

CHIMIE ET SPORTS

Éric Bausson

Parties des programmes de physique-chimie associées

- ▶ Programmes de physique-chimie et de mathématiques de première STI2D et terminale STI2D – Partie « Matière et matériaux »
 - ▶ Programmes de Spécialité de physique-chimie pour la santé de première ST2S – Parties « Prévenir et sécuriser » et « Analyser et diagnostiquer »
 - ▶ Programme de spécialité de biologie et physiopathologie humaines de première ST2S – Parties : « Appareil digestif et nutrition : Comment les aliments sont-ils transformés pour être assimilés par l'organisme ? En quoi l'alimentation est-elle un facteur de développement et de santé ? »
 - ▶ Programme de la spécialité physique-chimie de terminale générale – Partie « Constitution et transformations de la matière », 4. Élaborer des stratégies en synthèse organique
- Mots-clés :** matériaux composites – polymères – nutriments – lutte antidopage

INTRODUCTION

Le colloque « Chimie et sports en cette année olympique et paralympique » du 7 février 2024, a permis de faire le point sur quelques aspects liés à la performance sportive dépendant des facteurs physiques, psychologiques et techniques. Le monde de la recherche est pleinement mobilisé depuis des décennies pour améliorer les matériaux et équipements sportifs qu'il soit amateur ou professionnel. Lancé en 2018 par quinze grandes écoles et regroupant 60 chercheurs, le programme de recherche Sciences2024® s'est mis au service des équipes de France en vue des Jeux Olympiques et Paralympiques de Paris 2024. Mais tout ceci ne se limite pas aux matériels du sportif, car notre corps est une « véritable usine chimique mobile » dans laquelle les relations entre la performance sportive, la biologie et la santé sont étroites. Mais si la chimie de notre corps peut apporter le meilleur, certains excès peuvent apporter le pire et la traque aux molécules dopantes ou simplement nocives est un défi permanent...



LA CHIMIE DANS L'ALIMENTATION DU SPORTIF... ET DE TOUS !

Les besoins en eau et en nutriments sont quotidiens pour tout être humain et ceux-ci sont bien entendu plus importants pour les sportifs de haut niveau en quête de performances.

Les nutriments sont regroupés en deux catégories : les macronutriments (protides, glucides, lipides) et les micronutriments (vitamines et oligoéléments) (Figures 1 et 2). Les apports se font essentiellement avec notre alimentation.

Que nous soyons sportifs ou non, il est utile d'avoir quelques points de repère pour s'assurer d'avoir une alimentation saine et équilibrée.

Groupes d'aliments (PNNS 2001)	Sous-groupes établis	Exemples d'aliments	Groupes actualisés
Fruits et légumes	Fruits frais	Pommes, bananes, oranges	Fruits et légumes
	Fruits secs	Abricots secs, pruneaux	
	Fruits transformés	Compotes, fruits au sirop	
	Légumes	Courgettes, carottes, tomates, haricots verts, maïs doux, petit-pois	
	Oléagineux	Noix, amandes	
Féculents : Pains, céréales, pommes de terre et légumes secs	Pain et produits de panification complets	Pain et biscottes complets	Féculents
	Pain et produits de panification raffinés	Pain et biscottes blancs	
	Produits à base d'amidon, transformés sucrés/gras	Céréales de petit-déjeuner	
	Produits à base d'amidon, transformés salés/gras	Frites, biscuits apéritifs	
	Autres féculents complets	Riz complet, blé complet	
	Autres féculents raffinés	Riz, pâtes, pomme de terre bouillies	
	Légumineuses	Lentilles, pois chiches, fèves	Légumineuses
Viandes et volailles, produits de la pêche, œufs	Charcuterie	Saucisse, jambon, pâtés	Viandes et charcuteries, produits de la pêche, œufs (VPO)
	Œufs	Œufs	
	Poissons gras	Saumon, maquereau, sardine, hareng	
	Autres poissons, mollusques et crustacés	Cabillaud, bar, dorade, moules, crevettes	
	Viande hors volaille	Bœuf, veau, porc, mouton, agneau, cheval, abats, gibier	
	Volaille	Poulet, canard	
Lait et produits laitiers	Desserts sucrés lactés	Crèmes dessert, crèmes glacées	Lait et produits laitiers
	Fromages	Fromages à pâte molle, pressée	
	Lait	Lait demi-écrémé, lait entier	
	Produits laitiers frais nature	Yaourts nature, fromages blancs	
	Produits laitiers frais sucrés	Yaourts sucrés	
Matières grasses ajoutées	Beurre et beurres allégés	Beurre	Matières grasses ajoutées
	Huiles végétales riches ALA	Huile de colza, de noix	
	Huiles végétales pauvres en ALA et margarines	Huile de tournesol, huile d'olive	
	Sauces, crèmes fraîches et condiments	Mayonnaise, ketchup, crème fraîche	
Produits sucrés	Produits sucrés ou sucrés et gras	Confiture, viennoiseries, biscuits, pâtisseries	Produits sucrés ou sucrés et gras
Boissons	Eau de boisson	Eau	Eau
	Boissons sucrées de type soda	Sodas, limonade	Boissons sucrées
	Jus de fruits	Jus d'orange	
Sel	Sel	Sel	Sel





Source : ANSES 2017






Figure 1. Groupes et sous-groupes d'aliments.

Une base de repères valable pour tous

- Réduire considérablement la consommation de charcuterie (jambon, saucisson, saucisse, pâté...) < 25 g/j
- Maîtriser la consommation de viande hors volaille (bœuf, porc, agneau...) < 500 g/sem.
- Consommer moins de 1 verre /j de boissons sucrées (soda, jus de fruits)

- Renforcer la consommation de fruits et légumes en privilégiant les légumes;
- Consommer 2 X/sem du poisson dont un poisson gras (Ex: sardine, maquereau);
- Consommer régulièrement des légumineuses (Ex: lentilles, fèves ou pois chiches);
- Privilégier les produits céréaliers complets (Ex: pain, pâtes et riz complets);
- Privilégier la consommation d'huiles végétales riches en acide alpha-linolénique (Ex: huiles de colza et de noix) et huile d'olive (riche en GMI).

AVIS et RAPPORT de l'Anses relatifs à l'Actualisation des repères du PNNS: Révision des repères de consommations alimentaires – Anses (2017)

Figure 2. ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) : les références nutritionnelles en vitamines et minéraux.

Mais il faut être vigilant, qui plus est quand il s'agit d'un athlète, car il faut avoir en tête que des micronutriments, composés minéraux et organiques nécessaires aux réactions fondamentales du métabolisme cellulaire, ne sont pas tous synthétisés par le corps humain ou en quantité suffisante. Il faut donc qu'ils soient apportés par l'alimentation. Parmi eux, nous pouvons citer les vitamines hydrosolubles (B1, B6, B9, B12, C), liposolubles (A, E, D) et les oligoéléments (fer, zinc, cuivre, sélénium). Cependant tout n'est pas si simple, car si une carence est bien sûr néfaste pour la performance, un excès en micronutriments peut être tout aussi dangereux pour la santé ! Les apports journaliers recommandés (AJR) et les limites de sécurité (LSS) sont des repères pour éviter l'apparition de carences ou d'excès en micronutriments.

Prenons l'exemple de la vitamine D qui participe au maintien de certaines caractéristiques physiologiques liées au calcium et au phosphore et à la minéralisation des os, cartilages et dents tout au long de la vie. Pour un homme ou une femme de plus de dix-huit ans, il faudrait en moyenne en consommer quotidiennement 15 µg sans dépasser 100 µg¹.

Focus sur la dépense énergétique journalière

Les dépenses énergétiques sont composées de trois facteurs :

- **La dépense énergétique minimale** (aussi appelée « métabolisme de base »). Il s'agit de la dépense minimum nécessaire à notre organisme pour faire fonctionner les organes au repos. Elle correspond aux deux tiers de la dépense énergétique quotidienne.
- **L'effet thermique des aliments** correspond à l'énergie nécessaire à la transformation des aliments (pour fabriquer du muscle par exemple). Cela correspond à 10 % de la dépense énergétique quotidienne.
- **Les dépenses liées à l'activité physique.**

La relation de Harris et Bénédic, améliorée en 1984 par Roza et Shizgal, permet d'estimer la dépense énergétique quotidienne minimale, le métabolisme de base (MB), permettant aux organes d'un individu de fonctionner.

Cette relation tient compte des facteurs influençant cette valeur, à savoir l'âge, la masse, la taille et le sexe de l'individu :

$$\text{pour une femme : } MB_{\text{femme}} = 9,740 \times M + 172,9 \times T - 4,737 \times A + 667,051$$

$$\text{pour un homme : } MB_{\text{homme}} = 13,707 \times M + 492,3 \times T - 6,673 \times A + 77,607$$

avec MB : métabolisme de base en kilocalories (kcal), M : masse en kilogramme (kg), T : taille en mètre (m) et A : âge en année.

Le métabolisme de base pour un homme de 20 ans, mesurant 1,80 m et pesant 70 kg est d'environ 1 500 kcal par jour et 1 300 kcal par jour pour celui d'une femme de 20 ans, mesurant 1,65 m et pesant 60 kg.

Pour l'énergie, nous utilisons soit la calorie (cal), soit le joule (J), cette dernière étant l'unité officielle. Pour passer de l'une à l'autre, voici les correspondances :

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J} \text{ et } 1 \text{ 000 J} = 239 \text{ cal} \text{ sachant que } 1 \text{ kcal} = 1000 \text{ cal} \text{ et } 1 \text{ kJ} = 1000 \text{ J}$$

Suivant l'activité quotidienne de l'individu, sa dépense énergétique journalière se calcule en multipliant son métabolisme de base (MB) par un facteur, variant suivant l'intensité de l'activité physique.

	Facteur multiplicatif en tenant compte de l'intensité de l'activité physique			
	nulle	légère	moyenne	intense
Dépense énergétique journalière	1,3 × MB	1,5 × MB	1,7 × MB	2,2 × MB

1. Source : SFP HAS SFR – J.-B. Fron.

Le recours aux compléments alimentaires contenant de la vitamine D peut donc exposer à des apports trop élevés et provoquer un taux trop important de calcium dans le sang, entraînant la calcification de certains tissus, et des conséquences cardiologiques et rénales inquiétantes. Comme le souligne l'Association française pour l'information scientifique, si l'engouement actuel pour les antioxydants est réel, leurs effets « de santé spectaculaire » fondés sur des preuves scientifiques n'ont pas été prouvés.

Une prévention micro-nutritionnelle peut se justifier de façon temporaire en utilisant des compléments alimentaires (source concentrée d'un ou plusieurs nutriments devant être pris en unités mesurées de faible quantité d'après le décret 2006-352). Mais rien ne vaut une alimentation variée, saine et équilibrée, que ce soit pour un sportif ou pour le commun des mortels qui doit pratiquer de l'exercice physique !

LA CHIMIE DANS LE SPORT... TOUT N'EST PAS PERMIS !

Comme nous venons de le voir, l'alimentation du sportif est un des éléments clés de sa performance. Mais fort heureusement tout n'est pas permis pour un sportif. Certaines substances, permettant d'augmenter la masse musculaire ou d'abaisser la masse grasse, sont interdites dans les compléments alimentaires sous peine que l'athlète ou le para-athlète soit positif à un contrôle antidopage (Figure 3).

Substances visant la diminution de la masse grasse		
Substances non interdites		Substances interdites
	L-carnitine	clenbutérol éphédrine et analogues (pseudoéphédrine et phénylpropanolamine) sibutramine 1,3-diméthylamylamine (DMAA) 2,4-dinitrophénol (2,4-DNP)
	choline	
	2-phényléthylamine (PEA)	
extraits de plantes	<i>Cissus quadrangularis</i>	
	<i>Coleus forskohlii</i>	
	<i>Garcinia cambogia</i>	
	<i>Magnolia officinalis</i>	
Substances d'origine végétale	évodiamine	
	caféine	
	théobromine	
	<i>p</i> -synéphrine	
	cétone de framboise	

Substances visant l'augmentation de la masse musculaire		
Substances non interdites		Substances interdites
	protéines*	stéroïdes anabolisants androgènes clenbutérol
acides aminés	acides aminés à chaîne ramifiée	
	glutamine	
	β -hydroxy- β -méthylbutyrate (HMB) et α -cétosocaproate	
	L-tyrosine	
	β -alanine	
	arginine	
	créatine*	
extraits de plantes	<i>Tribulus terrestris</i> plantes du genre <i>Smilax</i>	
minéraux	vanadium	
	chrome (picolinate)	

* allégations validées par l'EFSA relatives à la masse musculaire ou la capacité physique

Figure 3. Substances permettant de faire varier la masse musculaire.

Mais ces substances interdites sont nombreuses et ne se limitent pas à celles pouvant se trouver dans un régime alimentaire. On les trouve également dans des compléments alimentaires, médicaments, etc.

L'actualité récente ou passée dans la lutte contre le dopage a montré que des médicaments ont été détournés de leur usage curatif pour accroître illégalement les performances sportives. Par exemple, l'EPO (érythropoïétine) est une hormone stimulant la fabrication de globules rouges, indispensables pour

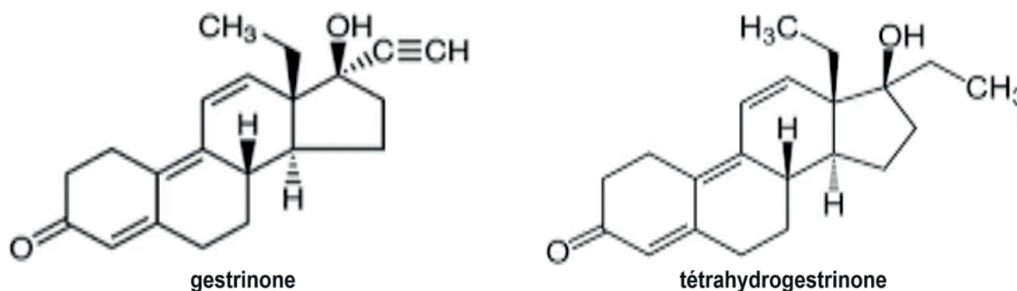
le transport du dioxygène dans le sang. L'EPO est produite naturellement par le rein et le foie, mais peut être aussi synthétisée artificiellement pour produire des médicaments pour le traitement de l'anémie. Son taux est donc contrôlé pour s'assurer que sa présence n'est due qu'à sa production endogène (générée par le corps humain) et non exogène (hors du corps humain).

Chaque année, l'agence mondiale antidopage (AMA) actualise la liste des produits dopants, pour lesquels des seuils ne doivent pas être dépassés sous peine d'être déclaré(e) positif(ve). Actuellement, cette liste contient près de 750 molécules interdites.

Les analyses des fluides des athlètes (urine et sang) sont effectuées par des laboratoires accrédités par l'AMA, soit avec le couplage chromatographie liquide ou gazeuse / spectrométrie de masse, soit avec des analyses immunologiques comme celles que nous effectuons dans un laboratoire d'analyses biologiques.

Mais certaines personnes malintentionnées n'hésitent pas à modifier légèrement la structure moléculaire d'une substance interdite en substituant un groupement par un autre sans en changer les propriétés dopantes. Cela a pour effet de la rendre indétectable en raison d'une légère variation de la masse et/ou d'une dégradation lors des analyses.

Par exemple, la gestrinone, un stéroïde anabolisant interdit, avait été remplacée par la tétrahydrogestrinone, molécule instable à haute température, ce qui la rendait indétectable lors des analyses d'urine. Pour cette raison, bon nombre d'athlètes l'avaient absorbée. Il a fallu mettre au point un protocole rigoureux pour la détecter et un grand nombre d'athlètes ont été déchus de leurs titres plus tard et sanctionnés !



D'autres scandales peuvent survenir à tout instant, car les échantillons sont conservés dix ans et la liste des produits dopants détectables augmente au fil du temps. Par exemple, après les Jeux olympiques de Londres, en 2012, 73 nouveaux cas de dopage avaient été découverts après réanalyse des échantillons dans les dix années qui ont suivi.

Récemment, des passeports biologiques pour les athlètes de très haut niveau ont été mis en place pour suivre les taux de diverses substances et alerter les fédérations si ceux-ci sont anormaux. Les sportifs inclus dans le programme du passeport biologique sont soumis aux contrôles suivants, menés en compétition, durant la période précédant les épreuves et hors compétition :

- ▶ des tests sanguins afin d'établir un profil hématologique (concentration de l'hémoglobine, pourcentage de réticulocytes (RET %), etc.),
- ▶ des tests d'urine afin d'établir un profil stéroïdien (testostérone, etc.).

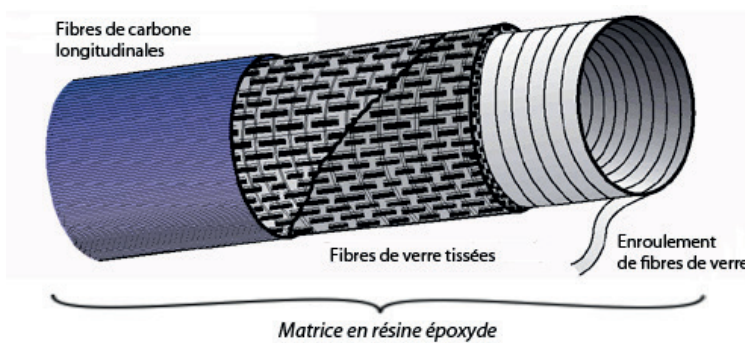
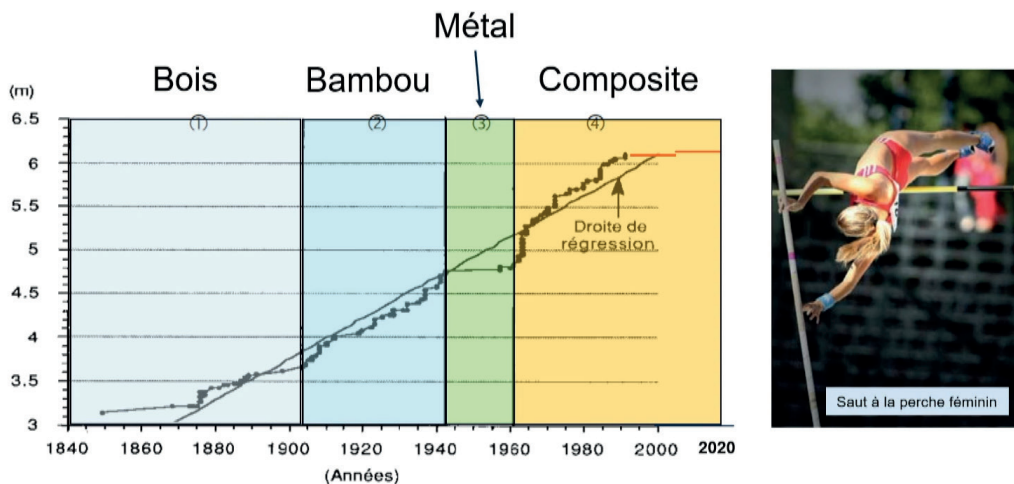
Malheureusement le jeu du chat et de la souris est permanent. Pour essayer de ne pas prendre trop de retard entre la mise sur le marché de nouveaux médicaments (parfois bien avant sur Internet !) et leur détection, les industries pharmaceutiques et les laboratoires d'analyses collaborent pour que les tests de détection sortent avant que les substances ne soient en vente officiellement. Il faut aussi souligner le travail des services de douane pour essayer d'intercepter des substances interdites ou inconnues potentiellement dopantes.

Mais rien n'est simple car des cas de « faux positifs » sont toujours possibles en raison, par exemple, de la consommation de certaines viandes d'animaux dopés ou de l'échange de fluides corporels, principalement la sueur, entre un athlète et une autre personne ayant absorbé la substance illicite.

Aussi, l'intelligence artificielle devrait prendre une place prépondérante à l'avenir car elle permettra sans doute d'analyser plus finement les spectres.

LA CHIMIE ET LES MATERIAUX COMPOSITES DANS LE SPORT

Prenons comme exemple l'évolution des records du saut à la perche en fonction de la composition de la perche au fil du temps (Figure 4)...



Mis à part le métal aluminium qui n'a pas eu d'effet sur le record du monde du saut à la perche, nous remarquons une régression linéaire montrant au fil du temps l'impact positif du matériau utilisé au niveau de la perche sur la hauteur atteinte.

Actuellement, la perche est un matériau composite constitué de diverses matières premières (Figure 5) lui procurant des propriétés recherchées (forte déformation, élasticité complète et résistance importante).

Un matériau composite est constitué de matériaux dont les propriétés individuelles se combinent pour former un matériau hétérogène ayant des performances globales fortement améliorées.

Voici les constituants d'un matériau composite :

Matrice		Renforts		Charges et/ou additifs pour
polymère thermoplastique	+	Fibres	+	apporter ou modifier
ou		Tissus		certaines propriétés
polymère thermodurcissable		Nappes		

Pour les lames de course des athlètes handisports (Figure 6), le matériau composite leur permet de posséder à la fois les qualités de la résine, mais également celles des fibres de carbone, c'est-à-dire qu'elles sont élastiques, légères et assez dures pour ne pas être cassantes.

Figure 6. La française Marie-Amélie Le Fur, après sa victoire à l'épreuve du 400 mètres, aux Jeux paralympiques de Rio, le 12 septembre. © DR Archyde.



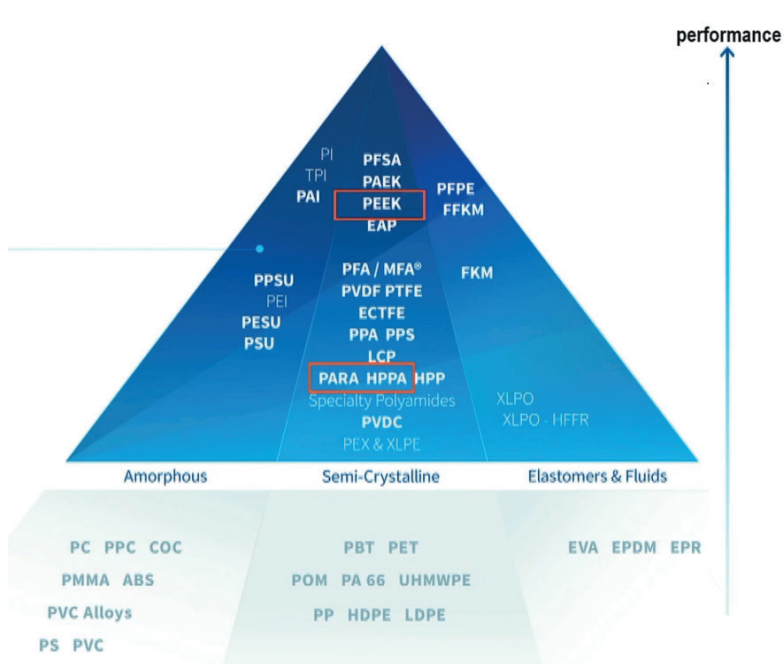
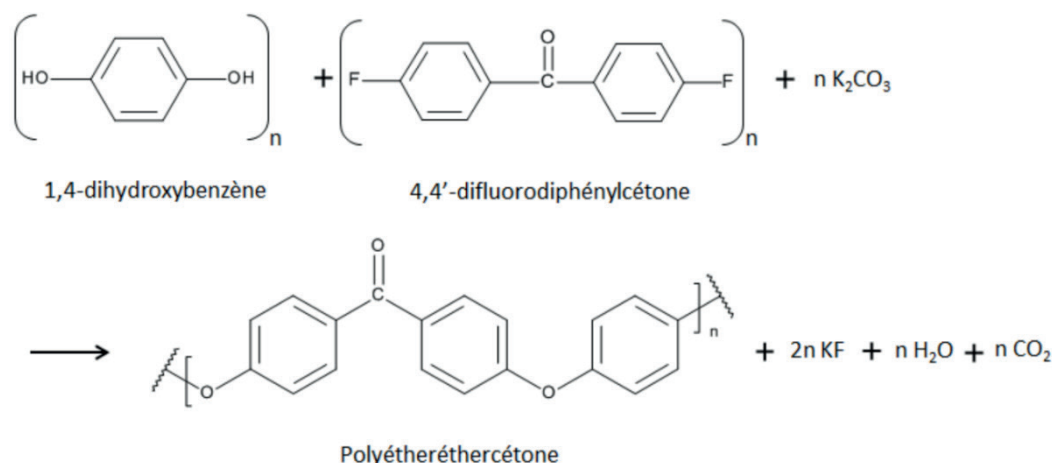


Figure 7. Polymères spéciaux,
source : <https://torlon.site/why-use-torlon/>

Dans les matières premières destinées aux équipements des sportifs, nous trouvons d'autres polymères comme le PEEK (polyétheréthercétone) (Figure 7).

Il est extrudé en plaques, barres et tubes. Les pièces fabriquées à partir du polymère PEEK, thermoplastique haute température, résistent à des températures allant jusqu'à 260 °C et permettent un gain de poids avec des caractéristiques mécaniques élevées et ce, dans les environnements les plus sévères.

Le PEEK est très souvent utilisé pour les cordages des raquettes de tennis des joueurs professionnels. Voici l'équation bilan de la synthèse d'un polyétheréthercétone² :



Nous reconnaissons bien dans les réactifs les fonctions cétone et alcool, et dans le produit d'intérêt les fonctions cétone et éther-oxyde.

CONCLUSION

En 2021, l'adoption d'une nouvelle devise olympique « Plus vite, plus haut, plus fort – ensemble » met l'accent sur les performances et la solidarité. Mais nulle performance n'est possible sans une préparation parfaite de l'athlète et de son équipement. Les sciences y prennent leur part en analysant les problèmes et en essayant de répondre aux questions soulevées par les sportifs et leurs encadrements. La recherche en chimie permet déjà et permettra à l'avenir de mettre au point de nouvelles matières premières et de nouveaux matériaux innovants, mais elle doit aussi veiller à la mise en place de garde-fous pour lutter contre le dopage et protéger la santé des athlètes.

Le colloque « Chimie et sports en cette année olympique et paralympique » a sensibilisé le public aux avancées scientifiques dans le domaine du sport. Il n'a pas été possible d'aborder ici tous les sujets des conférences donc nous vous invitons à voir l'ensemble des vidéos disponibles sur le site www.mediachimie.org.

2. Source : https://www.inrs.fr/publications/bdd/plastiques/polymere.html?refINRS=PLASTIQUES_polymere_43

SOURCES PRINCIPALES

Conférences du colloque « Chimie et sports en cette année olympique et paralympique » du 7 février 2024 :

- ▶ Conférence d'Irène Margaritis – [vidéo] Sport et nutrition : les suppléments, utiles ou pratiques à risque ?
- ▶ Conférence de Michel Audran – [vidéo] Détection du dopage : challenges et perspectives
- ▶ Conférence d'Yves Rémond – [vidéo] Le rôle des matériaux composites dans les performances sportives
- ▶ Conférence de Virginie Couharde Louvel et Philippe Basseur – [vidéo] Matériaux de hautes performances au service du (handi-)sport
- ▶ Travaux de recherches - Saut à la perche : <https://athle-news5.webnode.fr/l/le-role-de-lhistoire-et-de-la-composition-de-la-perche-dans-la-performance2/>

Pour en savoir plus

Sur les recommandations alimentaires de Santé Publique France :

<https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/nutrition-et-activite-physique/documents/depliant-flyer/l-essentiel-des-recommandations-sur-l-alimentation>

Sur les recommandations sur l'alimentation, l'activité physique et la sédentarité :

<https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/nutrition-et-activite-physique/documents/infographie/les-recommandations-sur-l-alimentation-l-activite-physique-et-la-sedentarite-en-un-coup-d-oeil>

Ressources Mediachimie

[vidéos] « Quelle chimie dans le sport ? » — épisodes 1 (Le métabolisme énergétique aérobie) et 2 (Les métabolismes énergétiques anaérobies) — Raphaël Blareau, Blablareau au labo

<https://www.mediachimie.org/ressource/quelle-chimie-dans-le-sport-episode-1-le-metabolisme-energetique-aerobie>

L'ingénierie des réactions chimiques dans l'élaboration des aliments — Gilles Trystam et Catherine Bonazzi

<https://www.mediachimie.org/ressource/l-ingenierie-des-reactions-chimiques-dans-l-elaboration-des-aliments>

[vidéo] La chromatographie en phase gazeuse

<https://www.mediachimie.org/ressource/chromatographie-en-phase-gazeuse-gc-gaz-chromatography>

[vidéo] La chromatographie en phase liquide à haute performance

<https://www.mediachimie.org/ressource/chromatographie-liquide-a-haute-performance-hplc-high-performance-liquid-chromatography>

[vidéo] La spectrométrie de masse

<https://www.mediachimie.org/ressource/spectrom%C3%A9trie-de-masse-ms-mass-spectrometry>

Chimie des matériaux hybrides — Clément Sanchez

<https://www.mediachimie.org/ressource/chimie-des-mat%C3%A9riaux-hybrides>

Matériaux polymères et développement durable — Jean Louis Halary et al., L'Actualité Chimique n° 338-339 (février-mars 2010) p. 41-54

<https://www.mediachimie.org/ressource/mat%C3%A9riaux-polym%C3%A8res-et-d%C3%A9veloppement-durable>

Éric Bausson est professeur de physique-chimie

Comité éditorial : Danièle Olivier, Jean-Claude Bernier, Grégory Syoen