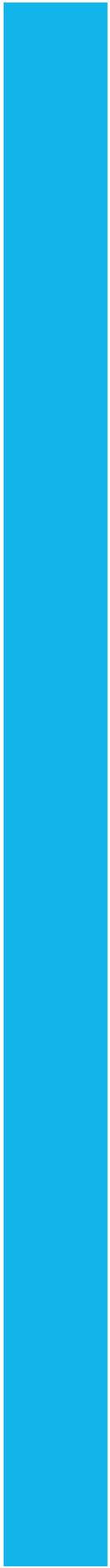


La chimie et le sport





Cet ouvrage est issu du colloque « Chimie et Sport », qui s'est déroulé le 24 mars 2010 à la Maison de la Chimie.



Collection dirigée par Paul Rigny

La chimie et le sport

Alain Berthoz, Jean-François Caron, Marie-Florence Grenier-Loustalot,
Charles-Yannick Guezennec, Pierre Letellier, Claude Lory, Denis Masegla, Nicolas Puget,
Isabelle Queval, Yves Rémond, Fabien Roland, Jean-François Toussaint, Jean-Luc Veuthey

Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin,
Rose Agnès Jacquesy, Danièle Olivier et Paul Rigny



Conception de la maquette intérieure et de la couverture :
Pascal Ferrari

Conception des graphiques : Minh-Thu Dinh-Audouin

Mise en page : E-press (Casablanca)

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-0596-9

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2011

EDP Sciences
17, avenue du Hoggar, P.A. de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Ont contribué à la rédaction de cet ouvrage :

Alain Berthoz

Collège de France

Jean-François Caron

*École des Ponts ParisTech
(ENPC)*

Marie-Florence

Grenier-Loustalot

*Service central d'analyse -
USR 59 / CNRS*

Charles-Yannick Guezennec

*Centre national de rugby
Pôle médecine du sport
de l'Essonne, domaine
de Bellejame*

Pierre Letellier

*Université Pierre et Marie
Curie (Paris VI) - EA 1519
Laboratoire d'énergétique
et réactivité aux interfaces*

Claude Lory

*Agence pour la valorisation
de la recherche universitaire
du Limousin
SOREVI
Département incubateur
ester technopole*

Denis Masseglia

*Comité national olympique
et sportif français*

Nicolas Puget

*Groupe Rossignol
Département recherche
et développement*

Isabelle Queval

*Université Paris Descartes
Faculté des sciences humaines
et sociales - Sorbonne
Centre de recherche sens,
éthique, société -
UMR 8137 / CNRS*

Yves Rémond

*Université Louis Pasteur
Institut de mécanique des
fluides et des solides (IMFS) -
FRE 3240*

Fabien Roland

*Institut privé textile
et chimie textile (ITECH-Lyon) -
Technopôle Diderot*

Jean-François Toussaint

*Institut de recherche
biomédicale et d'épidémiologie
du sport
Hôtel-Dieu*

Jean-Luc Veuthey

*Université Genève-Lausanne
Laboratoire de chimie
analytique*

Équipe éditoriale

**Minh-Thu Dinh-Audouin,
Rose Agnès Jacquesy,
Danièle Olivier
et Paul Rigny**

Vj k' r' ci g' k' p' v' g' p' v' k' q' p' c' m' (' i' g' h' v' d' i' r' e' p' m

Sommaire

Avant-propos : par Paul Rigny	9
Préface : par Bernard Bigot	11
Introduction : La simplicité par Alain Berthoz	17

Partie 1

La quête et les limites de la performance

Chapitre 1 : Optimisation des performances, complexité des systèmes et confrontation aux limites par Jean-François Toussaint	45
Chapitre 2 : La fabrique des surhommes : corps entraîné, corps dopé, corps augmenté par Isabelle Queval	77
Chapitre 3 : Technologie et performance sportive par D'après la conférence de Denis Masseglia	99
Chapitre 4 : Comprendre la physico-chimie par la plongée sous-marine. Comprendre la plongée sous-marine par la physico-chimie par Pierre Letellier	111

Partie 2

Les molécules de la performance

Chapitre 5 : Effets de l'exercice physique et de l'entraînement sur la neurochimie cérébrale : effets sur la performance et la santé mentale par Charles-Yannick Guezennec	137
--	-----

Chapitre 6 : La traque aux molécules dopantes
par **Jean-Luc Veuthey** 157

Chapitre 7 : Les molécules de la performance
par **Marie-Florence Grenier-Loustalot** 177

Partie 3 **Les matériaux de la performance**

Chapitre 8 : Les matériaux composites
dans le sport
par **Yves Rémond et Jean-François Caron** 195

Chapitre 9 : Performance d'un ski de course :
structure composite et glisse sur neige
par **Nicolas Puget** 211

Chapitre 10 : Revêtements complexes antifriction
pour les composants moteurs automobiles.
De la F1 à la grande série
par **Claude Lory** 227

Chapitre 11 : Des textiles pour sportifs.
Apport de la chimie pour améliorer
confort et performances
par **Fabien Roland** 239

Glossaire 255

Crédits photographiques 257

Avant- propos

L'Actualité Chimique veut contribuer à faire connaître à un large public l'impact qu'ont, par leurs résultats, les Sciences Chimiques sur sa vie quotidienne. Dans le même objectif, la Fondation de la Maison de la Chimie organise des colloques et autres manifestations scientifiques qui traitent chaque fois d'un domaine d'application particulier (la mer, la santé, l'art, l'alimentation... et beaucoup d'autres champs qui concernent la vie en société). La rencontre entre ces deux initiatives donne naissance aux ouvrages, confiés à l'éditeur EDP Sciences pour l'édition et la diffusion, « La chimie et... », qui veulent pérenniser les enseignements des colloques. Après les volumes, *La chimie et la mer, ensemble au service de l'homme*, *La chimie et la santé, au service de l'homme*, *La chimie et l'art, le génie au service de l'homme*, *La chimie et l'alimentation, pour le bien-être de l'homme*, c'est aujourd'hui *La chimie et le sport* que vous présente la collection *L'Actualité Chimique – Livres*. Même s'ils veulent faire connaître à un large public les apports multiples et souvent insoupçonnés des Sciences Chimiques

dans nos vies quotidiennes, ces ouvrages demandent à leurs lecteurs de disposer d'une certaine base de culture scientifique, au moins celle d'un baccalauréat scientifique, et pas seulement de la curiosité qui les a conduits à s'en approcher.

S'ils ne sont pas, *stricto sensu*, les comptes rendus des colloques de la Fondation, ces ouvrages en présentent néanmoins les contenus d'une façon fidèle. Les divers chapitres reposent de façon étroite sur les conférences qui y ont été présentées. Un soigneux travail de rédaction, concerté avec les auteurs des conférences, en reprend les messages, en y ajoutant, parfois, des contenus pédagogiques permettant l'accès du plus grand nombre et harmonisant les niveaux de formation nécessaires pour aborder les différents chapitres. Ce travail a été fait par une équipe éditoriale constituée de représentants de la Fondation, de *L'Actualité Chimique* (Société Chimique de France) ainsi que de la Fédération Française pour les sciences de la Chimie qui a travaillé en étroit contact avec les conférenciers du colloque.

Un sondage sur les rapports entre chimie et sport ferait sûrement émerger la difficile et douloureuse question du dopage : « un petit remontant, pourquoi pas ? » mais « le dopage, quelle horreur ! » Sans éluder cette question, le livre fait ressortir des couplages beaucoup plus profonds entre les deux domaines. Le sport, c'est la mobilisation entière du corps, ses muscles, son système nerveux et, bien entendu, sa centrale de commande – le cerveau. Or la compréhension de la biologie en termes de mécanismes chimiques est un domaine majeur des sciences chimiques qui sollicite vivement la recherche. Comprendre la performance sportive, la contrôler, l'améliorer, devient accessible : on le réalisera en lisant ce livre. Mais la chimie, c'est aussi le domaine des matériaux et – la performance sportive rencontre la performance technologique – le monde du sport est toujours à la pointe de l'utilisation des nouveautés. On réalisera, à la lecture de ce livre, à quel point la performance sportive est vraiment celle du couple

« homme/matériel » et à quel point la chimie, dans deux de ses sous-disciplines, est essentielle pour assurer la qualité de ces deux « composantes ».

La pratique du sport – celle des champions, celle du citoyen – est plus que jamais centrale dans nos sociétés. Cet ouvrage fait bien saisir le rôle fondamental de la chimie pour en améliorer les conditions tout en maîtrisant le développement, en évitant les dérives.

Équipe éditoriale :
Minh-Thu Dinh-Audouin,
L'Actualité Chimique – Livres
Rose Agnès Jacquesy,
Fédération Française pour
les sciences de la Chimie (FFC)
Danièle Olivier,
Fondation de la Maison
de la Chimie
Paul Rigny
Rédacteur en chef
L'Actualité Chimique
Directeur de la collection
L'Actualité Chimique – Livres

Préface

La Fondation de la Maison de la Chimie¹ est une Fondation d'utilité publique qui a été créée en 1927 à l'occasion du centenaire de la naissance du grand chimiste français du XIX^e siècle Marcelin Berthelot pour honorer sa mémoire d'homme de science et d'humaniste. Selon ses statuts, elle a pour objet d'œuvrer à la promotion de la Chimie et de faciliter les relations entre les savants, les entrepreneurs et l'ensemble de la société.

À cette fin, elle gère un centre de congrès et de séminaires, la Maison de la Chimie, dans lequel nous organisons depuis trois ans une série de colloques à destination d'un large public, et en particulier des jeunes et de leurs enseignants, afin de faire mieux connaître ce que les concepts, les outils et les applications de la chimie apportent ou pourront apporter dans notre vie quotidienne, et plus largement à la société. Et cela dans l'esprit d'en débattre si les choses doivent être complétées ou ajustées. Nous voulons que ces débats s'appuient scientifiquement sur les meilleures connaissances, les plus actualisées, mais aussi identifient nos ignorances et puissent répondre aux interrogations ou aux inquiétudes des non spécia-

listes. Nous faisons pour cela appel aux meilleurs experts scientifiques, techniques et praticiens du domaine, qu'ils viennent de la sphère publique ou du secteur privé.

Après *La chimie et la mer*, *La chimie et la santé*, *La chimie et l'art*, *La chimie et l'alimentation*, en l'année des Jeux olympiques d'hiver 2010, ce sont les liens qui unissent les sciences et technologies de la chimie et les activités sportives que nous avons voulu explorer.

Le contenu du colloque « Chimie et Sport » du 24 mars 2010 a servi de base à cet ouvrage qui se veut être accessible à tous, en particulier aux jeunes, avec la volonté d'être un outil de vulgarisation et d'actualisation des connaissances ainsi que des innovations du thème concerné.

De tout temps l'homme a recherché à travers le sport l'entretien de sa forme physique, mais aussi son plaisir, son bien-être, bien souvent aussi la connaissance de soi-même et le dépassement de ses limites : toujours plus vite, toujours plus loin, toujours plus haut, toujours plus résistant, toujours plus fort !

Dans le chapitre introductif sur la « complexité », le Professeur Alain Berthoz, académicien et professeur au Collège de France, nous explique par des exemples faisant appel à la perception visuelle, au

1. www.maisondelachimie.com

contrôle du mouvement, au maintien de l'équilibre, comment le sportif peut tirer parti des principes simplificateurs de la perception, du contrôle de l'action, de la prise de décision dans des environnements complexes. **La connaissance de ces principes simplificateurs est fondamentale pour l'apprentissage en matière de sport, mais est aussi importante pour la conception de robots pour la rééducation sensorimotrice.**

La chimie, utilisée selon les procédures prévues, que ce soit la chimie de notre corps ou celle des matériaux de la performance, contribue à repousser les limites du sportif. Mais jusqu'où ira cette recherche de la performance aux limites de l'imaginable ? La question des limites de l'espérance de vie rejoint celle des possibilités physiologiques de l'homme et celle de leur optimisation. Comment vont-elles continuer à évoluer alors qu'elles semblent atteindre leur plafond ? **Les limites de la course entre nos capacités adaptatives stimulées par la science et la technologie pourraient se profiler à brève échéance.** Faudra-t-il accepter les limites de notre évolution alors même que la quête perpétuelle de dépassement est inscrite au cœur du vivant ? **Jean-François Toussaint, directeur de l'Institut de Recherches bioMédicales et d'Épidémiologie du Sport (IRMES) a accepté de faire le point sur ces questions.**

Le sport, et en particulier le sport de haut niveau, vu comme un laboratoire expérimental de la performance humaine, illustre la vision très contemporaine que l'es-

poir d'une bonne santé et d'une longue vie dépend fortement de l'entretien médico-sportif de chacun. L'amélioration de tous les paramètres de la performance, matériaux, matériels, sciences médicales et entraînement, techniques gestuelles, diététique, préparation psychologique et stratégique, est activement recherchée, avec comme déviance le dopage. L'entraînement du champion entre en résonance avec des mœurs qui révèlent le culte contemporain d'un corps indéfiniment perfectible. **La philosophe Isabelle Queval discute dans le chapitre suivant le sens de cette quête à l'aide de la chimie de ce que nous pourrions appeler des surhommes (corps entraînés, corps dopés, corps augmentés) et comment il faut d'emblée accepter de ne pas franchir des limites pour la préservation de sa santé mentale et physique.**

Denis Masegla, président du Comité national olympique français, nous a fait l'honneur et l'amitié de nous faire partager son expérience des milieux sportifs en abordant des questions que nous nous posons tous, notamment quand on voit les performances des derniers Jeux olympiques d'hiver ou d'été. Sachant que la performance sportive dépend de trois paramètres – le physique, le psychologique et le technique – dans quelle mesure la technologie peut-elle améliorer la performance tout en préservant l'intégrité de l'athlète, et cela dans les différents types de sport ? **Dans un contexte où la technologie repousse toujours plus loin les limites de l'humain,**

comment comparer des performances alors que les « équipements » ne sont plus comparables ?

Les progrès technologiques sont cependant contraints de respecter les faits de la nature. **Pierre Letellier, professeur de thermodynamique et aussi professeur de plongée sous-marine, montre que, pour le pratiquant de cette activité de loisir comme pour le plongeur professionnel, la connaissance des lois de la physico-chimie est de fait indispensable à leur sécurité.** Ceci concerne en particuliers les mécanismes d'échanges gazeux entre le plongeur et son environnement, mêlant en fait intimement la chimie, la physico-chimie et la physiologie.

Après ces premiers chapitres généralistes, la suite de cet ouvrage s'organise autour de deux thèmes.

L'un est consacré aux molécules de la performance. Nous y verrons que notre corps lui-même est une usine chimique fascinante au sein de laquelle les relations entre le bien-être, les performances sportives et la santé sont étroites. Ce sera le sujet du chapitre de Charles-Yannick Guezennec du Centre national du rugby de Marcoussis. Il portera sur les effets de l'exercice physique et de l'entraînement sur la neurochimie cérébrale : le rôle de molécules telles que les endorphines, la sérotonine, les monoamines et autres neuro-médiateurs libérés sous l'effet d'un exercice prolongé ou d'un entraînement physique, la notion de bien-être et plus généralement l'amélioration de l'ensemble des fonctions

y sont présentés et discutés. L'ensemble des données souligne la complexité des différents facteurs sur les modifications comportementales et les performances sportives.

Mais si la chimie de notre corps peut apporter le meilleur, ses excès peuvent aussi apporter le pire et « **la traque des molécules dopantes** » est un véritable défi pour les laboratoires antidopage, piliers essentiels de la lutte contre le dopage dans le sport : 150 000 tests sont effectués annuellement dans le monde. **Jean-Luc Veuthey, du laboratoire de chimie analytique de l'université de Genève,** nous montrera que la complexité des matrices testées (sang, urine...), la diversité des composés à tester, le faible niveau de concentration des agents dopants, ont conduit à des stratégies analytiques performantes et ultra-rapides.

Marie-Florence Grenier-Loustalot, qui de nombreuses années a dirigé le service central d'analyse du CNRS, fera le point sur le contrôle antidopage et son évolution, et sur le risque de dopage selon le niveau des sports.

Le second thème est dédié aux matériaux de la performance. La chimie des matériaux de la performance rend le sport plus aisé à pratiquer, plus sûr, plus précis, plus confortable et même plus élégant.

L'utilisation des matériaux composites, associée aux propriétés exceptionnelles de certaines fibres de verre ou de carbone, a constitué une révolution dans la conception des objets technologiques du sport amateur et du sport de compétition.

Yves Rémond, professeur de l'École d'ingénieurs de chimie polymères et matériaux de Strasbourg et Jean-François Caron, Directeur de recherche à l'École des Ponts ParisTech, montrent à partir d'exemples d'applications dans les sports nautiques et dans les sports mécaniques comment une chimie créative et innovante a conduit à l'élaboration de matériaux « intelligents » capables, tout en conservant une grande légèreté, de favoriser la glisse, de dissiper l'énergie des chocs, de résister aux vibrations, de supporter des températures élevées, d'être flexibles ou rigides.

Nicolas Puget, du groupe Rossignol, explique comment des assemblages résultant du collage complexe d'une dizaine de couches différentes permettent de faire reculer les limites élastiques des skis facilitant leur utilisation dans des conditions extrêmes. Il aborde aussi la complexité du phénomène de « la glisse » qui fait simultanément appel à des études de nivologie, de tribologie, de physico-chimie des surfaces, de chimie des matériaux et de physique vibratoire.

Dans un tout autre domaine, celui de la performance automobile, Claude Lory, de l'entreprise SOREVI, explique sur l'exemple des revêtements complexes antifriction pour les composants moteurs de la F1 automobile l'intérêt de réaliser des traitements de surface combinant les avantages de plusieurs matériaux pour « surperformer » leurs propriétés originelles.

La contribution à la performance en même temps qu'au confort est illustrée par Fabien Roland (de l'ITECH Lyon) sur l'exemple des nouveaux textiles pour le sport.

La compression du corps pour augmenter le rendement musculaire et sa récupération après effort, l'état de surface du matériau pour réduire la résistance dans l'air ou dans l'eau : ces fonctionnalités sont recherchées dans les sports d'endurance et de vitesse. Les matériaux imper-respirants, les fibres à hautes performances mécaniques et thermiques ont permis au sportif d'être plus performant dans l'action grâce à un meilleur confort et à une protection accrue.

Ce livre réunit donc les connaissances et les opinions de sportifs de haut niveau, de chimistes, de médecins, de biologistes et d'industriels des équipements de sport, pour faire un point scientifique objectif, au travers de plusieurs exemples soigneusement sélectionnés, sur ce que la chimie apporte et pourra apporter au sportif du XXI^e siècle pour s'accomplir et se dépasser dans le respect et pour le mieux de sa santé mentale et physique.

Je vous en souhaite la meilleure lecture.

Bernard Bigot
Président de la Fondation
Internationale
de la Maison de la Chimie
Administrateur général
du CEA

Introduction

Vj k'ŕ ci g'k'pvgpvkqpcmf 'igh'dŕcpm

La simplicité

Alain Berthoz, académicien, professeur au Collège de France, est un physiologiste mondiallement connu pour ses travaux et ses publications dans le domaine des neurosciences cognitives², en particulier dans l'étude du mouvement (voir bibliographie « Pour en savoir plus »). Il a récemment publié un livre sur la « simplicité ». Il montre les applications de ce concept au sport et le besoin d'encourager les coopérations qui n'existent peut-être pas assez dans ce domaine avec les chimistes et les neuropharmacologues.

Le mot « simplicité » a été utilisé depuis très longtemps mais l'idée est ici que l'évolution a mis en place chez le vivant, face à la complexité du monde et à l'augmentation de la complexité des organismes vivants, des principes simplificateurs.

Ces principes ne sont pas forcément simples et demandent parfois des détours et une certaine complexité dans les mécanismes, mais ils permettent de réaliser des fonctions rapidement et avec une grande efficacité. Il est étonnant de voir que

l'on retrouve aujourd'hui ces principes simplificateurs un peu partout dans l'immense quantité des publications qui décrivent la complexité du vivant, tant au plan génétique, chimique, mécanique et neuronal...

U'EST-CE UE LA SIMPLICITÉ ?

L'évolution a mis en place chez le vivant, face à la complexité du monde et l'augmentation de la complexité des organismes vivants, des « principes simplificateurs ». Ils ne sont pas simples, ils exigent parfois des détours, mais ils permettent de réaliser des fonctions rapidement et avec une grande efficacité. On trouve ces mécanismes « simples » du niveau génétique jusqu'aux fonctions cognitives les plus élevées.

Dans le cadre du sport, on trouve ces principes simplificateurs dans les mécanismes de contrôle du mouvement, les processus de décision, d'anticipation et dans le traitement et la mémoire de l'espace. Cependant, il est aussi nécessaire, à toutes les étapes, de

2. Les neurosciences cognitives sont un domaine de recherche dans lequel sont étudiés les mécanismes neurobiologiques qui sont à la base de la cognition (perception, motricité, langage, raisonnement, émotions...).

La simplicité

Alain Berthoz, académicien, professeur au Collège de France, est un physiologiste mondiallement connu pour ses travaux et ses publications dans le domaine des neurosciences cognitives², en particulier dans l'étude du mouvement (voir bibliographie « Pour en savoir plus »). Il a récemment publié un livre sur la « simplicité ». Il montre les applications de ce concept au sport et le besoin d'encourager les coopérations qui n'existent peut-être pas assez dans ce domaine avec les chimistes et les neuropharmacologues.

Le mot « simplicité » a été utilisé depuis très longtemps mais l'idée est ici que l'évolution a mis en place chez le vivant, face à la complexité du monde et à l'augmentation de la complexité des organismes vivants, des principes simplificateurs.

Ces principes ne sont pas forcément simples et demandent parfois des détours et une certaine complexité dans les mécanismes, mais ils permettent de réaliser des fonctions rapidement et avec une grande efficacité. Il est étonnant de voir que

l'on retrouve aujourd'hui ces principes simplificateurs un peu partout dans l'immense quantité des publications qui décrivent la complexité du vivant, tant au plan génétique, chimique, mécanique et neuronal...

U'EST-CE UE LA SIMPLICITÉ ?

L'évolution a mis en place chez le vivant, face à la complexité du monde et l'augmentation de la complexité des organismes vivants, des « principes simplificateurs ». Ils ne sont pas simples, ils exigent parfois des détours, mais ils permettent de réaliser des fonctions rapidement et avec une grande efficacité. On trouve ces mécanismes « simples » du niveau génétique jusqu'aux fonctions cognitives les plus élevées.

Dans le cadre du sport, on trouve ces principes simplificateurs dans les mécanismes de contrôle du mouvement, les processus de décision, d'anticipation et dans le traitement et la mémoire de l'espace. Cependant, il est aussi nécessaire, à toutes les étapes, de

2. Les neurosciences cognitives sont un domaine de recherche dans lequel sont étudiés les mécanismes neurobiologiques qui sont à la base de la cognition (perception, motricité, langage, raisonnement, émotions...).

tenir compte d'autres aspects comme la différence entre les sexes, l'émotion, les mécanismes neuromodulateurs (abordés dans le **Chapitre de C.-Y. Guezennec**), etc.

1 La simplicité dans le sport : l'étude des mouvements

Qu'est-ce que la simplicité dans l'étude des mouvements ? Pour comprendre les mouvements complexes, il ne suffit pas de les décrire, il faut aussi découvrir les grands principes de l'organisation neuronale qui nous permettent de les réaliser. On en a découvert un très grand nombre dont les principaux sont reportés sur la liste de l'**Encart : « Quelques principes de la simplicité dans le contrôle et la perception du mouvement »**. Nous allons en décrire quelques exemples que

l'on trouvera développés dans le livre *La simplicité* (voir bibliographie « Pour en savoir plus »).

1.1. Les principes simplificateurs de la marche

1.1.1. La marche : un mécanisme très complexe

La simple marche (**Figure 1**) est un mécanisme complexe et hiérarchisé (**Figure 2**) : dans la moelle épinière se trouvent des générateurs de rythme qui peuvent être organisés pour donner la course, le pas. La rétículo-mésencéphalique initie l'un ou l'autre de ces types de mouvements par le biais de mécanismes qui les contrôlent. Le tout est sous contrôle du cerveau, avec la coordination du cervelet et des ganglions de la base, qui vont sélectionner et, éventuellement, prendre des décisions sur la marche, la course, etc. Puis, il

QUELQUES PRINCIPES DE LA SIMPLICITÉ DANS LE CONTRÔLE ET LA PERCEPTION DU MOUVEMENT

- 1- Un répertoire de sous-systèmes d'actions. La redondance et la vicariance.
- 2- Anticipation et prédiction par simulation du mouvement sur des modèles internes.
- 3- Sélection des capteurs sensoriels en fonction de l'action. Caractère projectif de la perception.
- 4- Réduction du nombre de degrés de liberté.
- 5- Constitution de référentiels multiples et mobiles. Utilisation de plusieurs géométries.
- 6- Mécanismes de cohérence.
- 7- Rôle des neuromodulateurs (dopamine, etc.) et de l'émotion.
- 8- Nature fondamentalement probabiliste de la perception et des mécanismes de décision. Etc.

vicariance : du latin *vicarius* remplaçant. C'est la propriété qui permet aux organismes vivants d'effectuer la même tâche en utilisant des mécanismes différents. Ce concept a été utilisé par les psychologues pour indiquer qu'une même performance humaine ou animale peut être réalisée par le cerveau par plusieurs processus différents. La redondance, qui est un des aspects de la vicariance, désigne la mise en jeu de plusieurs mécanismes en parallèle.



Figure 1

La marche est un ensemble de mécanismes très compliqués dans lesquels interviennent à la fois des facteurs cognitifs et sensorimoteurs. L'évolution a mis au point une hiérarchie de processus qui diminuent cette complexité en divisant les tâches en modules spécialisés et coordonnés. C'est un aspect important de la simplicité.

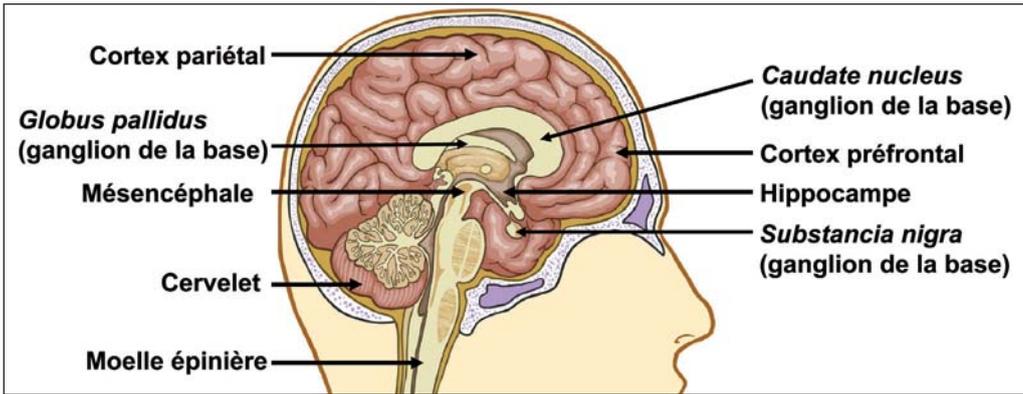


Figure 2

Lorsqu'on marche, différentes régions du système nerveux se mettent en activité : la moelle épinière génère le rythme de la course et organise les patterns nécessaires pour passer de la marche à la course au saut etc., le mésencéphale initie le mouvement en utilisant la coordination du cervelet, des opérations de sélection par les ganglions de la base. Le cortex pariétal et l'hippocampe codent les aspects spatiaux de la trajectoire de la marche. Le cortex préfrontal prend les décisions, etc.

y a la relation avec le système cérébral de traitement de l'espace : le cortex pariétal (qui évalue les différentes données comme la position du corps et de la cible dans l'espace grâce aux informations qu'il reçoit) et l'hippocampe (qui joue un rôle important dans la mémoire déclarative, la navigation spatiale et l'orientation dans l'espace). Ces deux parties du cerveau sont, quant à elles, sous contrôle du cortex préfrontal, qui prend les décisions. La marche est donc un ensemble de mécanismes très compliqués dans lesquels interviennent à la fois des facteurs cognitifs et senso-

rimoteurs. Mais ce n'est pas tout, il faut aussi prendre en compte la part d'émotions, qui est encore assez peu étudiée... Toutefois, cette « division du travail » en quelque sorte est un aspect important de la « simplicité ».

1.1.2. La création de référentiels mobiles : un principe simplificateur

Le premier exemple de principe simplificateur est la création de référentiels mobiles. La **Figure 3** représente les images successives et superposées d'une personne qui court par le photographe

Figure 3

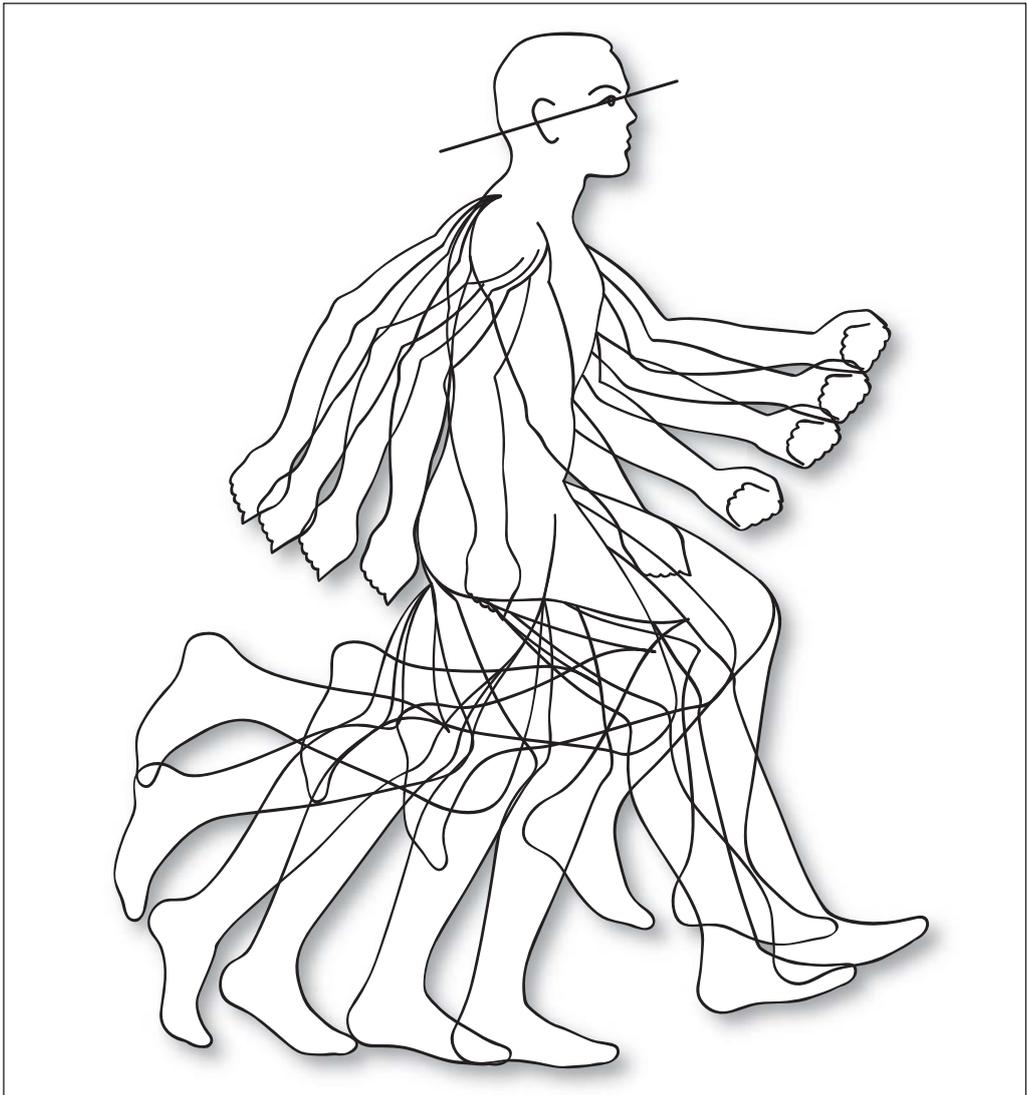
Reconstitution d'un homme courant, en conservant un point fixe des images. L'analyse de cette image de Muybridge nous montre que la tête reste fixe et que nous courons en prenant comme référentiel non pas les pieds, mais la tête [1]. Cette création d'un référentiel mobile simplifie considérablement le contrôle de la marche en permettant au marcheur de s'affranchir des aléas du sol par exemple.

américain Edward Muybridge (1830-1904).

L'analyse des images de Muybridge nous montre que la tête reste fixe et que nous courons en prenant comme référentiel non pas les pieds, mais la tête. Des études semblables ont montré que tous les mouvements du corps, complexes et rapides, comme ceux du ski sur bosses ou

ceux du surf (**Figure 4**), qui nécessitent la coordination de centaines de degrés de liberté, sont assurés à partir non pas des pieds, comme c'est le cas pour l'enfant jusqu'à deux-trois ans (voir aussi le paragraphe 1.4.2 et la **Figure 11A**), mais à partir d'une centrale inertielle mobile qui est la tête.

Une sorte de révolution galiléenne s'est donc produite au





cours de l'évolution qui nous a conduits à coordonner ainsi nos mouvements. Tout cela a été étudié quantitativement grâce à des calculs effectués sur ordinateur.

Des images ont été obtenues par enregistrement de la marche d'un sujet par une méthode de capture de mouvement avec des caméras digitales et un ordinateur [2].

Quand on examine ces mouvements dans le détail, on s'aperçoit que la tête est parfaitement stabilisée en rotation (comme schématisé sur la [Figure 3](#)) et que cela reste vrai pour les différents types de mouvements. Nous avons publié de nombreux travaux sur ces questions. Les roboticiens, en particuliers ceux qui construisent des humanoïdes, ont mis longtemps à admettre ce principe simplificateur qu'ils appliquent maintenant.

Dans ce travail que nous avons réalisé en 1990 et 1991, nous avons montré que la marche est contrôlée à partir de la tête, qui est stabilisée grâce au système vestibulaire³ et au regard. Ce principe simplificateur est un exemple de simplicité.

Il n'était pas évident d'inventer l'idée d'un référentiel mobile. Actuellement, en collaboration avec des mathématiciens, nous essayons de comprendre ce principe en faisant appel aux mathématiques d'Élie Cartan⁴.

3. Le système vestibulaire est le système sensoriel principal de la perception du mouvement et de l'orientation par rapport à la verticale. Il est donc à la base du sens de l'équilibre.

4. Élie Cartan (1869-1951) est l'un des mathématiciens français les plus influents de son époque et un théoricien de talent. Son travail a porté sur les applications géométriques des groupes et algèbres de Lie il a établi une classification de ces dernières sur le corps des nombres complexes il a introduit la notion de spineur, vecteur complexe qui permet d'exprimer les rotations de l'espace par une représentation bidimensionnelle et qui a contribué à affiner certains outils mathématiques de la relativité générale.

Figure 4

Dans des sports comme le ski sur bosses ou le surf, tous les mouvements du corps, complexes et rapides, qui nécessitent la coordination de centaines de degrés de liberté sur des supports inégaux ou mouvants, sont assurés non pas à partir des pieds, mais à partir de la tête.

1.2. Les principes simplificateurs des mouvements de la main

Un autre exemple concerne les mouvements de la main. L'étude neurophysiologique et biomécanique de ces mouvements a permis de découvrir toute une série de lois simplificatrices (**Encart : « Les lois de la formation de trajectoires : communes à la main et à la marche ? »**). Tout d'abord, le fait que le cerveau ne contrôle pas chacun des muscles mais, éventuellement, un point d'équilibre entre les muscles.

LES LOIS DE LA FORMATION DE TRAJECTOIRES : COMMUNES À LA MAIN ET À LA MARCHÉ ?

- Point d'équilibre (paragraphe 1.2).
- Variation coplanaire (paragraphe 1.3.1).
- Loi de la puissance $1/3$ (paragraphe 1.3.2).
- Variables composites.
- Contrôle séparé de la distance et de la direction.
- Etc.

Une autre découverte importante est la raison pour laquelle le cerveau n'a pas à contrôler chacun des muscles impliqués dans le mouvement. C'est parce qu'il existe des relations mécaniques très simples entre les angles d'élévation des différents segments, ce qui permet de simplifier le contrôle cérébral.

Nous avons également étudié la question de savoir si ces lois simplificatrices du fonc-

tionnement du cerveau pour contrôler les mouvements de la main pouvaient aussi s'appliquer pour la locomotion. Autrement dit, notre cerveau contrôle-t-il, avec des principes très généraux, l'ensemble des mouvements quelque soit leur complexité, que ce soit une vingtaine de degrés de liberté ou des centaines, quand il s'agit de contrôler la locomotion ? Cette idée est présente dans la littérature de physiologie depuis longtemps sous le nom de « principe d'équivalence motrice ». Par exemple, on peut écrire une lettre A avec le doigt, la main, la langue, le pied ou en courant sur la plage !

1.3. Les lois simplificatrices de contrôle de la globalité des mouvements

1.3.1. La variation coplanaire

Plusieurs équipes de recherche ont réalisé des images successives de la marche [3,4]. Bien que la vision d'ensemble apparaisse très complexe, une équipe italienne a montré que les trois angles d'élévation de la cheville, de la jambe et de la cuisse, lorsqu'ils sont portés sur un diagramme, décrivent une trajectoire plane (comme cela est montré sur la **Figure 5**). Cela signifie donc qu'ils peuvent être décrits par une loi il en est de même pour le bras. Le cerveau peut donc se contenter de ne contrôler que quelques grandes variables.

Il semble donc bien qu'au cours de l'évolution, des moyens ont été recherchés et trouvés permettant de

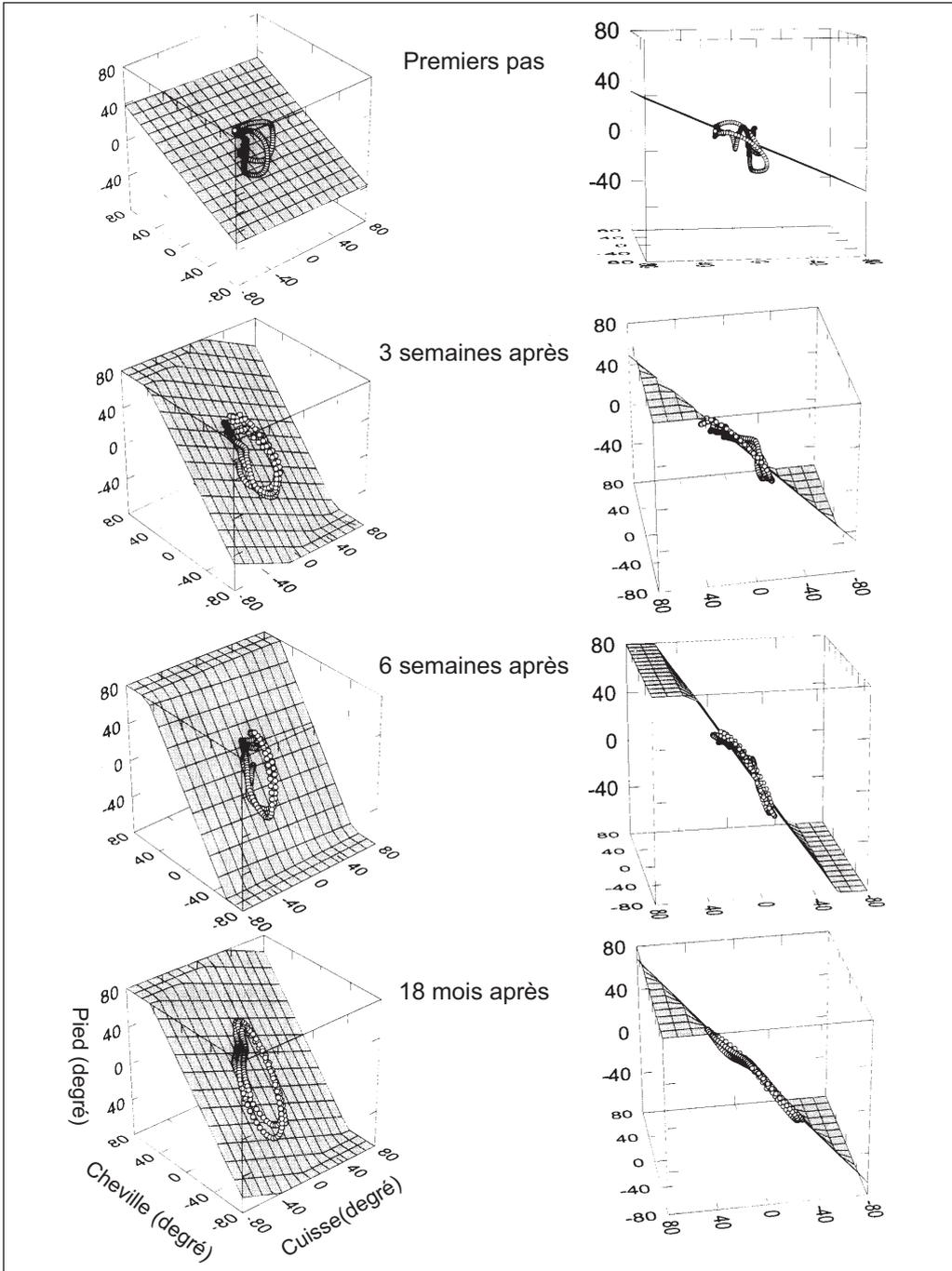


Figure 5

En visualisant des images successives de la marche, on constate que les trois angles d'élevation de la cheville, de la jambe et de la cuisse décrivent une trajectoire plane ! Cette coordination apparaît au cours de l'enfance. Les graphiques montrent le diagramme liant les trois angles lors des premiers pas, puis 3 et 6 semaines plus tard, puis 18 mois après [4].

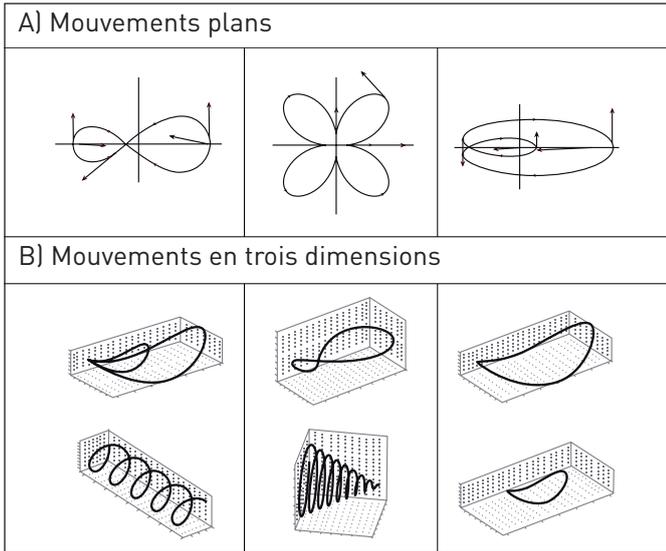


Figure 6

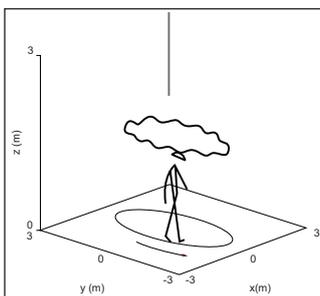
Lorsque l'on effectue un mouvement en forme de huit, de trèfle ou d'ellipse, il existe une relation linéaire entre la vitesse tangentielle (vitesse le long de la trajectoire) et la courbure de la trajectoire. Plus la courbure est importante, plus l'on va lentement.

A) Tracés de mouvements plans.

B) Mouvements en trois dimensions. Ici, la relation tient compte de la torsion du mouvement, en plus de sa courbure.

Figure 7

La loi liant vitesse tangentielle et courbure des mouvements de la main est valable pour la génération de trajectoires locomotrices. Un sujet marche suivant une trajectoire elliptique et l'on mesure le mouvement de la tête dans le plan horizontal. On trace alors un diagramme liant le logarithme de la courbure de la trajectoire et le logarithme de la vitesse tangentielle de la tête le long de la trajectoire : on obtient une relation linéaire qui prouve que la relation de la puissance 1/3, valable pour la main, l'est aussi pour la génération de trajectoires locomotrices.



contrôler nos mouvements dans leur globalité plutôt que dans le détail du mouvement de chaque muscle. Cette capacité de coordination est innée et se développe au cours de l'enfance.

1.3.2. La loi de la puissance 1/3

u'est-ce que la loi de la puissance 1/3 ? C'est la relation entre la vitesse tangentielle, la courbure et la torsion de

la trajectoire [5a] : si l'on demande à un sujet de réaliser un mouvement en forme de huit, en forme de trèfle, ou encore un mouvement elliptique (Figure 6A), il existe une relation linéaire entre la vitesse tangentielle (c'est-à-dire la vitesse le long de la trajectoire) et la courbure. Autrement dit, je vais plus lentement quand la courbure est importante. De même, de façon plus générale, car nos mouvements ne sont pas plans, nous avons récemment montré qu'une loi linéaire semblable, incluant un facteur lié à la torsion, caractérise les mouvements de torsion de la main (Figure 6B) [5b].

Nos collègues mathématiciens et physiciens ont montré que cette loi du mouvement de torsion dérive en fait des principes généraux de minimisation d'énergie, et même de principes encore plus généraux dans des géométries qui ne sont pas nécessairement euclidiennes⁵. D'une façon générale, on peut maintenant penser que ces principes sont à la base de certaines de ces règles simplificatrices de description des mouvements.

Ces lois sont-elles valables pour les trajectoires locomotrices ? Nous avons pu observer que cette loi simplificatrice est aussi vraie pour

5. La géométrie traditionnelle développée par Euclide modélise, en physique classique, l'espace qui nous entoure, un espace à trois dimensions gouverné par un ensemble d'axiomes et postulats. Il existe des espaces dits non euclidiens, où ces axiomes et postulats ne sont pas toujours valables. C'est le cas de la géométrie sphérique.

décrire la marche le long d'une ellipse. En mesurant le mouvement de la tête du sujet, on retrouve la même relation linéaire que celle observée pour les mouvements du bras (Figure 7, [6]), ce qui suggère l'existence d'un principe simplificateur plus général, valable aussi bien pour la génération du mouvement de la main que pour la génération de trajectoires, et cela parce que marcher c'est aller quelque part, et non pas seulement agiter les jambes !

1.3.3. Les trajectoires locomotrices sont stéréotypées

Que se passe-t-il quand on fait marcher quelqu'un dans une pièce, sur une trajectoire libre mais avec une contrainte d'orientation comme par exemple passer par une porte ? *A priori*, on peut le faire de multiples façons. En réalité, quand on demande à un sujet, sans rien lui préciser, de faire cette expérience, on s'aperçoit que ses trajectoires sont complètement stéréotypées et répondent effectivement à des principes généraux. Ces études sont réalisées en collaboration avec des collègues roboticiens et mathématiciens. Nous en décrivons quelques propriétés dans les lignes qui suivent.

1.4. Comment étudier les formes générales associées aux gestes ?

1.4.1. La segmentation du mouvement

Nous avons étudié de nombreuses trajectoires pour savoir si elles sont ou non liées à des formes géométriques assez simples. Pour

certaines comme le roboticien Jean-Paul Laumond, ce sont des morceaux de clothoïdes (doubles spirales, dites spirales de Cornu, Figure 8A). Pour d'autres collègues neurophysiologistes et roboticiens qui ont enregistré les relations entre l'activité des neurones du cerveau et les mouvements de la main du singe, ce sont des segments de parabole (Figure 8B).

Quoi qu'il en soit, il semble cependant qu'il existe des mouvements simplificateurs permettant de décrire d'une façon générale ces trajectoires et qu'ils sont peut-être à la base de notre perception de l'esthétique. L'exemple suivant, tout à fait remarquable, le confirme : si l'expérimentateur déplace un doigt et vous demande s'il bouge à vitesse constante, vous ne le percevrez bien à vitesse constante que si le mouvement l'est non

Figure 8

La forme du geste est-elle composée de segments de clothoïdes (A) ou de paraboles (B) ?
A) Schéma de clothoïde obtenu à partir de modèles de la marche par des roboticiens [7a].
B) Enregistrements de mouvements de la main chez le singe qui sont décomposés en segments de parabole [7b].

