniers seront ensuite hydrolysés sous l'action de l'amylase pancréatique pour former du glucose, du maltose et de l'isomaltose. Pour finir, les disaccharides seront hydrolysés par différentes enzymes comme la saccharase, la maltase et la lactase afin de former du glucose, du fructose et du galactose qui pourront être absorbés par l'épithélium intestinal (21).

Parmi les glucides issus de l'alimentation et digérés on retrouve donc :

- L'amidon (amylose et amylopectine lié) qui va être hydrolysé par l'alpha amylase pour donner du saccharose, du maltose et du lactose
- Le maltose (2 glucoses avec liaison alpha en 1-4) qui va être hydrolysé par la maltase pour donner du glucose
- Le saccharose (fructose-glucose avec liaison alpha 1-2) qui va être hydrolysé par la saccharase en surface des entérocytes pour former du glucose et du fructose
- Le lactose (galactose-glucose avec liaison Beta 1-4) qui va être hydrolysé par la lactase et qui va ainsi donner du glucose et du galactose (23)

L'absorption intestinale des monosaccharides se fait grâce à des transporteurs de la membrane apicale et de la membrane basolatérale des entérocytes qui vont fonctionner soit de manière facilitée passive soit de manière active. Ainsi le glucose et le galactose vont passer de la lumière intestinale au cytoplasme de l'entérocytes par transport actif grâce transporteur couplé Na<sup>+</sup>-glucose SGLT1 de la membrane apicale, puis vont sortir dans le sang grâce au

transporteur passif GLUT2 de la membrane basolatérale. Le fructose va quant à lui entrer dans l'entérocyte par le transporteur passif GLUT5 et va emprunter le transporteur GLUT2 pour rejoindre la circulation sanguine. (Figure 8) (21)

Ces mouvements d'oses vont nécessiter un rééquilibrage des concentrations en ions  $\text{Na}^+$ , ce qui va donc mettre en jeu la pompe  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  dépendante de l'énergie d'hydrolyse de l'ATP.

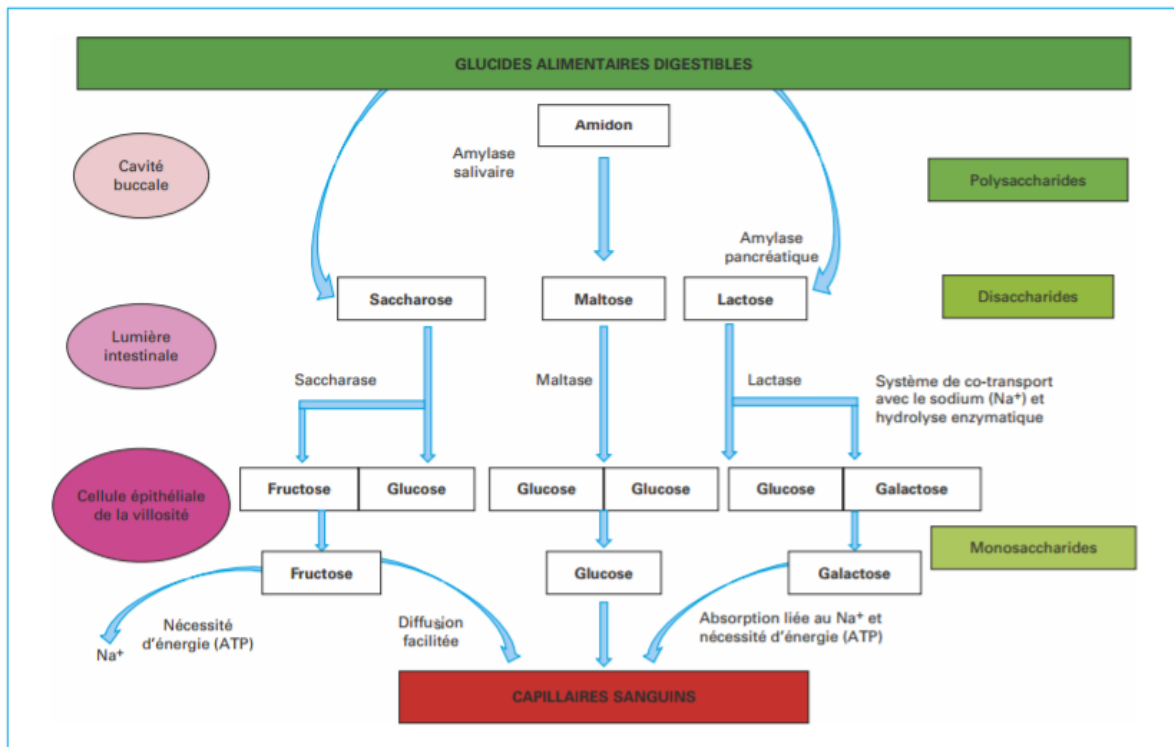


Figure 8 : Digestion de l'amidon

*L'amidon, qui est un polysaccharide va devoir successivement être hydrolysé afin de ne former que des monosaccharides : fructose, glucose et galactose. Ces derniers pourront alors être absorbés et passer dans la circulation sanguine soit par diffusion avec le fructose ou par des transporteurs voltage dépendant pour le fructose, glucose et galactose.*

La vitesse d'absorption des glucides est donc dépendante de la durée des différentes phases de transformations que vont subir les aliments ingérés. C'est ainsi que dans les années 80 le docteur David Jenkins, un chercheur de l'université de Toronto, introduisit la notion d'index glycémique. En 1981, il publia son étude basée sur une liste de 62 aliments et sucres du quotidien avec l'analyse de l'augmentation de la concentration plasmatique de glucose en fonction de l'aliment ingéré (Tableau 5).

Tableau 5 : Index glycémique de 62 aliments publié par David Jenkins en 1981.

|                               |              |                        |              |                           |              |
|-------------------------------|--------------|------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| <b>Grain, cereal products</b> |              | <b>Vegetables</b>      |              | <b>Fruit</b>              |              |
| Buckwheat                     | 51 ± 10* (5) | Broad beans (25)¶      | 79 ± 16 (6)  | Apples (golden delicious) | 39 ± 3† (6)  |
| Bread (white)                 | 69 ± 5† (10) | Frozen peas            | 51 ± 6† (6)  | Banana                    | 62 ± 9* (6)  |
| Bread (whole-meal)            | 72 ± 6† (10) | <b>Root Vegetables</b> |              | Oranges                   | 40 ± 3† (6)  |
| Millet                        | 71 ± 10‡ (5) | Beetroot (25)¶         | 64 ± 16 (5)  | Orange juice              | 46 ± 6† (6)  |
| Pastry                        | 59 ± 6* (5)  | Carrots (25)¶          | 92 ± 20 (5)  | Raisins                   | 64 ± 11‡ (6) |
| Rice (brown)                  | 66 ± 5† (7)  | Parsnips (25)¶         | 97 ± 19 (5)  | <b>Sugars</b>             |              |
| Rice (white)                  | 72 ± 9§ (7)  | Potato (instant)       | 80 ± 13 (8)  | Fructose                  | 20 ± 5† (5)  |
| Spaghetti (wholemeal)         | 42 ± 4† (6)  | Potato (new)           | 70 ± 8* (8)  | Glucose                   | 100 ± (35)   |
| Spaghetti (white)             | 50 ± 8  (6)  | Potato (sweet)         | 48 ± 6† (5)  | Maltose                   | 105 ± 12 (6) |
| Sponge cake                   | 46 ± 6† (5)  | Swede (25)¶            | 72 ± 8‡ (5)  | Sucrose                   | 59 ± 10§ (5) |
| Sweetcorn                     | 59 ± 11§ (5) | Yam                    | 51 ± 12§ (5) | <b>Dairy products</b>     |              |
| <b>Breakfast cereals</b>      |              | <b>Dried legumes</b>   |              | Ice cream                 | 36 ± 8  (5)  |
| All-Bran                      | 51 ± 5† (6)  | Beans (tinned, baked)  | 40 ± 3† (7)  | Milk (skim)               | 32 ± 5† (6)  |
| Cornflakes                    | 80 ± 6‡ (6)  | Beans (butter)         | 36 ± 4† (6)  | Milk (whole)              | 34 ± 6† (6)  |
| Meusli                        | 66 ± 9§ (6)  | Beans (haricot)        | 31 ± 6† (6)  | Yoghurt                   | 36 ± 4† (5)  |
| Porridge Oats                 | 49 ± 8  (6)  | Beans (kidney)         | 29 ± 8† (6)  | <b>Miscellaneous</b>      |              |
| Shredded Wheat                | 67 ± 10‡ (6) | Beans (soya)           | 15 ± 5† (7)  | Fish fingers              | 38 ± 6† (5)  |
| Wheatabix                     | 75 ± 10‡ (6) | Beans (tinned, soya)   | 14 ± 2† (7)  | Honey                     | 87 ± 8 (6)   |
| <b>Biscuits</b>               |              | Peas (blackeye)        | 33 ± 4† (6)  | Lucozade                  | 95 ± 10 (5)  |
| Digestives                    | 59 ± 7* (6)  | Peas (chick)           | 36 ± 5† (6)  | Mars bar                  | 68 ± 12‡ (6) |
| Oatmeal                       | 54 ± 4† (6)  | Peas (marrowfat)       | 47 ± 3† (6)  | Peanuts (25)¶             | 13 ± 6† (5)  |
| Rich Tea                      | 55 ± 4† (6)  | Lentils                | 29 ± 3† (7)  | Potato crisps             | 51 ± 7† (6)  |
| Ryvita                        | 69 ± 10‡ (7) |                        |              | Sausages                  | 28 ± 6† (5)  |
| Water                         | 63 ± 9* (6)  |                        |              | Tomato soup               | 38 ± 9* (5)  |

Significance of difference from equivalent glucose load: \* =  $p < 0.01$ ; † =  $p < 0.001$ ; ‡ =  $p < 0.05$ ; § =  $p < 0.02$ ; | =  $p < 0.002$ ; ¶ Only 25 g carbohydrate portion given.

Un index glycémique élevé va traduire une augmentation forte et rapide de la glycémie. Ce pic glycémique va induire une sécrétion importante d'insuline afin de faire diminuer la glycémie. Sous l'impulsion de l'insuline, le stockage important du glucose va avoir lieu dans le foie et les muscles ce qui peut engendrer une hypoglycémie réactionnelle. Les conséquences à court terme sont une faim qui va revenir précocement et à long terme une augmentation du poids corporel du sujet. Des maladies métaboliques comme le diabète de type 2 ou la stéatose hépatique non alcoolique peuvent alors apparaître.

Un aliment avec un index glycémique faible va en revanche engendrer une augmentation contrôlée de la glycémie sans pic rapide. C'est le cas par exemple des glucides polymérisés complexes. L'apport en fibres peut également diminuer l'index glycémique d'un aliment (24).

## 2. Lipides

Les lipides sont majoritairement représentés par les acides gras qui sont un constituant de base de l'organisme. Les acides gras sont constitués d'atome de carbone, d'hydrogène et d'oxygène en formant une molécule insoluble dans l'eau (25).

La classification des acides gras se fait selon la longueur de leur chaîne carbonée ainsi que leur degré d'insaturation. On parlera ainsi d'acide gras à chaîne courte ou longue selon le nombre de carbones, saturée ou insaturée Omega 3, 6 etc... selon la position de la double liaison (14) (25).

Les acides gras saturés sont synthétisés par tous les organismes vivants, dont l'Homme, chez qui la synthèse se fait dans le foie, le cerveau et le tissu adipeux. On va par exemple retrouver l'acide palmitique (C16) qui est le plus synthétisé. En quantité trop importante, les acides gras saturés à longue chaîne, comme l'acide laurique, l'acide myristique ou encore l'acide palmitique, auront une action délétère dans l'organisme car athérogènes (25).

Les acides gras à longue chaîne sous l'action de la delta-9-désaturase seront désaturés en acides gras mono insaturés oméga 9. Cette double liaison va introduire un carbone asymétrique, ce qui va permettre la formation de 2 isomères : l'isomère cis est naturel alors que l'isomère trans est issu de l'industrie. On va par exemple retrouver l'acide stéarique (C18) qui sera transformé en acide oléique (C18:1, n=9).

Il existe également les acides gras Omega 3 ou Omega 6, c'est-à-dire avec une double liaison en position 3 ou 6 qui sont dit essentiels. En effet, bien qu'indispensables ils ne sont pas synthétisés par l'Homme, il faut donc les apporter par l'alimentation. L'acide alpha linoléique (Omega 3) et l'acide alpha linoléique (Omega 6) peuvent être retrouvés dans les noix, le colza, le soja ou le lin pour l'origine végétale et les poissons gras comme le saumon pour l'origine animale. Ces acides gras pourront par la suite être convertis en d'autres acides gras par l'organisme grâce à des réactions de désaturation ou d'élongation. Par exemple on va retrouver l'acide eicosapentaénoïque ou l'acide docosahexaénoïque qui seront tous deux issus de l'acide alpha-linoléique par l'action d'enzymes comme des désaturases ou des élongases.

Les acides gras peuvent être libres mais ils peuvent être associés à d'autres molécules pour former les sphingolipides, les phospholipides et les triglycérides.

Les sphingolipides sont un constituant important des membranes cellulaires. En effet, selon leur composition en acides gras et leur concentration ils peuvent contribuer à la formation des micro-domaines membranaires rigides permettant l'action des enzymes, des transporteurs ou des récepteurs qui jouent un rôle majeur dans la signalisation cellulaire (26).

Les phospholipides font eux aussi partie de la membrane des cellules en assurant la structure de cette dernière. Ils sont constitués d'un glycérol estérifié de 2 acides gras et d'un groupement phosphate chargé négativement. Ils ont une structure amphiphile, une tête hydrophile chargée négativement et une queue hydrophobe formée par les acides gras, leur permettant de s'associer naturellement en micelles : dans de l'eau les queues hydrophobes des phospholipides vont se faire face afin de présenter à l'extérieur leur tête hydrophile. C'est cette propriété amphiphile des phospholipides qui est utilisée pour former la bicouche lipidique des membranes cellulaires en présentant la tête hydrophile des phospholipides d'une

couche vers le cytosol et celle des phospholipides de l'autre couche vers le milieu extracellulaire, ainsi les queues hydrophobes se font face au sein de la membrane.

Les triglycérides représentent 95 % des lipides issus de l'alimentation. Un triglycéride est composé d'un glycérol qui est estérifié de 3 acides gras. C'est ainsi que sont stockés les acides gras dans l'organisme (26).

L'absorption des triglycérides n'étant pas possible, il faudra libérer les acides gras par l'action de plusieurs lipases dans le tractus intestinal. Tout d'abord les lipases gastriques vont transformer les triglycérides en acide gras libres et diglycérides. C'est ensuite une lipase pancréatique qui va entrer en action avec une co-lipase issue des sels biliaires pour libérer un deuxième acide gras et un monoglycéride. Ce dernier sera ensuite pris en charge par une phospholipase afin de libérer le dernier acide gras. L'absorption des acides gras aura lieu au niveau de l'intestin grêle par diffusion passive. Dans l'entérocyte, les acides gras seront à nouveau condensés en phospholipides et triglycérides pour être pris en charge par les chylomicrons et transportés vers le foie et les adipocytes (27).

Les acides gras sont une formidable réserve énergétique. En effet 1 g d'acides gras peut fournir 9 kcal quand 1 g de glucides n'en donne que 4. Il faut cependant ne pas en avoir de trop car au-delà du poids non essentiel que cette réserve représente, il y a surtout un enjeu de santé cardiovasculaire. La proportion idéale en acides gras du poids corporel pour un sportif est de 5 à 13 % pour un homme et de 12 à 22 % pour une femme. Pour un homme de 75kg, les réserves énergétiques seraient donc de 11,25 kg de graisse ce qui représente plus de 100 000 kcal et de 600 g de glycogène soit 2400 kcal (24) (28).

### *3. Les protéines*

La troisième famille de macronutriments regroupe les protéines. Les protéines jouent un rôle essentiel pour l'organisme en assurant les structures de différents tissus comme le tissu conjonctif, le tissu cutané ou le tissu musculaire. Les protéines jouent également un rôle dans l'immunité via les anticorps, l'oxygénation du corps humain via l'hémoglobine, mais aussi dans le processus de digestion via les enzymes digestives.

Les protéines sont constituées d'atomes de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et d'azote. C'est par ailleurs la seule source azotée de l'organisme (24).

Les protéines sont un assemblage complexe d'environ 10 à 2000 acides aminés en longues chaînes qui peuvent être ramifiées ou non afin de prendre différentes formes selon leur fonction. Il existe 20 acides aminés différents, certains sont essentiels et d'autres non. Les acides essentiels, au nombre de 8 chez l'Homme, sont indispensables à la vie, ne sont pas synthétisables par l'Homme et doivent donc être issus de son alimentation. On va retrouver l'isoleucine, la leucine, la lysine, la méthionine, la phénylalanine, la thréonine, le tryptophane ainsi que la valine.

Concernant les sources alimentaires de protéines, les origines animales et végétales sont possibles. La viande, le poisson, le lait ou autre produits laitiers sont riches en protéines et acides aminés essentiels avec une très bonne digestibilité, supérieure aux protéines végétales. Les protéines végétales doivent quant à elle être associées entre elle. En effet, la teneur en acides aminés n'est pas la même et peut être limitée selon les sources. Il faudra ainsi associer des légumineuses pour leurs acides aminés soufrés, avec des céréales pour leur apport en lysine (15).

Les besoins en protéines pour un adulte sont d'environ 0,83 g/kg par jour s'il a un mode de vie sédentaire. Pour les sujets plus sportifs, les besoins augmentent afin de réparer les petites lésions musculaires qui apparaissent avec l'activité physique. Les besoins montent ainsi jusqu'à 1,2 à 1,7 g de protéines/kg de poids corporel par jour (24).

Les protéines peuvent également avoir un rôle énergétique mais celui-ci n'est pas recommandé. En effet la privation alimentaire aura comme conséquence un déficit en glucides, le corps va alors consommer les protéines ce qui engendrera une fonte musculaire. Le rendement énergétique des protéines est de 4 kcal pour 1 gramme.

## ii. Micronutriments

### 1. Vitamines

Les vitamines sont des molécules sans aucune valeur énergétique. Elles ont cependant un rôle important pour le bon fonctionnement de certains mécanismes comme la coagulation, le système nerveux et le système musculaire, la synthèse de l'ADN... Elles sont aussi essentielles dans le développement et la croissance du squelette par exemple.

Il est important de satisfaire ses besoins en vitamines car leur synthèse n'est pas possible par l'organisme sauf celle de la vitamine D.

On va pouvoir classer les vitamines en 2 familles : les vitamines hydrosolubles (telles que la vitamine C, les vitamines B) et les vitamines liposolubles (telles que les vitamines A, D, E et K).

#### a. Vitamines hydrosolubles

Les vitamines hydrosolubles peuvent généralement être stockées et seront éliminées si elles sont en excès par voie rénale via les urines. Les vitamines de ce groupe vont généralement avoir un rôle dans la production d'énergie en étant cofacteur de la transformation des substrats comme les glucides, les protéines et les acides gras en ATP. La vitamine C, quant à elle, va également avoir un rôle essentiel dans l'immunité et la lutte contre le stress oxydatif.

### i. Vitamine B1

La vitamine B1, également appelée thiamine, sera estérifiée en pyrophosphate de thiamine qui est la forme active pour l'organisme. Elle a un rôle dans la conduction nerveuse et donc dans l'activité musculaire squelettique mais également l'activité musculaire cardiaque. La vitamine B1 est également coenzyme dans le cycle de Krebs afin de permettre la transformation de l'acide pyruvique en acétyl-CoA. Associée au magnésium, la vitamine B1 va prendre part au cycle des pentoses afin d'assurer la transformation du glucose-6-phosphate en Fructose-1-6-Phosphate qui ensuite, via la glycolyse, assurera une production d'énergie (29).

Le stockage n'étant pas possible pour cette vitamine, une consommation régulière, en particulier aussi pour le sportif d'endurance, est nécessaire afin d'éviter les carences et ses conséquences tels que perte de poids, perte musculaire et troubles neurologiques. On va retrouver de la vitamine B1 dans les viandes, le poisson, les pommes de terre mais aussi les graines complètes ou les dérivés à base de ces dernières. Cependant la cuisson à plus de 100°C dégrade la thiamine. De même la thiaminase, une enzyme présente dans le café, le thé, l'alcool ou les poissons crus, va également dégrader la thiamine. Un régime riche en glucides va quant à lui favoriser l'absorption de la thiamine (12).

### ii. Vitamine B2

La vitamine B2, ou riboflavine, est précurseur de nombreuses coenzymes. Elle permet le transfert des électrons nécessaires aux activités des flavoprotéines et elle est impliquée dans la chaîne respiratoire mitochondriale. En effet elle permet la formation du fumarate qui intègre le cycle de Krebs à partir du succinate. La vitamine B2 est aussi nécessaire au catabolisme des acides gras, au catabolisme des bases purines et également celui de quelques acides aminés.

Son absorption se fait dans l'intestin grêle et elle peut être stockée dans le foie, le cœur et les reins. Les carences en cette vitamine sont donc rares chez le sportif d'endurance ayant une alimentation équilibrée car les sources sont nombreuses afin de couvrir les apports : abats, viandes, laitages ou poissons. Les carences seraient plus fréquentes chez les femmes allaitantes et les personnes âgées et occasionnent alors des dermatites, de l'inflammation de la muqueuse buccale ou encore de la sécheresse oculaire (12) (14) (30).

### iii. Vitamine B3

La vitamine B3 est également appelée niacine ou vitamine PP. La vitamine B3 est précurseur de 2 coenzymes cofacteurs d'oxydoréduction dans le métabolisme des protéines, des lipides et du glucose. Cela en fait un élément clé de la chaîne respiratoire mitochondriale. Les apports recommandés sont entre 11 et 14 mg par jour. Cependant, chez le sportif, les besoins augmentent de 2,5 mg par 1000 kcal de dépenses au-delà de 2200 kcal par jour. On va retrouver la vitamine B3 dans la viande, le poisson, les pains complets, les laitages et dans les légumes verts. Les carences sont assez rares dans le cadre d'une alimentation équilibrée mais engendrent fatigue, anorexie et douleurs (12) (14) (31).



#### iv. Vitamine B5

La vitamine B5, ou acide pantothénique, joue également un rôle important dans la chaîne respiratoire mitochondriale car elle permet à la fois la synthèse mais aussi le bon fonctionnement du Coenzyme A. Ce dernier est un élément indispensable au cycle de Krebs. La protéine porteuse d'acyle est également synthétisée grâce à la vitamine B5 et permet ainsi le métabolisme des acides gras, des acides aminés et des glucides.

Présente en grande quantité dans la viande, le poisson et les œufs, la vitamine B5 sera absorbée dans l'intestin. Même si les carences sont très rares, le sportif y sera particulièrement très attentif car elles peuvent induire une asthénie et une faiblesse musculaire (12) (24) (32).

#### v. Vitamine B6

La vitamine B6 est composée de six éléments qui dépendent de l'origine alimentaire : le pyridoxal, la pyridoxine, la pyridoxamine et leurs dérivés 5-phosphate. Les produits végétaux vont être composés de pyridoxine et de son dérivé 5-phosphate, le PNP (pyridoxine 5'-phosphate). Les produits d'origine animale vont quant à eux être composés de PLP (phosphate de pyridoxal) et de PMP (pyridoxamine 5'-phosphate).

La vitamine B6 joue un rôle de cofacteur dans la synthèse d'une centaine d'enzymes différentes. Elle va également participer à la glycogénèse et à la synthèse protéique comme par exemple dans la transformation de l'acide aspartique en bêta alanine ou la transformation de l'acide cystéique en taurine. La synthèse de certaines hormones est également possible grâce à la vitamine B6 comme par exemple la synthèse de la sérotonine à partir du tryptophane, la synthèse du GABA à partir de l'acide glutamique, ou encore la synthèse de la dopamine à partir de la tyrosine (12) (24) (33).

#### vi. Vitamine B8

La vitamine B8, également appelée biotine, a un rôle important en permettant la croissance cellulaire cutanéomuqueuse via la production d'énergie à partir des glucides, des lipides ou des protéines.

Cette vitamine est présente dans les abats, la viande mais également les légumes secs et les champignons. L'apport devra être plus important chez l'enfant pour sa croissance et chez le sportif pour la cicatrisation des tissus. En cas de carence, des lésions cutanéomuqueuses et une asthénie pourront apparaître ainsi que des troubles de la coordination et un sommeil de moins bonne qualité. Cette carence peut apparaître en cas de régime restrictif. Il existe des anomalies génétiques rares pouvant engendrer un déficit en holocarboxylase synthétase ou en biotinidase qui peuvent entraîner convulsions, troubles respiratoires ou un retard de développement mais également le décès si aucun traitement n'est prodigué. Le sportif sera attentif à l'intensité de son entraînement, en effet le surentraînement peut entraîner une surconsommation de vitamine B8 (12) (24) (34).

#### vii. Vitamine B9

La vitamine B9, dont la forme active dans l'organisme est la tétrahydrofolate, est une vitamine donneuse de groupement méthyl. Elle participe ainsi à la synthèse des acides nucléiques et à la réplication de l'ADN. Elle permet ainsi en particulier le renouvellement cellulaire des globules rouges et des globules blancs.

Cette vitamine est absorbée par l'intestin puis, via le cycle entéro-hépatique, elle sera stockée au niveau du foie. Les apports alimentaires sont assurés par la consommation de viande et plus particulièrement d'abats, par la consommation de légumes verts, de fromage et de légumes secs. Dans la population générale les carences en vitamine B9 sont fréquentes et favorisées par l'alcool et le tabac qui diminuent son absorption intestinale. Le sportif ayant une bonne hygiène de vie sera peu affecté par le risque de carence (12) (24) (35).

#### viii. Vitamine B12

La vitamine B12 est également appelé cobalamine car elle contient du cobalt. Elle possède 2 formes actives : la méthyl-cobalamine et la 5-désoxyadénosyl-cobalamine. Elle participe au développement musculaire par son rôle dans la synthèse protéique. Elle permet également la synthèse des globules rouges.

Son absorption intestinale est possible par l'intermédiaire d'un transporteur : la transcobalamine, et elle est ensuite stockée dans le foie.

La vitamine B12 n'est présente que dans les aliments d'origine animale car elle est synthétisée exclusivement par des bactéries présentes dans la viande, le poisson et le fromage. Etant ainsi absente des végétaux, une attention particulière est à apporter par les athlètes végétariens dont les apports seraient faibles ou même nuls chez les athlètes végans. La carence en vitamine B12 a pour conséquence une anémie et donc une fatigue importante (12) (24) (36).

#### ix. Vitamine C

La vitamine C, ou acide ascorbique, a un rôle de coenzyme pour de nombreuses enzymes dont par exemple celles qui permettent la synthèse de la carnitine ou encore celle assurant l'hydroxylation de la proline précurseur du collagène. La vitamine C a donc un rôle très important pour l'organisme, ce qui a particulièrement été mis en évidence lors d'une carence profonde en vitamine C, qui est aussi appelée scorbut, qui peut amener à la mort. La carence en vitamine C se manifeste en premier lieu par un syndrome hémorragique, par des atteintes gingivales avec déchaussement dentaire, par des troubles de la cicatrisation ou encore une atteinte rhumatismale.

La vitamine C joue également un rôle dans la défense contre le stress oxydatif en luttant activement contre les radicaux libres. L'absorption du fer est augmentée par l'ingestion concomitante de vitamine C. La vitamine C participe également à la néoglucogenèse.

L'organisme ne pouvant pas stocker la vitamine C, elle devra être apportée quotidiennement par une alimentation riche en fruits et légumes. Elle est détruite par la consommation

simultanée de thé, de café, d'alcool ou de tabac. La carence en vitamine C est régulièrement observée dans la population générale et elle occasionne fatigue, céphalées et une sensibilité accrue aux infections. Les apports recommandés sont de 110 mg/jour mais ils seront augmentés à 200 voire 300 mg/jour chez les sportifs d'endurance. Cependant, il ne faudra pas être en surdosage car en trop grande quantité, la vitamine C devient pro-oxydative ce qui induit une diminution de la régénération cellulaire et ainsi une baisse de la qualité de la récupération (12) (24) (37).

## b. Vitamines liposolubles

Les vitamines liposolubles peuvent être stockées dans le foie ou le tissu adipeux et seront éliminées dans les selles si elles sont en excès.

### i. Vitamine A

Deux formes de vitamine A sont disponibles dans l'alimentation. La vitamine A d'origine animale est le rétinol, que l'on va retrouver dans le foie, le beurre ou le fromage. Les caroténoïdes, vitamine A d'origine végétale, vont être trouvés dans les fruits et les légumes. Après avoir été absorbée passivement par l'intestin, la vitamine A sera transportée dans le sang par l'intermédiaire des chylomicrons pour être stockée dans le foie.

Les rôles de la vitamine A sont multiples. De par son rôle dans la réplication de l'ADN, elle est indispensable à la croissance cellulaire et en particulier pour les cellules de l'immunité. La vitamine A est également précurseur des pigments rétiniens et elle aura donc une importance toute particulière dans l'acuité visuelle.

La carence en vitamine A est rare et elle provoque une baisse de la vue, une augmentation de la sensibilité aux infections et la survenue de troubles cutanés (12) (38).

### ii. Vitamine D

La vitamine D, ou cholécalférol, joue un rôle important dans la régulation du métabolisme phosphocalcique en augmentant par exemple l'absorption du phosphore et du calcium, et en aidant à fixer le calcium sur les os. Elle participe également au bon fonctionnement d'organes vitaux tels que le pancréas ou le cerveau, et à la synthèse de la lignée hématopoïétique.

Il existe de nombreuses sources exogènes de vitamine D dans l'alimentation avec les poissons gras, les huitres, le jaune d'œuf ou encore le foie. Mais la première source de vitamine D de l'organisme est endogène. En effet, l'organisme, sous l'action des UVB du soleil, peut synthétiser la vitamine D. L'exposition solaire étant plutôt faible dans notre région des Hauts-de-France (mais aussi dans toutes les autres régions du nord de l'Europe), les carences en vitamine D sont fréquentes. Ces dernières vont engendrer une fragilité osseuse et une baisse de l'immunité. Une supplémentation est donc maintenant recommandée dans la population générale, de même que pour le sportif d'endurance.

La complémentation en vitamine D peut être journalière à l'aide de goutte à raison d'environ 400 à 800UI par jour. Si l'observance est insuffisante des ampoules peuvent être prescrites par le médecin à raison d'une ampoule de 50 000UI tous les 2 mois par exemple (12) (24) (39).

### iii. Vitamine E

La vitamine E, également appelé tocophérol, limite la peroxydation des lipides des membranes cellulaires et des membranes mitochondriales grâce à son activité anti-oxydante. La vitamine E possède également des capacités antiathérogènes en inhibant l'oxydation des LDL. Elle diminue également les prostaglandines et le tromboxane. Elle intervient ainsi dans les processus anti-inflammatoires et la coagulation.

La vitamine E est absorbée de manière passive au niveau intestinal associée à des acides gras sous forme de micelles. Elle sera transportée ensuite par les chylomicrons vers le foie pour y être stockée. Les carences sont rares et responsables de myopathie et de dysfonctionnements neurologiques, les apports de vitamine E devront donc être suffisants chez les individus à activité physique importante. On va retrouver de la vitamine E dans les différentes huiles (colza, olive, tournesol, etc...) et donc dans les noix, dans les poissons gras, mais aussi dans certains légumes comme les épinards ou les petits pois. En revanche son surdosage, bien que rare, va engendrer un effet pro-oxydant (12) (24) (40).

### iv. Vitamine K

La vitamine K qui existe sous plusieurs formes dont la vitamine K1, ou phylloquinone, et la vitamine K2, ou ménaquinone, présente moins d'intérêt pour les performances sportives, mais elle joue un rôle important dans la coagulation.

On va retrouver la vitamine K principalement dans les choux, les épinards ou le persil. Une carence en vitamine K pourra conduire au mieux à une anémie mais elle pourra être mortelle car des hémorragies, notamment digestives, pourront ne pas être contrôlées.

Dans le cadre du sportif d'endurance, l'anémie pourra être délétère pour ses performances notamment à cause de microhémorragies qui pourraient être dues aux chocs à répétition (24) (41).

## 2. Minéraux

Les minéraux sont des composants essentiels qui, comme leur nom l'indique, sont d'origine minérale. On les retrouve dans le corps humain sous forme de sels dans des proportions qui tournent dans l'ordre du gramme. Les minéraux retrouvés en plus grandes quantités sont le calcium  $Ca^{2+}$ , le magnésium  $Mg^{2+}$ , le potassium  $K^+$  et le sodium  $Na^+$ .

### a. Le calcium

Le calcium est le minéral le plus abondant de l'organisme, il représente en effet de 1 à 1,2 kg de poids corporel. On le retrouve principalement dans les os et les dents. Le reste du calcium

est retrouvé dans les autres tissus afin de participer à certaines réactions physiologiques comme la coagulation sanguine, la signalisation et la perméabilité membranaire. Le calcium a également une fonction importante dans la conduction des messages nerveux et dans la contraction musculaire (42).

La carence calcique a donc comme conséquences une fragilisation du squelette, l'ostéoporose mais également des crampes. Pour éviter les carences calciques, il faut un apport d'environ 800 mg par jour. On va principalement le retrouver dans les produits laitiers, les sardines, les légumes verts, les fruits secs ou l'eau minérale. Pour favoriser son absorption intestinale, la vitamine D joue un rôle important. En revanche, le café, les légumineuses ou le phosphore limite l'absorption du calcium. L'élimination du calcium peut être limitée par une alimentation alcalinisante (alimentation riche en fruits et légumes) quand une alimentation acidifiante peut augmenter les pertes en calcium (alimentation riche en laitage, viande et sel) (12) (24).

#### b. Le magnésium

Le magnésium représente environ 25 g dont la moitié est présente dans les os et les dents. La part extracellulaire va participer à de nombreuses réactions enzymatiques, dans la transmission de l'influx nerveux, mais permet également la phase de relaxation de la contraction musculaire. Le magnésium joue aussi un rôle dans la synthèse protéique et la régulation de la tension artérielle (43).

La carence en magnésium va se manifester par une fatigue, du stress, des crampes, une baisse de la VO<sub>2</sub> max et donc une baisse de la récupération après un exercice physique. La source alimentaire de magnésium est principalement représentée par les oléagineux, les céréales complètes ou encore le chocolat noir. Pour être optimale, l'absorption du magnésium sera favorisée par un apport en vitamine B6 et son maintien dans les cellules favorisé par la taurine grâce à son pouvoir magnésio-fixateur. En revanche, le stress, l'alcool, le café ou le sport diminue l'absorption intestinale du magnésium qui est déjà faible en temps normal : environ 30 % du magnésium ingéré sera finalement absorbé (12) (14) (44).

#### c. Le potassium

Le potassium est un des éléments, avec le sodium, qui régule le potentiel membranaire des cellules. C'est un agent important pour l'influx nerveux et dans le métabolisme des glucides, le potassium étant cofacteur de la pyruvate kinase. Le potassium va permettre la libération d'insuline lors de l'augmentation de la glycémie. C'est également un élément important dans la synthèse protéique et dans la régulation acido-basique. La contraction musculaire est également demandeuse de potassium (45).

Sa concentration plasmatique doit être stable et comprise entre 3,6 et 5 mmol/L soit 130 à 200 mg/L. Ce taux va ainsi permettre un bon fonctionnement cardiaque, une bonne régulation de l'humeur et une absence de crampes. Les sources en potassium sont les légumes et fruits en général, qu'ils soient secs ou non (12) (24) (46).

#### d. Le sodium

Le sodium participe à la régulation de la pression osmotique en se déplaçant constamment entre les espaces intra- et extracellulaire. De par ses propriétés, le sodium joue un rôle important dans l'hydratation et donc dans la régulation de la tension artérielle, la transmission du message nerveux et la contraction musculaire.

Un excès de sodium peut provoquer des pathologies cardiovasculaires comme l'hypertension, ou des pathologies rénales. Cet excès peut être dû à une alimentation trop salée à cause du sel de table, à une alimentation trop riche en produits transformés qui sont généralement trop salés, mais aussi à la consommation excessive de charcuterie, de fromage ou de produits de la mer (12) (24) (47).

### 3. Oligo-éléments

Les oligo-éléments sont également indispensables pour le bon fonctionnement d'enzymes, dans l'immunité ou dans des procédés physico-chimiques tels que le transport de l'oxygène, la lutte contre le stress oxydant ou encore la respiration cellulaire. Leur proportion est quant à elle beaucoup plus faible que tous les autres éléments dont on a parlé précédemment, de l'ordre du microgramme pour certains. On va retrouver en particulier le cuivre  $\text{Cu}^{2+}$ , le fer  $\text{Fe}^{2+}$ , le sélénium  $\text{Se}^{4+}$  et le Zinc  $\text{Zn}^{2+}$ .

#### a. Le cuivre

Le cuivre est un composant de certaines métallo-enzymes qui sont impliquées dans le cycle de la respiration cellulaire et dans la lutte contre le stress oxydatif comme la cytochrome C oxydase, l'amine oxydase ou la superoxyde dismutase. Il participe également à la synthèse du cartilage, à la minéralisation osseuse mais aussi à l'hématopoïèse et au métabolisme du fer (48) (49).

L'excès et le déficit en cuivre sont néfastes. En effet, une anémie sera provoquée par le déficit en cuivre et un effet pro oxydant aura lieu en cas d'excès, avec à long terme une atteinte hépatique. Les sources en cuivres sont le chocolat, les huitres, les fruits et les légumes secs mais aussi les céréales complètes (12) (24).

#### b. Le fer

Le fer, contrairement aux autres oligo-éléments, est présent en quantités importantes. On notera en particulier son implication importante dans le transport de l'oxygène, dans la synthèse de l'hémoglobine et de la myoglobine mais également dans la respiration cellulaire par sa capacité à transporter les électrons (50) (51).

Les apports en fer chez les femmes devront être plus importants, environ 16 mg par jour, contre 9 mg pour les hommes. Chez les sportifs, les apports devront encore être augmentés pour atteindre 15 à 20 mg par jour. Le fer étant peu absorbé, il vaudra mieux le prendre avec un apport en vitamine C et éviter la consommation de thé et de café qui diminuent son

absorption. Les sources de fer alimentaire seront la viande rouge, les fruits de mer, les œufs et également les lentilles (12) (24).

La baisse de la concentration plasmatique de fer va occasionner de la fatigue, une anémie ferriprive. Cette anémie sera particulièrement délétère chez le sportif car le transport d'oxygène sera altéré et un essoufflement fera donc son apparition en plus de la fatigue générale, des vertiges mais aussi une tachycardie (52).

#### c. Le sélénium

Bien que présent en très faible quantité, le sélénium possède un très puissant pouvoir antioxydant car il est un composant important de la glutathion peroxydase qui va capturer les radicaux libres dans l'organisme. Cet ion participe également à la régulation de la synthèse des hormones thyroïdiennes, aux défenses immunitaires mais aussi à l'inflammation. La spermatogénèse va être également impactée par les carences en sélénium qui peut donc être responsable d'infertilité masculine.

On va retrouver du sélénium dans les noix du Brésil, la viande et les produits de la mer (12) (24) (53).

#### d. Le zinc

Le zinc a un rôle important dans les activités enzymatiques du corps humain. En effet il est un élément important pour plus de 300 enzymes comme par exemple la superoxyde dismutase qui lutte contre les espèces réactives de l'oxygène. Le zinc joue également un rôle dans l'immunité, la coagulation ainsi que dans la synthèse des protéines et des acides nucléiques (54).

La carence en zinc engendre de la fatigue avec une baisse de l'appétit mais aussi des problèmes de peau. On va retrouver du zinc dans les huîtres, la viande rouge, le fromage et dans le pain complet (12) (55).

#### e. Hydratation

L'eau est le composant principal du corps humain avec une moyenne de 60 à 65 % de la masse corporelle. Cette proportion varie en fonction de l'âge, du sexe mais aussi de la corpulence du sujet. Ce volume se divise en 2 parties, l'une représente l'eau intracellulaire pour un tiers et l'autre représente l'eau extracellulaire pour les deux tiers restants (56).

L'eau est indispensable à la vie. Ainsi, si les pertes hydriques sont trop importantes sans compensation par de l'apport, la mort peut arriver en quelques jours. Ces rôles multiples sont par exemple le transport et la diffusion des nutriments et des gaz à travers le sang, l'élimination des toxines par les urines, par les selles ou encore par la sueur, le bon fonctionnement enzymatique, et pour finir surtout le maintien de la température corporelle entre 35 et 42°C.

### i. Perte hydrique

Parmi les pertes hydriques, on va bien évidemment retrouver les urines qui représentent environ 1 à 2 L et qui vont permettre l'élimination de la majorité des toxines hydrophiles du corps humain. Pour le reste, les quantités seront plus faibles, avec environ 200 ml pour les selles, et une petite quantité, qui est très variable selon les conditions et les individus, par la respiration. Pour finir on va retrouver les pertes cutanées d'environ 450 ml avec la sueur sécrétée par les glandes sudoripares. Cette dernière élimination d'eau sous forme de sueur permet l'homéothermie du corps humain qui permet d'évacuer de l'énergie thermique par l'évaporation de la sueur. En effet environ 2,2 kJ seront évacués par gramme d'eau (57).

### ii. Apport hydrique

L'apport hydrique va devoir compenser les pertes pour garantir l'homéostasie. Ainsi il va falloir boire pour apporter l'eau de boisson qui pourra être de l'eau, du soda mais aussi de la soupe. Cette partie de l'hydratation représente environ 1,5 L par jour. Il faudra également manger, car les aliments que l'on ingère sont composés de 40 à 80 % d'eau. Et pour finir de l'eau sera produite par l'organisme grâce aux réactions d'oxydation des macronutriments. Ces 2 derniers apports représentent environ 1 L d'eau, ce qui porte les apports d'une journée à 2,5 L d'eau (58).

### iii. Balance hydrique

La balance hydrique entre les pertes et les apports doit toujours être à l'équilibre afin de ne pas être déshydraté ni hyper-hydraté. Cet équilibre est assuré par des osmo-récepteurs hypothalamiques : en cas de perte d'eau supérieure aux apports, qui se traduit par une augmentation de la pression osmotique extracellulaire, les osmo-récepteurs vont enclencher la sécrétion d'une hormone antidiurétique également appelé vasopressine par la neurohypophyse afin d'augmenter la réabsorption par le rein de l'eau et déclencher la sensation de soif (59).

Les pertes en eau seront bien différentes lors d'un exercice physique intense et les apports devront bien sûr être adaptés en conséquence et ce d'autant plus si la température ambiante augmente. En effet, lors d'un effort à une température de 30°C, les besoins en eau peuvent augmenter de 1 à 2 L par heure afin de faire baisser la température du corps humain (58).

La déshydratation, qui est donc une trop grande perte en eau et en minéraux, aura comme symptômes la sécheresse des muqueuses, la soif, une agitation, l'insomnie mais cela peut également influencer le système cardio vasculaire (57).



## 4. Mise en place du plan nutritionnel du sportif d'endurance

### a. Programme nutritionnel

#### i. Avant l'effort

##### 1. La charge glycogénique

La charge glycogénique se construit durant les jours qui précèdent l'épreuve. L'objectif d'avant course est d'augmenter les réserves de glycogène musculaire afin d'avoir plus de carburant. C'est le principe du régime dissocié modifié. Le principe de ce régime consiste en une alimentation hyper glucidique, c'est-à-dire 700 à 800 grammes de glucides par jour, durant les 3 jours avant la course. Les glucides doivent donc représenter 60 à 65 % de l'apport alimentaire. Le régime dissocié modifié est dit « modifié » car il est un dérivé du régime dissocié scandinave. Ce dernier consiste en une phase de 3 jours où l'on va épuiser les réserves en glycogène avec un régime pauvre en glucides et riche en protéines et lipides. Puis une phase de 3 jours, où on va apporter des glucides en quantités importantes afin de les stocker. Ainsi, on va augmenter d'environ 90 % les réserves en glycogène musculaire. Le régime scandinave est cependant réservé aux athlètes confirmés car il est très contraignant.

C'est donc l'origine de la « pasta party » qui consiste à manger de 150 à 200 grammes de pâtes crues (soit environ 450 à 600 grammes de pâtes après cuisson) la veille de la course.

La surcharge glycogénique est intéressante pour les épreuves qui vont durer entre 100 et 160 minutes afin d'éviter l'effondrement des performances. Ce régime n'a pas d'intérêt pour les épreuves plus courtes car les réserves habituelles sont suffisantes.

L'effondrement des performances peut être associé au fameux « mur du marathon ». A ce moment précis, le sportif a épuisé ses réserves de glycogène musculaire et n'a donc plus l'énergie pour continuer la course au même rythme. Pour les efforts de plus longues durées, le régime dissocié modifié est intéressant mais n'est pas suffisant. Il faudra prévoir un apport exogène d'énergie durant l'épreuve (cf. le paragraphe ci-dessous « ii. Pendant l'effort ») (14).

##### 2. Les dernières heures avant l'épreuve

L'objectif de ces dernières heures est de maintenir les réserves de glycogène et d'avoir une glycémie stable.

Le dernier repas avant l'épreuve doit être complet. Il correspond souvent au petit déjeuner et doit être consommé environ 3 heures avant. Le repas idéal doit être composé de céréales le plus complètes possibles ou de pain complet (glucides complexes), d'une bonne hydratation

(eau, jus de pommes sans sucre, thé, café...) et d'une source de protéines (œufs, blanc de poulet, jambon).

On va favoriser les index glycémiques bas car si l'index glycémique du repas est trop haut, on aura une sécrétion insuline importante et donc par la suite une hypoglycémie réactionnelle qui aura lieu vers le début de l'épreuve. Il en ressortira donc une baisse des performances.

Entre le dernier repas et le départ, on peut trouver un intérêt dans les boissons dites « d'attente » (cf. le paragraphe ci-après « 3. Les boissons d'attente »). On va ainsi avoir un apport de glucose sous forme polymérisé (index glycémique bas), qui maintient les réserves et la glycémie, et qui en plus permet une bonne hydratation de l'athlète (14).

## ii. Pendant l'effort

Pour les épreuves inférieures à 90 minutes, il y a peu d'intérêt d'apporter des glucides exogènes car les réserves sont généralement suffisantes si l'athlète est bien préparé.

Pour les épreuves supérieures à 90 minutes, il devient nécessaire de s'alimenter. Il faut donc trouver la forme adaptée qui convient à l'athlète : soit liquide, soit solide, soit les deux.

Pratique et rapide la forme liquide a plusieurs avantages. Elle est en effet vectrice d'eau, elle offre donc apport hydrique en plus de l'apport énergétique. La biodisponibilité est variable en fonction de la vidange gastrique, du volume de la portion consommée, de la concentration en glucose et de l'osmolarité de la boisson énergétique.

Pour les épreuves de 2 à 4 heures, on va favoriser les boissons avec une concentration de 5 à 6 % de glucides pour apporter 60 à 80 grammes de glucides par heure.

Pour de l'ultra endurance, il est important d'associer des apports liquides avec des apports solides afin de changer les goûts et les textures, ceci permettra d'améliorer la tolérance digestive. Un apport de 80 à 100 grammes de glucides par heure est nécessaire en respectant une proportion de 2 à 3 moles de glucose pour 1 mole de fructose. L'utilité du fructose est d'augmenter le passage des oses à travers la barrière intestinale en utilisant un autre transporteur que celui du glucose et ainsi d'augmenter à la fois la tolérance et l'efficacité de l'apport.

Dans tous les cas, il faudra adapter la dilution en fonction des conditions climatiques afin de satisfaire les besoins hydriques également. Ainsi quand la température ambiante est élevée, on va diluer un peu plus la boisson afin d'augmenter l'apport hydrique sans négliger l'apport énergétique.

Différents exemples d'apports alimentaires consommables durant les épreuves seront détaillés plus loin dans ce manuscrit (14).

### iii. Après

Après l'effort, l'objectif sera de compenser toutes les pertes, hydriques et énergétiques, qui auront eu lieu. Il faudra également réparer les lésions musculaires engendrées par l'effort.

#### *1. Restauration hydrominérale*

Suite aux pertes sudorales pendant l'épreuve, il faudra restaurer la balance hydrique et également apporter des minéraux.

Le sodium est perdu principalement par la sueur. Il faudra donc compenser cette perte par un apport sous forme de chlorure ou de citrate de sodium. Un repas équilibré (féculents, protéines et légumes) d'après course et/ou une boisson de récupération seront à privilégier.

Pour évaluer de façon précise les pertes hydriques liées à la sueur, il peut y avoir un intérêt dans la double pesée : on se pèse avant et après l'épreuve. On prend ensuite 150 % de la différence de poids, ce qui représentera environ le besoin pour l'apport hydrique. Par exemple un sportif de 70 kilogrammes avant effort et pesant 69 kilogrammes, devra consommer environ 1,5 litre d'eau (14).

#### *2. Restauration des réserves glucidiques*

Il est important de refaire rapidement après l'effort les stocks de glycogène, et cette restauration des réserves est plus efficace pendant la fenêtre métabolique. C'est une période d'environ une demi-heure suite à l'effort où l'énergie est très bien assimilée. Il faudra donc apporter toute cette énergie par des boissons ou des aliments riches en glucides.

Ainsi la récupération sera optimale si on assimile de 60 à 80 g de glucides dans les 30 minutes suivant l'effort et 130 à 140 g dans les 2 heures.

Encore une fois le fructose a un intérêt pour éviter la saturation des transporteurs et donc d'augmenter le débit maximal pour l'absorption du glucose et ainsi favoriser la formation de glycogène (14).

#### *3. Maintien des acides aminés*

Les acides aminés sont primordiaux pour la synthèse des protéines musculaires qui ont été épuisées et lésées par l'effort.

L'apport en protéines est donc important dans l'endurance pour réparer les lésions mais aussi en cas de sport de puissance afin de réparer et augmenter le volume musculaire (14).

## b. Idées de recettes

Comme on l'a vu, le sportif doit avant tout suivre les recommandations du PNNS, avoir une bonne hygiène de vie... La place du pharmacien sera donc d'abord de rappeler ces conseils. Il pourra aussi s'appuyer sur des compléments alimentaires et des compléments vitaminiques dont on peut voir la publicité dans les médias et dont les marques vont varier en fonction de la pharmacie. Les compléments alimentaires ne sont pas le propos ici car, par la nutrition et des règles simples, tous les apports nécessaires du sportif peuvent être comblés. C'est pourquoi nous allons voir dans cette partie du « fait-maison » qui allie un coût moindre et une connaissance parfaite des ingrédients utilisés.

### i. Avant

Les jours précédant une épreuve nous avons vu qu'il nous fallait un apport important de glucides afin de booster nos réserves. Nous allons voir maintenant comment les maintenir à quelques heures de l'épreuve avec le fameux gâteau sport, les boules énergétiques ainsi que la boisson d'attente.

#### 1. Le gâteau sport

Le gâteau sport est le petit déjeuner incontournable des sportifs (Tableau 6). Il a l'avantage d'être complet nutritionnellement parlant avec un apport protéique grâce à la farine et le lait, glucidique grâce aux fruits et miel et lipidique et d'être facile à manger quand on n'est pas chez soi où un petit déjeuner complet ferait très bien l'affaire. Pour cette recette, on pourra adapter, selon les intolérances, la farine afin d'éliminer le gluten, ou le lait pour éviter le lactose.

Pour ce faire, il nous faudra :

- 300 g de farine de blé ou un mélange de farines différentes
- 400 ml de lait animal ou végétal
- 150 g de miel
- 60 g de fruits secs (par exemple : 20 g d'abricots, 20 g de figues, 20 g de pruneaux)
- 60 g de raisins secs
- 1 cuillère à soupe d'huile
- 1 sachet de levure
- 1 cuillère à soupe d'amandes en poudre

On va commencer par préchauffer le four à 180°C. On mélange ensuite toutes les poudres puis on ajoute petit à petit le lait et le miel. On finira par hacher les fruits secs et les ajouter à la préparation avant d'enfourner environ 40 min dans un moule beurré et fariné (60) (61).

Tableau 6 : Apport Nutritionnel du gâteau sport

| Analyse moyenne | Pour une part de gâteau d'environ 200 g | % VNR |
|-----------------|---|-------|
| Énergie (kcal)  | 545                                     |       |
| Protéines (g)   | 13                                      |       |
| Lipides (g)     | 7,75                                    |       |
| Glucides (g)    | 105,3                                   |       |
| dont sucres (g) | 51,5                                    |       |
| Magnésium (mg)  | 46,9                                    | 13 %  |
| Calcium (mg)    | 159,2                                   | 20 %  |
| Phosphore (mg)  | 376,1                                   | 54 %  |
| Potassium (mg)  | 600,9                                   | 30 %  |
| Sodium (mg)     | 355,4                                   |       |
| Fer (mg)        | 2,26                                    | 16 %  |
| Zinc (mg)       | 0,77                                    | 8 %   |
| Cuivre (mg)     | 0,14                                    | 14 %  |
| Manganèse (mg)  | 0,21                                    | 11 %  |
| Iode (µg)       | 11,84                                   | 8 %   |
| Sélénium (µg)   | 1,58                                    | 3 %   |
| Vitamine C (mg) | 2,63                                    | 3 %   |
| Vitamine E (mg) | 3,84                                    | 32 %  |
| Vitamine D (µg) | 0,01                                    | 0,2 % |

|                   |       |      |
|-------------------|-------|------|
| Vitamine B1 (mg)  | 0,16  | 15 % |
| Vitamine B2 (mg)  | 0,3   | 21 % |
| Vitamine B3 (mg)  | 1,13  | 7 %  |
| Vitamine B5 (mg)  | 0,72  | 12 % |
| Vitamine B6 (mg)  | 0,33  | 25 % |
| Vitamine B9 (mg)  | 26,86 | 13 % |
| Vitamine B12 (mg) | 0,27  | 11 % |

*VNR : valeur nutritionnelle recommandée*

## 2. La boule énergétique

Pour un petit en-cas facile à transporter, on peut se tourner vers les boules énergétiques. C'est une alternative originale à la barre de céréales qui permettra un apport de qualité en glucides et protéines végétales grâce aux fruits secs.

Les boules énergétiques pourront être consommées avant, pendant mais aussi après l'effort du fait de leur composition complète (Tableau 7).

Pour ce faire, il nous faudra :

- 50 g de noisettes
- 50 g de poudre de protéine de riz brun
- 250 g de dattes séchées
- 2 cuillères à soupe d'huile de coco
- 1 cuillère à soupe de cannelle en poudre
- 4 pincées de fleur de sel
- 2 cuillères à soupe de graines de sésame pour l'enrobage

Pour préparer environ 6 boules énergétiques il nous suffira de mixer tous les ingrédients sauf les graines de sésame pour obtenir une pâte. On va diviser en 6 la préparation et bouler chaque portion en essayant de les compacter au maximum. Pour la couche de finition, il suffit de rouler les boules dans les graines de sésame (61) (62).

Tableau 7 : Apport Nutritionnel de la boule énergétique

| Analyse moyenne                 | Pour une boule énergétique de 60g | % VNR |
|---------------------------------|-----------------------------------|-------|
| Énergie (kcal)                  | 222                               |       |
| Protéines (g)                   | 9,1                               |       |
| Lipides (g)                     | 8,3                               |       |
| Glucides (g)<br>dont sucres (g) | 27,9<br>27,5                      |       |
| Magnésium (mg)                  | 33,1                              | 9 %   |
| Calcium (mg)                    | 28,7                              | 4 %   |
| Phosphore (mg)                  | 54,2                              | 8 %   |
| Potassium (mg)                  | 361,7                             | 18 %  |
| Sodium (mg)                     | 42,8                              |       |
| Fer (mg)                        | 0,6                               | 4 %   |
| Zinc (mg)                       | 0,3                               | 3 %   |
| Cuivre (mg)                     | 0,4                               | 40 %  |
| Manganèse (mg)                  | 0,4                               | 20 %  |
| Iode (µg)                       | 2,3                               | 2 %   |
| Sélénium (µg)                   | 2,9                               | 5%    |
| Vitamine C (mg)                 | 1,3                               | 2 %   |
| Vitamine B1 (mg)                | 0,1                               | 9 %   |
| Vitamine B2 (mg)                | 0,1                               | 7 %   |
| Vitamine B3 (mg)                | 0,5                               | 3 %   |
| Vitamine B5 (mg)                | 0,5                               | 8 %   |
| Vitamine B6 (mg)                | 0,1                               | 7 %   |

|                  |      |     |
|------------------|------|-----|
| Vitamine B9 (mg) | 12,9 | 6 % |
|------------------|------|-----|

VNR : valeur nutritionnelle recommandée

### 3. La boisson d'attente

Comme son nom l'indique, la boisson d'attente est faite pour attendre le départ de l'épreuve. Elle permet, grâce son index glycémique bas, d'apporter de l'énergie jusqu'au dernier moment et de maintenir l'hydratation de l'athlète. La boisson d'attente est composée de maltodextrine pour son apport énergétique, sa forte digestibilité et son faible pouvoir osmolaire, ceci permettra d'éviter les troubles digestifs et les hypoglycémies réactionnelles en début de course. Elle contient aussi du citrate de magnésium qui, par son pouvoir tampon, va rétablir l'équilibre acido-basique. Le curcuma qu'elle contient possède des capacités antioxydantes afin de lutter contre le stress oxydatif (Tableau 8).

Pour ce faire, il nous faudra :

- 15 g de maltodextrine en poudre
- 1 cuillère à soupe de miel
- 0,5 g de citrate de magnésium
- 1 cuillère à soupe de curcuma
- 2 pincées de fleur de sel
- 1 goutte d'huile essentielle de pamplemousse pour le gout
- Eau QSP 500 ml

Pour préparer cette boisson, il faudra seulement mélanger ensemble tous les ingrédients jusqu'à obtenir un mélange homogène. On transvase ensuite dans un bidon ou une bouteille pour la facilité de transport. La boisson sera ensuite à consommer entre 1 h et 20 min avant le départ de l'épreuve (61) (63).

Tableau 8 : Apport Nutritionnel de la boisson d'attente

| Analyse moyenne | 500 ml de boisson énergétique | % VNR |
|-----------------|-------------------------------|-------|
| Énergie (kcal)  | 93                            |       |
| Protéines (g)   | 0,1                           |       |
| Lipides (g)     | 0                             |       |



|                  |       |      |
|------------------|-------|------|
| Glucides (g)     | 23,1  |      |
| dont sucres (g)  | 8     |      |
| Magnésium (mg)   | 102,5 | 28 % |
| Calcium (mg)     | 1,6   | <1 % |
| Phosphore (mg)   | 0,6   | <1 % |
| Potassium (mg)   | 7,5   | <1 % |
| Sodium (mg)      | 188,9 |      |
| Fer (mg)         | 0,1   | <1 % |
| Zinc (mg)        | 0,1   | <1 % |
| Cuivre (mg)      | 0,1   | <1 % |
| Manganèse (mg)   | 0,1   | <1 % |
| Iode (µg)        | 0,1   | <1 % |
| Vitamine C (mg)  | 0,8   | 1 %  |
| Vitamine B1 (mg) | 0     | 0 %  |
| Vitamine B2 (mg) | 0,1   | <1 % |
| Vitamine B3 (mg) | 0,1   | <1 % |
| Vitamine B5 (mg) | 0,1   | <1 % |
| Vitamine B6 (mg) | 0,1   | <1 % |
| Vitamine B9 (mg) | 0,2   | <1 % |

*VNR : valeur nutritionnelle recommandée*

## ii. Pendant

Pendant l'effort, nous avons vu qu'il fallait continuer à avoir un apport énergétique afin de ne pas vider les réserves de glycogène et ainsi éviter une baisse drastique des performances, ce qui est illustré par exemple par le « mur » du marathon. Ainsi plusieurs choix se proposent à

nous pour atteindre cet objectif : la boisson d'effort, le gel énergétique ou la barre énergétique.

Pour toutes les recettes qui vont suivre, des adaptations sont bien évidemment possibles pour respecter le goût de chacun ou pallier aux intolérances. On pourra ainsi changer d'épices (curcuma, cannelle, paprika, etc....), de noix (cajou, brésil, pecan, noisette, etc....), de fruits secs (dattes, abricots, figues, etc....), tout en gardant la même texture et plus ou moins les mêmes apports.

### *1. La boisson d'effort*

Nous allons commencer par la boisson énergétique qui pourra être utilisée lors de n'importe quelle épreuve. Elle sera la base de l'apport énergétique pendant toute la durée de l'épreuve. Il faudra donc qu'elle soit complète et bien équilibrée afin de ne pas occasionner de problèmes digestifs (Tableau 9). Elle est composée de maltodextrine pour son apport énergétique, sa forte digestibilité et son faible pouvoir osmolaire, ceci permettra d'éviter les troubles digestifs. Elle contient aussi du citrate de magnésium qui, par son pouvoir tampon, va rétablir l'équilibre acido-basique. Le curcuma qu'elle contient possède des capacités antioxydantes afin de lutter contre le stress oxydatif

Pour ce faire, il nous faudra :

- 150 ml d'eau de coco pour son apport en potassium, sodium et magnésium.
- 20 g de maltodextrine en poudre pour son apport énergétique sans pour autant augmenter l'osmolarité de la boisson ce qui la rendrait moins digeste
- 1 cuillère à soupe de miel
- 0,5 g de citrate de magnésium pour son pouvoir de tampon qui va ainsi rétablir l'équilibre acido-basique
- 1 cuillère à soupe de curcuma
- 2 pincées de fleur de sel
- 2 gouttes d'essence de citron pour le goût
- Eau : QSP 500 ml

Pour préparer la boisson, il suffit de mélanger tous les ingrédients afin d'obtenir une boisson homogène. On peut ensuite la transvaser dans un bidon ou une flasque pour la consommer facilement pendant l'épreuve.

En fonction des conditions climatiques on pourra modifier la concentration de la boisson. En effet on pourra la diluer un peu plus lors de fortes chaleurs, les apports seront ainsi comblés avec non pas 500 ml mais 750 ml afin de pallier la perte hydrique supplémentaire (61) (64).

Tableau 9 : Apport Nutritionnel de la boisson d'effort

| Analyse moyenne  | 500ml de boisson énergétique | % VNR |
|------------------|------------------------------|-------|
| Énergie (kcal)   | 139                          |       |
| Protéines (g)    | 0,8                          |       |
| Lipides (g)      | 0,3                          |       |
| Glucides (g)     | 32,5                         |       |
| dont sucres (g)  | 12,3                         |       |
| Magnésium (mg)   | 105,8                        | 29 %  |
| Calcium (mg)     | 24,9                         | 3 %   |
| Phosphore (mg)   | 19,3                         | 3 %   |
| Potassium (mg)   | 319,5                        | 16 %  |
| Sodium (mg)      | 287,2                        |       |
| Fer (mg)         | 0,3                          | 2 %   |
| Zinc (mg)        | 0,1                          | 1 %   |
| Cuivre (mg)      | 0,1                          | 4 %   |
| Manganèse (mg)   | 0,3                          | 14 %  |
| Iode (µg)        | 0,8                          | 1 %   |
| Vitamine C (mg)  | 9,3                          | 12 %  |
| Vitamine B1 (mg) | 0,1                          | 4 %   |
| Vitamine B2 (mg) | 0,1                          | 7 %   |
| Vitamine B3 (mg) | 0,1                          | 1 %   |
| Vitamine B5 (mg) | 0,1                          | 1 %   |
| Vitamine B6 (mg) | 0,1                          | 4 %   |
| Vitamine B9 (mg) | 4,7                          | 2 %   |

VNR : valeur nutritionnelle recommandée

## 2. Le gel énergétique

Pour compléter les apports de la boisson énergétique, le gel énergétique est une très bonne option car très facile à ingérer. Il faudra cependant veiller à une bonne hydratation afin d'éviter les soucis digestifs. La combinaison du gel d'aloé vera, de teinture mère de propolis et de gelée royale va posséder une activité antioxydante et va stimuler l'organisme afin de limiter la fatigue physique et cérébrale ainsi que les défenses immunitaires (Tableau 10).

Pour ce faire, il nous faudra :

- 30 g de miel
- 30 g de sirop d'agave
- 40 ml de jus d'orange pressé
- 1 cuillère à soupe de curcuma
- 1 cuillère à soupe d'huile de tournesol
- 4 pincées de fleur de sel
- 2 gouttes d'essence de citron pour le goût
- 1 cuillère à soupe de gel d'aloé vera
- 2 gouttes de teinture mère de propolis
- 1 cuillère à café de gelée royale

Comme pour la boisson, il suffit de bien tout mélanger pour obtenir un gel homogène. On peut modifier la viscosité du gel à la hausse en augmentant la quantité d'aloé vera ou à la baisse en la diminuant. On transvasera ensuite le gel dans des petites fioles ou une petite flasque. Un gel représentant environ 25 g, cela correspond à 1/4 de la préparation (61) (65).

Tableau 10 : Apport Nutritionnel du gel énergétique

| Analyse moyenne | Pour un gel énergétique de 25g | % VNR |
|-----------------|--------------------------------|-------|
| Énergie (kcal)  | 64                             |       |
| Protéines (g)   | 0,1                            |       |
| Lipides (g)     | 1,3                            |       |
| Glucides (g)    | 12,9                           |       |

|                  |      |       |
|------------------|------|-------|
| dont sucres (g)  | 12,1 |       |
| Magnésium (mg)   | 2,7  | 1 %   |
| Calcium (mg)     | 2,1  | 0 %   |
| Phosphore (mg)   | 2,1  | 0 %   |
| Potassium (mg)   | 25,5 | 1 %   |
| Sodium (mg)      | 94,9 |       |
| Fer (mg)         | 0    |       |
| Zinc (mg)        | 0    |       |
| Cuivre (mg)      | 0    |       |
| Manganèse (mg)   | 0    |       |
| Iode (µg)        | 0,2  |       |
| Sélénium (µg)    | 0,1  |       |
| Vitamine C (mg)  | 5,3  | 7 %   |
| Vitamine E (mg)  | 0,7  | 6 %   |
| Vitamine D (µg)  | 0    |       |
| Vitamine B1 (mg) | 0    |       |
| Vitamine B2 (mg) | 0    |       |
| Vitamine B3 (mg) | 0    |       |
| Vitamine B5 (mg) | 0    |       |
| Vitamine B6 (mg) | 0    |       |
| Vitamine B9 (mg) | 3,2  | 3,2 % |

*VNR : valeur nutritionnelle recommandée*

### 3. La barre énergétique

Pour terminer, la barre énergétique garde une place de choix dans l'alimentation du sportif car elle permet d'apporter une alimentation solide avec des goûts très variés pour ne pas être écœuré. La barre énergétique demande un effort de mastication afin d'éviter les problèmes digestifs et ne sera donc pas adaptée aux épreuves de moins de 2 heures où les gels et la boisson seront suffisants. Elle est donc privilégiée chez les sportifs de longue distance que ce soit l'ultra-trail ou l'Ironman, en passant par les épreuves sur routes comme les 100 km ou les 24 h. Elle présente également d'autres avantages car, en plus de l'apport énergétique par les glucides, la barre énergétique va pouvoir apporter des protéines pour apporter un soutien continu aux muscles (Tableau 11).

Pour ce faire, il nous faudra :

- 50 g d'amandes
- 100 g de noix de cajou
- 50 g de pistaches
- 100 g de dattes séchées dénoyautées
- 2 cuillères à soupe de cacao 100 % en poudre
- 2 cuillères à soupe d'éclats de fèves de cacao
- 2 cuillères à soupe d'huile de coco
- 1 cuillère à soupe de gingembre en poudre
- 1 cuillère à soupe d'écorce de citron en poudre
- 4 pincées de fleur de sel

Pour préparer environ 6 barres il faudra simplement mixer tous les ingrédients ensemble afin d'obtenir une pâte collante avec quelques petits morceaux qui persiste. Ensuite on étale et on compacte la pâte entre 2 papiers sulfurisés. On laisse reposer au réfrigérateur pendant environ 12 heures avant de découper les barres.

Il est possible de varier les plaisirs en ajoutant par exemple des pépites de chocolat, du riz soufflé ou autres plaisirs sucrés (61) (66).

Tableau 11 : Apport Nutritionnel de la barre énergétique

| Analyse moyenne | Par barre énergétique de 60 g | % VNR |
|-----------------|-------------------------------|-------|
| Énergie (kcal)  | 158                           |       |
| Protéines (g)   | 3,7                           |       |

|                  |       |        |
|------------------|-------|--------|
| Lipides (g)      | 12    |        |
| Glucides (g)     | 6,9   |        |
| dont sucres (g)  | 5,4   |        |
| Magnésium (mg)   | 36,6  | 10 %   |
| Calcium (mg)     | 23,4  | 3 %    |
| Phosphore (mg)   | 77,2  | 11 %   |
| Potassium (mg)   | 171,4 | 8,5 %  |
| Sodium (mg)      | 40,9  |        |
| Fer (mg)         | 0,9   | 6 %    |
| Zinc (mg)        | 0,7   | 7,5 %  |
| Cuivre (mg)      | 0,3   | 26,5 % |
| Manganèse (mg)   | 0,4   | 19 %   |
| Iode (µg)        | 1     | 0,5 %  |
| Sélénium (µg)    | 1,2   | 2 %    |
| Vitamine C (mg)  | 0,2   | 0,5 %  |
| Vitamine E (mg)  | 0,7   | 6 %    |
| Vitamine D (µg)  | 0     |        |
| Vitamine B1 (mg) | 0,1   | 7,5 %  |
| Vitamine B2 (mg) | 0,55  | 5 %    |
| Vitamine B3 (mg) | 0,4   | 3 %    |
| Vitamine B5 (mg) | 0,2   | 3 %    |
| Vitamine B6 (mg) | 0,1   | 7,5 %  |
| Vitamine B9 (mg) | 14,7  | 7 %    |

VNR : valeur nutritionnelle recommandée

### iii. Après

La boisson de récupération est un passage obligé après une épreuve de grande intensité. Elle fait partie des apports qu'il faut amener à l'organisme pour une bonne récupération et elle est donc complémentaire à tous les apports d'avant et de pendant la course.

L'objectif de la boisson de récupération est donc de refaire rapidement les réserves de glycogène, d'aider l'organisme à réparer les lésions musculaires et de rétablir l'équilibre acido-basique de l'organisme. Elle doit donc amener de l'énergie par des glucides, des protéines, mais aussi des vitamines, des minéraux et de l'eau qui auront pu être fortement éliminés par la transpiration (Tableau 12).

De nombreuses références sont disponibles dans le commerce mais nous allons voir ici une recette maison qui permet à moindre coût d'obtenir une boisson de récupération des plus complètes.

Pour ce faire il nous faudra :

- 300 ml de jus de soja pour son apport en protéines
- 150 ml d'eau de coco pour son apport en potassium, sodium et magnésium
- 20 g de maltodextrine pure en poudre pour son apport énergétique sans pour autant augmenter l'osmolarité de la boisson ce qui la rendrait moins digeste
- 1 cuillère à soupe de miel
- 0,5 g de citrate de magnésium pour son pouvoir de tampon qui va ainsi rétablir l'équilibre acido-basique
- 1 cuillère à soupe de curcuma pour ses capacités antioxydantes afin de lutter face au stress oxydatif
- 2 pincées de fleur de sel
- 2 gouttes d'extrait de vanille pour le goût
- Eau : QSP 500ml

La préparation est très simple et peut se conserver quelques jours au réfrigérateur : il faut seulement mixer au Blender tous les ingrédients jusqu'à obtention d'une boisson homogène. On la transvase ensuite dans un contenant pour être facilement transportable et être consommée le plus rapidement possible après l'effort (61) (67).

*Tableau 12 : Apport Nutritionnel de la boisson de récupération*

| Analyse moyenne | 500ml de boisson de récupération | % VNR |
|-----------------|----------------------------------|-------|
|-----------------|----------------------------------|-------|



|                  |       |      |
|------------------|-------|------|
| Énergie (kcal)   | 250   |      |
| Protéines (g)    | 10,7  |      |
| Lipides (g)      | 6,5   |      |
| Glucides (g)     | 34,6  |      |
| dont sucres (g)  | 13,5  |      |
| Magnésium (mg)   | 73,8  | 20 % |
| Calcium (mg)     | 60,9  | 8 %  |
| Phosphore (mg)   | 169,3 | 32 % |
| Potassium (mg)   | 649,5 | 32 % |
| Sodium (mg)      | 360,1 |      |
| Fer (mg)         | 1,5   | 11 % |
| Zinc (mg)        | 1,0   | 10 % |
| Cuivre (mg)      | 0,4   | 37 % |
| Manganèse (mg)   | 0,9   | 43 % |
| Iode (µg)        | 60,8  | 41 % |
| Vitamine C (mg)  | 12,3  | 15 % |
| Vitamine B1 (mg) | 0,1   | 11 % |
| Vitamine B2 (mg) | 0,1   | 9 %  |
| Vitamine B3 (mg) | 0,7   | 4 %  |
| Vitamine B5 (mg) | 0,2   | 4 %  |
| Vitamine B6 (mg) | 0,2   | 11 % |
| Vitamine B9 (mg) | 83    | 42 % |

*VNR : valeur nutritionnelle recommandée*

### c. Entraînement à jeun ?

On parle d'entraînement « à jeun » pour tout entraînement réalisé dans des conditions de réduction de la biodisponibilité du glucose. Cela peut être le matin immédiatement après une nuit de sommeil, mais également le soir s'il n'y a pas eu de collation dans l'après-midi. L'objectif de cet entraînement à jeun est d'augmenter les réponses du corps à l'effort et donc l'efficacité de l'organisme et par conséquent ses performances. Ici il ne sera pas question de réaliser un entraînement à jeun sans quelques précautions et sans compenser ensuite. En effet, l'objectif est bien d'apporter un avantage à l'entraînement mais ceci sans amener trop de fatigue qui serait due à l'absence de nutriments pour compenser la dépense énergétique liée à l'activité physique.

En période de jeûne, le glucagon est présent abondamment ce qui permet la glycolyse. C'est le phénomène à partir duquel le glycogène formera du glucose. Le glucose sera ensuite libéré dans le sang pour être utilisé par tout l'organisme et donc en particulier par les muscles.

Si l'effort dure, une libération des acides gras par les tissus adipeux aura lieu afin d'être utilisés par le foie et ensuite par les muscles.

Cependant si le jeûne est trop long, la néoglucogenèse aura lieu à partir d'acides aminés qui vont être puisés dans le muscle, du lactate sera ensuite produit par le muscle et du glycérol sera libéré par les tissus adipeux. Or les acides aminés sont issus de la protéolyse des protéines musculaires ce qui est donc délétère et entraîne une fonte musculaire et donc par la suite une baisse des performances associée à une fatigue intense.

Il faut donc rester vigilant avec l'entraînement à jeun et le réserver aux athlètes entraînés avec une bonne tolérance à l'hypoglycémie.

La phase de récupération qui suit l'entraînement à jeun est très importante et nécessite un apport glucidique et protidique rapide afin éviter la fonte musculaire.

## Conclusion

En plein essor, les sports d'endurance répondent aux envies d'exploration de ses limites et de dépassement. Ces différents défis ne se font pas du jour au lendemain et devront donc être préparés afin d'éviter désillusion ou blessure.

L'entraînement régulier et bien structuré augmentera les performances de l'athlète. Pour perfectionner sa préparation, il trouvera ici des conseils sur l'optimisation de sa nutrition, tout d'abord en ayant une alimentation équilibrée conforme aux différentes préconisations des organismes gouvernementaux. Par la suite sa nutrition sera à adapter en fonction de ses objectifs (perte ou prise de poids) afin d'optimiser sa composition corporelle.

Les compléments alimentaires ne sont en aucun cas un passage obligé, étant donné qu'une bonne alimentation de base permet de subvenir à tous les besoins. Les quelques recettes proposées permettent de faciliter l'absorption des nutriments autour d'une compétition ou d'une période de préparation intensive.

L'alimentation joue donc un rôle primordial toute l'année. Que ce soit pendant la préparation de l'objectif afin d'avoir l'énergie nécessaire au quotidien pour un entraînement de qualité, mais également les quelques jours précédents afin d'avoir le carburant nécessaire pour réaliser la performance escomptée. Pendant l'épreuve le but sera de maintenir un haut niveau d'apport afin d'éviter la « panne sèche » comme le « mur du marathon » tout en évitant les désagréments digestifs d'où l'intérêt de tester sa nutrition à l'entraînement. Enfin, à la fin de l'épreuve l'objectif sera de restaurer les stocks et réparer les lésions musculaires afin de pouvoir repartir vers de nouveaux objectifs.



## Bibliographie

- 1 : INJEP et ministère des Sports (CRÉDOC), Baromètre national des pratiques sportives 2018, Paris, INJEP Notes et rapports/Rapport d'étude, 2018, pp. 8-9
- 2 : Vincent Massardier, Howard Vasquez, Les stratégies d'organisation des courses « Hors stade » : un enjeu clé pour le développement du running, 2019
- 3 : K. J. Ellis, « Human Body Composition: In Vivo Methods », *Physiol. Rev.*, vol. 80, no 2, p. 649-680, janv. 2000
- 4 : J. Brožek, « Body composition: Models and estimation equations », *Am. J. Phys. Anthropol.*, vol. 24, no2, p. 239-246, mars 1966hi
- 5 : A. Coin et al., « Fat-free mass and fat mass reference values by dual-energy Xray absorptiometry (DEXA) in a 20–80 year-old Italian population », *Clin. Nutr.*, vol. 27, no 1, p. 87-94, févr. 2008
- 6 : McArdle W., K. F., et K. V., *Physiologie de l'activité physique - Energie, nutrition et performance*, 4e édition. Maloine/Edisem, 2001
- 7 : VERNON, THIERRY. s. d. « PHYSIOLOGIE DE L'EXERCICE ». [http://t.verson.free.fr/PHYSIOLOGIE/PHYSIOLOGIE\\_EXERCICE/PHYSIOEXERC.htm#\\_Toc423500230](http://t.verson.free.fr/PHYSIOLOGIE/PHYSIOLOGIE_EXERCICE/PHYSIOEXERC.htm#_Toc423500230).
- 8 : SZTARK, F., J.F. PAYEN, V. PIRIOU, M. RIGOLET, R. VENTURA-CLAPIER, J.P. MAZAT, X. LEVERVE, ET G. JANVIER., *Cellular energetic metabolism: physiological and pathological aspects*, 1999
- 9 : MILLET, GUILLAUME, ET STEPHANE PERREY. *Physiologie de l'exercice musculaire. L'essentiel en sciences du sport*. Ellipses, 2004
- 10 : GRENIER, J.G., F. HINTZY, F. ANTICHAN, ET N. COULMY. *Energy expenditure and respective implications of the lactic and aerobic sources over a giant slalom in young ski racers*, 2013
- 11 : Dictionnaire Larousse, <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/endurance/29402>, 2023
- 12 : ANSES, <https://www.anses.fr/fr/content/dispositif-national-denutrivigilance>
- 13 : POTIER de COURCY G., FRELUT ML., et FRICKER J., *Besoins nutritionnels et apports conseillés pour la satisfaction de ces besoins.*, vol. Encyclopédie médico-chirurgicale, Endocrinologie-Nutrition.
- 14 : X. BIGARD et Y. GUEZENNEC, *Nutrition Du Sportif.*, 2ème édition. Paris : Masson, 2007.
- 15 : Gouvernement, [https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/pnns4\\_2019-2023.pdf](https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/pnns4_2019-2023.pdf), 2019
- 16 : RITZ PATRICK, ET CHARLES COUET. « La dépense énergétique ». *Cahiers de Nutrition et de Diététique* 40, 2005.

- 17 : RICHARD, RUDDY, Sports nutrition, macronutrient intake according to the type of sport, 2014
- 18 : LEHNINGER, ALBERT, Biochimie. Paris: Flammarion Médecine, 1994
- 19 : ANCELLIN, RAPHAËLLE, « Rapport glucides et santé : état des lieux, évaluation et recommandations », AFSSA, 2004
- 20 : LE PAGE, CHRISTINE, Physiologie de l'exercice physique, entraînement et santé. Objectif Staps. Ellipses, 2016
- 21 : BOUTONNIER, JEAN-LUC, « Glucides et alimentation : aspects physiologiques, nutritionnels et sanitaires » <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/filierede-production-produits-d-origine-vegetale-42433210/glucides-et-alimentation-aspectsphysiologiques-nutritionnels-et-sanitaires-f6153/>, 2016.
- 22 : BUCCI, DIEGO, JUAN ENRIQUE RODRIGUEZ-GIL, CLAUDIA VALLORANI, MARCELLA SPINACI, GIOVANNA GALEATI, ET CARLO TAMANINI, « GLUTs and Mammalian Sperm Metabolism ». Journal of Andrology 32, 2011
- 23 : TOUITOU, « Biochimie : structure des glucides et lipides - Niveau PAES ». <http://www.chups.iussieu.fr/polys/biochimie/SGLbioch/index.html>, 2006
- 24 : KUHN, FABRICE, ET HUGUES DANIEL, Nutrition de l'endurance - Les secrets pour booster vos performances, Vergèze: Thierry Souccar, 2012
- 25 : COLETTE, C., ET L. MONNIER, Fatty acids: Classification, function and balance between the different families », Médecine des maladies métaboliques 5, 2011
- 26 : LEGRAND PHILIPPE, Les acides gras : structures, fonctions, apports nutritionnels conseillés, Cahiers de Nutrition et de Diététique 42, 2007
- 27 : THOMSON et al., Intestinal aspect of lipid absorption, Canadian Journal of Physiology and Pharmacology 67, 1989
- 28 : E. BRUNET-GUEDJE, B. MOYEN, et J. GENETY, Médecine du sport, 6e édition. Paris: Masson, 2000.
- 29 : MATON FREDERIC, Vitamine B1 (thiamine), IRBMS, <https://www.irbms.com/vitamine-b1-thiamine-sport/>, 2008
- 30 : MATON FREDERIC, Vitamine B2 (riboflavine), IRBMS, <https://www.irbms.com/vitamine-b2-riboflavine-sport/>, 2008
- 31 : MATON FREDERIC, Vitamine B3-PP (niacine), IRBMS, <https://www.irbms.com/vitamine-b3-pp-niacine-sport/>, 2008
- 32 : MATON FREDERIC, Vitamine B5 (acide pantothenique), IRBMS, <https://www.irbms.com/vitamine-b5-acide-pantothenique-sport/>, 2008

- 33 : MATON FREDERIC, Vitamine B6 (pyridoxine, pyridoxal, pyridoxamine), IRBMS, <https://www.irbms.com/vitamine-b6-pyridoxine-sport/> , 2008
- 34 : MATON FREDERIC, Vitamine B8 Biotine carence et sources alimentaire, IRBMS, <https://www.irbms.com/vitamine-b8-biotine-sport/> , 2018
- 35 : MATON FREDERIC, Vitamine B9 (folate, acide folique), IRBMS, <https://www.irbms.com/folates-vitamine-b9/> , 2015
- 36 : MATON FREDERIC, Vitamine B12 (cobalamine), IRBMS, <https://www.irbms.com/vitamine-b1-cobalamine-sport/> , 2008
- 37 : MATON FREDERIC, Vitamine C (acide ascorbique), IRBMS, <https://www.irbms.com/vitamine-c-acide-ascorbique-sport/> , 2018
- 38 : MATON FREDERIC, Vitamine A (rétinol), IRBMS, <https://www.irbms.com/vitamine-a-retinol-sport/> , 2008
- 39 : MATON FREDERIC, Vitamine D le bon dosage pour éviter les carences, IRBMS, <https://www.irbms.com/vitamine-d-cholecalciferol-sport/> , 2018
- 40 : MATON FREDERIC, Vitamine E (tocopherols), IRBMS, <https://www.irbms.com/vitamine-e-tocopherols-sport/> , 2015
- 41 : BACQUAERT PATRICK, Vitamine K (phyolloquinone), IRBMS, <https://www.irbms.com/vitamine-k-phyolloquinone-sport/> , 2008
- 42 : MCCORMACK, G. JAMES, P.H. COOBOLD, Cellular Calcium : A Practical Approach. The Practical Approach Series : 80. Oxford University press, 1991
- 43 : ZAHRA, H., O ; BERRICHE, S. ZAYET, R. MIZOURI, M. KHARI, F. MAHJOUB, H. JAMOUSSE, Le statut en magnésium chez une population de diabétique type 2, La revue de médecine interne 39, 2018.
- 44 : KUHN FABRICE, LORBLANCHER THOMAS, Ultra performance, 2018
- 45 : PALMER, BIFF F., Regulation of Potassium Homeostasis, Clinical Journal Of The American Society Of Nephrology, 2015
- 46 : FRANCOIS GEORGES, AUDIER MARIUS, Le Potassium : aspects physiologique et pathologiques, 1973
- 47 : SWALES, JOHN DOUGLAS, Sodium Metabolism in disease, 1975
- 48 : MASSARO, Habdbook of copper pharmacology and toxicology, 2002
- 49 : GARIA HEJL, C., C. VRIGNAUD, C. GARCIA, CEPPA, Du gène à la maladie : Les Anomalies des Transporteurs du Cuivre, 2009
- 50 : BERNAT IVAN, Iron Metabolism, Pleum Press, 1983
- 51 : MITCHELL, ANDREW J., NOAH P. DUNHAM, RYAN J. MARTINE, A. JONATHAN, A. BERGMAN, CHRISTOPHER J. POLLOCK, KAIHU, BENJAMIN D. ALLEN, ET AL., Visualizing the

Reaction Cycle in an Iron(II)- and 2-(Oxo)-glutarate-Dependent Hydroxylase, Journal of the American Chemical Society 39, 2017

52 : LOGGAH NKOMB, EMMA MARTINE, JEAN-ARMAND MARTIN, La Carence en Fer, 1997

53 : DUCROS V., A. FAVIER, Métabolisme du Sélénium, EMC Endocrinologie 1, 2004

54 : COUSINS R.J., Absorption, transport, and hepatic metabolism of copper and zinc : special reference to metallothionein and ceruloplasmin, Physiological Review 65, 1985

55 : BREWER, GEORGES J., AMANDA SHIVA PRASAD, Zinc

56 : WANG, ZM, P DEURENBERG, W WANG, A PIETROBELLI, RN BAUMGARTNER, ET SB HEYMSFIELD, Hydration of fat-free body mass: new physiological modeling approach, AMERICAN JOURNAL OF PHYSIOLOGY-ENDOCRINOLOGY AND METABOLISM 276, 1999

57 : SAWKA, MICHAEL N., SAMUEL N. CHEUVRONT, ET ROBERT CARTER, Human Water Needs ». *Nutrition Reviews* 63, 2005

58 : JECQUIER ERIC, ET FLORENCE CONSTANT, Pourquoi Faut-Il Boire de L'eau ? Pour Maintenir La Balance Hydrique, Cahiers de Nutrition et de Diététique 44 2009

59 : PHILLIPS, PADDY A., BARBARA J. ROLLS, JOHN G. G. LEDINGHAM, MARY L. FORSLING, JAMES J. MORTON, MORGAN J. CROWE, ET LEOPOLD WOLLNER. Reduced Thirst after Water Deprivation in Healthy Elderly Men, *New England Journal of Medicine* 311, 1984

60 : Nicolas Aubineau Diététique, <https://www.nicolas-aubineau.com/gateau-energetique-sport/>, 2023

61 : Table CIQUAL disponible sur <https://ciqual.anses.fr>

62 : Nicolas Aubineau Diététique, <https://www.nicolas-aubineau.com/boules-energetiques-sport/>, 2023

63 : Nicolas Aubineau Diététique, <https://www.nicolas-aubineau.com/boisson-attente-maison/>, 2023

64 : Nicolas Aubineau Diététique, <https://www.nicolas-aubineau.com/boisson-energetique-maison/>, 2023

65 : Nicolas Aubineau Diététique, <https://www.nicolas-aubineau.com/gel-energetique-maison/>, 2023

66 : Nicolas Aubineau Diététique, <https://www.nicolas-aubineau.com/barre-energetique-maison/>, 2023

67 : Nicolas Aubineau Diététique, <https://www.nicolas-aubineau.com/boisson-de-recuperation-maison/>, 2023



Université de Lille  
FACULTE DE PHARMACIE DE LILLE  
**DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE**  
Année Universitaire 2022/2023

**Nom : Lestavel**

**Prénom : Germain**

**Titre de la thèse : Place de la nutrition dans les sports d'endurance »**

**Mots-clés :** Nutrition, sport d'endurance, physiologie, composition corporelle, filière énergétique, plan nutritionnel, balance nutritionnelle, macronutriments, micronutriments

---

**Résumé :**

En plein essor, les sports d'endurance répondent aux envies d'exploration de ses limites et de dépassement. Ces différents défis ne se font pas du jour au lendemain et devront donc être préparés afin d'éviter désillusion ou blessure.

L'alimentation jouera un rôle important à la fois lors de la préparation, afin d'avoir de l'énergie pour les entraînements et optimiser sa composition corporelle, pendant la compétition afin de maintenir un haut niveau d'énergie, mais également lors des phases de récupération.

Les compléments alimentaires ne sont en aucun cas un passage obligé, étant donné qu'une bonne alimentation de base permet de subvenir à tous les besoins. Les quelques recettes proposées permettent de faciliter l'absorption des nutriments autour d'une compétition ou d'une période de préparation intensive.

---

**Membres du jury :**

**Président :** Anne Muhr-Tailleux, Professeurs des Universités

**Assesseur(s) :** Françoise Martin, Maître de Conférences des Universités

**Membre(s) extérieur(s) :** Bruno Moncomble, Pharmacien d'Officine à Hellemmes-Lille