



**HAL**  
open science

## Optimisation des performances, complexité des systèmes et confrontation aux limites

Jean-François Toussaint

► **To cite this version:**

Jean-François Toussaint. Optimisation des performances, complexité des systèmes et confrontation aux limites. La Chimie et le sport, 2011, 978-2-7598-0569-3. hal-02166267

**HAL Id: hal-02166267**

**<https://insep.hal.science//hal-02166267>**

Submitted on 26 Jun 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Optimisation des performances, complexité des systèmes et confrontation aux limites

**Jean-François Toussaint**

*Jean-François Toussaint est directeur de l'Institut de Recherche bioMédicale et d'Épidémiologie du Sport (IRMES). Champion de France et ancien membre de l'équipe de France de volley-ball, il a obtenu un PhD à Boston (Harvard Medical School, Massachusetts General Hospital). Il est professeur de physiologie à l'université Paris Descartes, cardiologue à l'Hôtel-Dieu et président de la commission de prévention du Haut Conseil de la santé publique. À ce titre, il participe aux travaux de prospective sur la santé en France au regard des pathologies émergentes et des adaptations envisageables.*

Le but de ce chapitre est de comprendre les conditions de la performance : son moteur, son énergie, ses rendements, ses bénéfices premiers et seconds. Il s'agira de concevoir ensuite, sur quelques exemples, ce qui fonde les raisons théoriques de nos limites, et de vérifier que les situations observées sont en accord avec les constructions conceptuelles. Enfin, nous chercherons à connaître le contexte présent de la performance, les raisons du dépassement, les fondements de l'optimisation et les métamorphoses de cette quête perpétuelle.

## 1. Énergie et plaisir : la mécanique de la performance

Existe-t-il une biologie spécifique du sportif ? Les lois fondamentales du vivant auxquelles sont soumis les humains, et donc les athlètes, ne sont évidemment pas remises en question. La biologie de la performance répond à une quête de maximisation, à la limite des capacités de l'espèce. Usain Bolt (**Figure 1**), lors de ses derniers records du monde à Berlin en août 2009, montre l'extraordinaire aisance dans le développement de ces capacités, la joie qu'elles lui procurent et qu'il sait partager.



Figure 1 – L'athlète jamaïcain Usain Bolt après sa victoire et son deuxième record du monde sur cent mètres le 16 août 2008 aux Jeux olympiques de Pékin.

Quel est le moteur qui permet d'accéder à de telles performances ? Quelle en est l'alchimie ? L'énergie *ou* le plaisir ? On peut le voir comme une résultante de ce que le

moteur moléculaire met en place, et de ce que l'énergie permet de diffuser à l'intérieur de cette étonnante mécanique pour un bénéfice immédiat : celui du plaisir ressenti.

Comment fonctionne ce moteur biologique ? L'une de ses bases réside dans l'interaction entre l'actine et la myosine, deux protéines contractiles situées dans nos muscles et responsables de sa contraction lors de toute activité physique. Le carburant de ce moteur est l'ATP que nous fournissent les mitochondries, principaux sites de production énergétique et de respiration cellulaire, mais aussi du calcium fourni par l'alimentation (**Encart : « La contraction musculaire »**). Des cycles de contraction moléculaire s'instaurent, provoquent un raccourcissement progressif des cellules myocytaires, jusqu'à la contraction de l'ensemble du muscle.

## La contraction musculaire

### La contraction musculaire nécessite de l'énergie

Lors d'une activité physique, nos muscles se contractent en utilisant de l'énergie chimique produite lors de la respiration cellulaire, pour la convertir en énergie mécanique autorisant le mouvement. Cette énergie chimique est stockée et transportée dans la cellule sous forme de molécules d'ATP, véritable « réserve biologique d'énergie » de l'organisme, dont l'hydrolyse libère de la chaleur (on dit qu'elle est exothermique) :  $ATP \rightarrow ADP + Pi$ . L'énergie libérée est alors utilisable par l'organisme dans ses diverses réactions biochimiques à la base du fonctionnement cellulaire (**Figure 2**).

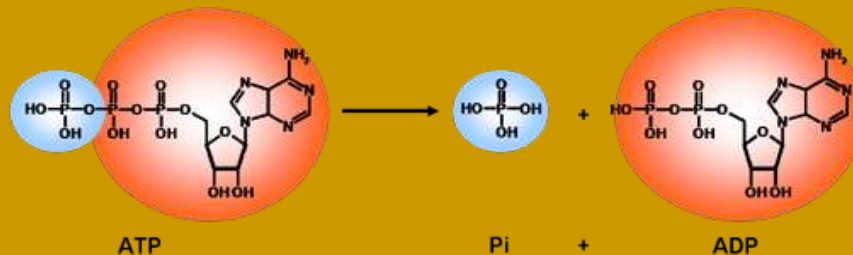


Figure 2 - L'ATP (Adénosine Triphosphate) est le carburant de notre corps : son hydrolyse en ADP (Adénosine Diphosphate) et en Pi (Phosphate inorganique) libère une quantité d'énergie importante consommable par l'organisme, pour toutes ses activités, physiques ou mentales.

### Nous nous procurons de l'énergie (ATP) en respirant et en mangeant

Qu'est-ce qui nous fournit cet ATP, énergie nécessaire à l'activité physique ? À chaque fois que nous inspirons, le transfert de l'oxygène vers nos milliards de cellules leur permet de respirer selon un mécanisme biochimique très élaboré, se déroulant au sein des mitochondries (**Figure 3**). Cette respiration peut s'illustrer par le bilan suivant : nos cellules consomment de l'oxygène apporté par les globules rouges, du glucose (ou des acides gras) fourni par l'alimentation et de l'ADP pour produire du dioxyde de carbone, de l'eau et de l'ATP, selon l'équation :

$C_6H_{12}O_6$  (glucose) + 6  $O_2$  + ~36 ADP + ~36 Pi  $\rightarrow$  6  $CO_2$  + 6  $H_2O$  + ~36 ATP (énergie) + énergie thermique.

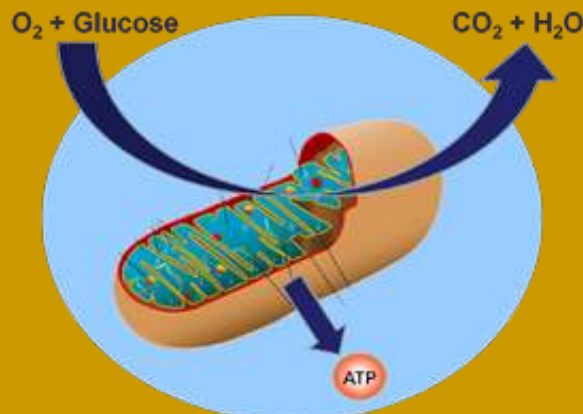


Figure 3 – Les mitochondries sont les « poumons » de nos cellules : elles absorbent l’oxygène et le glucose puis rejettent le dioxyde de carbone et de l’énergie ATP.

EDP Sciences : retoucher la figure en enlevant les traits noirs ?

### La contraction musculaire nécessite de l’ATP et du calcium

Comment cet ATP va-t-il permettre à nos muscles de se contracter ? Zoomons sur nos muscles, semblables à une gaine contenant des milliers de câbles. Ces câbles sont des fibres, qui ne sont autres que des cellules musculaires à l’aspect allongé, parallèles entre elles et striées, se terminant par des filaments de collagène, qui, regroupés, forment les tendons (en jaune, Figure 4). La striation est due à la présence de structures appelées microfibrilles, qui sont constituées par la juxtaposition d’unités de répétition appelées sarcomères. Un sarcomère est composé de l’association de deux types de protéines contractiles : l’actine et la myosine ; c’est leur interaction qui provoque la contraction musculaire.

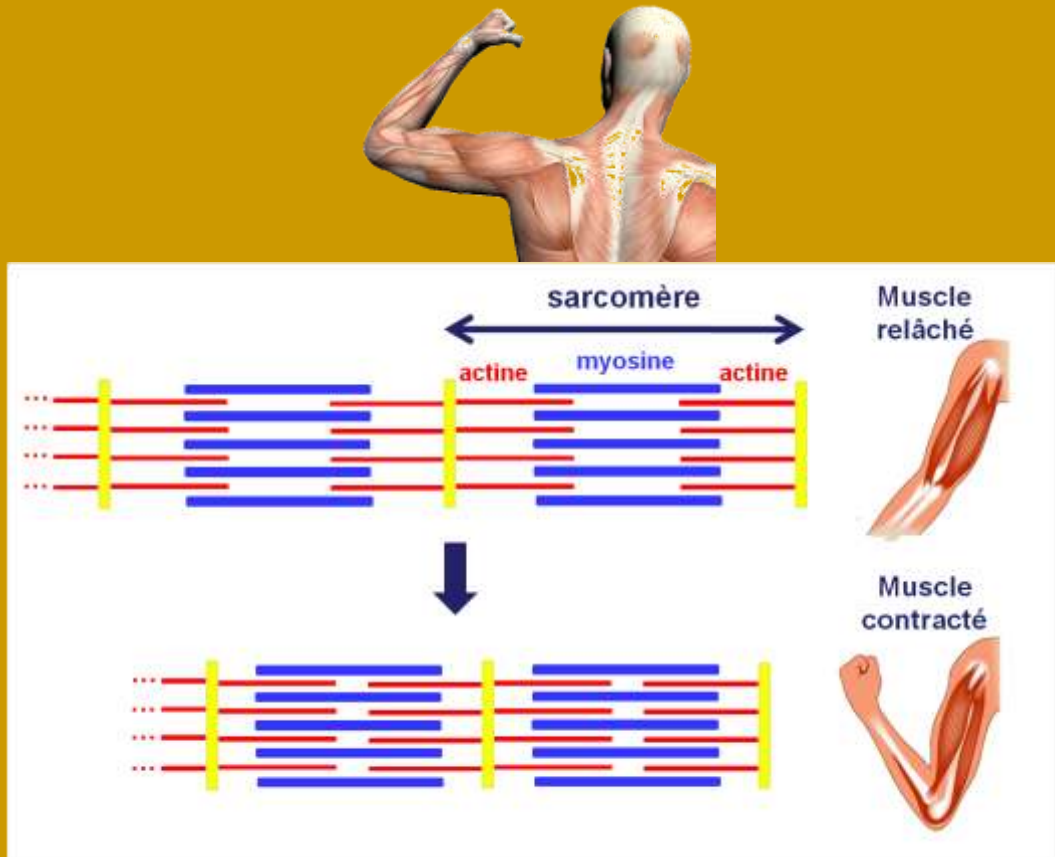


Figure 4 - La contraction musculaire résulte du raccourcissement des sarcomères constitutifs des microfibrilles, dû au glissement l’une sur l’autre des fibres d’actine et de myosine.

Regardons en détail. L’actine filamentaire (en rouge, Figure 5) se présente sous forme de deux chaînes enroulées en hélice formant des filaments fins associée à deux autres protéines : la tropomyosine et la troponine (boules blanches, Figure 5), protéine globulaire dont une partie (la troponine I) est capable d’inhiber la fixation de la myosine, et une autre (troponine C) peut fixer des ions calcium  $Ca^{2+}$ . La myosine (en bleu, Figure 5) forme des filaments épais également constitués de deux chaînes enroulées en hélice et se terminant chacune par une « tête globulaire » : c’est une enzyme capable de fixer des molécules d’ATP et de les hydrolyser en ADP.

### Le cycle contraction-relaxation musculaire

- Au repos, l’actine et la myosine sont séparées grâce à la partie inhibitrice de la troponine : il n’y a pas de contraction musculaire.
- Au moment où notre cerveau commande un mouvement, ses messagers chimiques sont acheminés vers le muscle, appelant de nombreux ions calcium à diffuser dans la cellule musculaire pour se fixer sur la troponine. Celle-ci se met alors en rotation, entraînant la tropomyosine dans une position qui permet à l’actine de s’approcher de la myosine. Dans le même temps, la tête de myosine s’active en hydrolysant l’ATP en ADP, fournissant l’énergie nécessaire pour qu’actine et myosine entrent en

contact et glissent l'une vers l'autre. Ceci conduit à un raccourcissement longitudinal de la cellule musculaire, correspondant à une phase de contraction musculaire. Le couple actine-myosine reste ainsi soudé et stable ; seuls l'arrivée d'une nouvelle molécule d'ATP et le départ des ions calcium peuvent les dissocier, pour que le muscle se relâche. Lorsqu'un athlète fournit des efforts intenses, il ressent de la fatigue lui signalant qu'il faut arrêter de consommer de l'ATP, et en garder suffisamment pour le relâchement de ses muscles et éviter les crampes. En l'absence d'ATP, soit dans des conditions d'ischémie\* totale, les muscles restent contractés ; la configuration ainsi formée est appelée *rigor* (à l'origine de la rigidité cadavérique : *rigor mortis*).

- Dès que l'ATP se fixe à nouveau sur la tête de myosine, il est hydrolysé en ADP, ce qui entraîne un changement de conformation de la myosine et un retour à sa position initiale de relaxation.

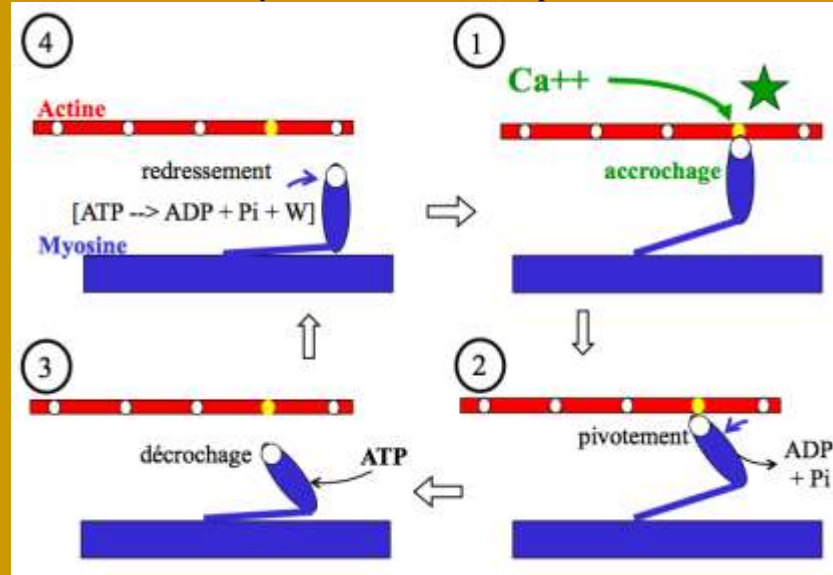


Figure 5 - (1) Au repos, l'actine et la myosine sont séparées par la troponine, ce qui empêche la contraction musculaire. Sous l'effet d'un influx nerveux, les ions calcium viennent se fixer sur la troponine C, qui pivote (2) et déplace la tropomyosine, ce qui permet à l'actine d'entrer en contact avec la myosine, contact rendu possible par hydrolyse de l'ATP en ADP au niveau de la tête de myosine. Le départ de l'ADP est nécessaire au basculement de la tête de myosine responsable du raccourcissement du sarcomère. (3) De nouvelles molécules d'ATP se fixent alors sur les têtes de myosine, qui les hydrolysent en ADP (4), reviennent à leur position initiale et se détachent de l'actine : c'est le relâchement musculaire.

\*Une ischémie est une diminution de l'apport sanguin artériel à un organe, par exemple le cerveau. Elle se traduit par un manque d'oxygénation, qui peut aller jusqu'à l'arrêt de son fonctionnement.

Mais ce n'est pas le seul moteur nécessaire dans la course au record. Lors d'efforts intenses, on observe la production d'une **endorphine** sécrétée par deux glandes du cerveau, l'hypophyse et l'hypothalamus. Comme toute morphine, elle a une forte capacité analgésique permettant de remplacer par une sensation de bien-être la douleur inhérente à toute tentative de dépassement des limites. Ainsi, ce rôle des endorphines libérées dans la synapse entre deux cellules lors du dialogue neuronal (**Figure 6**) sera l'élément primordial de la récompense, la motivation, le moteur psychologique poussant les uns et les autres à se dépasser pour un titre de champion olympique comme pour toute compétition, quel qu'en soit l'enjeu.

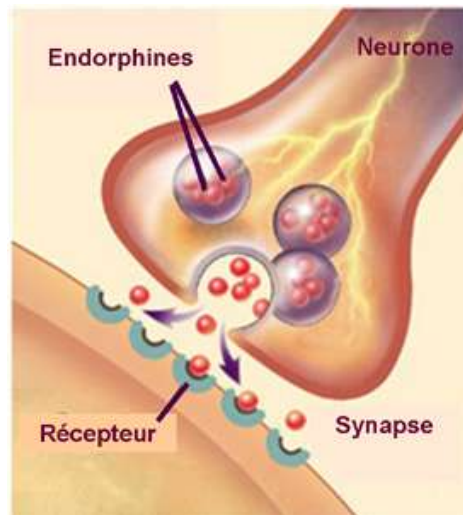


Figure 6 – Au cours du dialogue neuronal, les endorphines, sécrétées par l’hypophyse et l’hypothalamus, sont transmises d’un neurone à l’autre par fixation sur les récepteurs du neurone post-synaptique.

Si nous avons le même moteur moléculaire qu’Usain Bolt, sans le désir et le plaisir qu’il ressent lors de la victoire, nous n’obtiendrions probablement pas les résultats auxquels il parvient depuis quatre ans.

## 2. Évolution, Techniques et Complexité

Qu’en est-il sur le plan de l’évolution ? Nos ancêtres couraient-ils plus vite que nous ? L’homme, comme toute espèce animale assurant sa survie, atteint sa vitesse la plus grande lorsqu’il tente d’échapper à ses prédateurs. De fait, il existe toujours à notre époque un lien extrêmement fort entre les capacités physiques maximales mesurées par la vitesse de déplacement et l’espérance de vie. Ironiquement, on peut ainsi considérer que les recordmen du sprint ne sont pas les descendants des chasseurs les plus véloce mais ceux des fuyards les plus vifs...

Nous l’avons compris, pour courir vite, il faut dépenser au mieux l’énergie fournie par la respiration cellulaire sous forme d’ATP ; celle-ci permet de faire marcher les moteurs que sont l’actine et la myosine. L’ensemble contribue à générer des endorphines neuronales, molécules de la récompense. Laquelle de ces molécules est indispensable ? Toutes. Laquelle est suffisante pour expliquer la performance d’Usain Bolt ? Aucune. C’est toutes ensemble, associées à un grand nombre d’autres (la phosphocréatine, l’alpha-actinine...) et pas seulement les trois premières, citées comme exemples, qui permettent la performance (comme le démontre le [Chapitre de C.-Y. Guezennec](#)). À quelles doses agissent-elles ? On ne le sait pas toujours. Quelles sont les concentrations précises, nécessaires à leurs interactions et leurs inter-régulations ? Cela reste encore à découvrir... Petit à petit la complexité du vivant comme celle de nos comportements se révèle (**Encart : « Qu’est-ce que la complexité en science ? »**).

### Qu’est-ce que la complexité en science ?

La notion de complexité, qui amalgame, souvent à tort, chaos et hasard, a été particulièrement étudiée par le groupe de Santa-Fé, dans les années 1990, sous l’impulsion de Stuart Kauffman. Une définition du concept peut être proposée :  
« Un système complexe est un réseau d’entités élémentaires ayant les caractéristiques suivantes :

- des propriétés nouvelles émergent d'un tel système, ne pouvant être « simplement » déduites de celles de ses composantes par une combinaison linéaire, un simple changement d'échelle, une simple somme des propriétés individuelles ;
- les relations entre les entités sont diverses : relations de proximité ou lointaines, présence de boucles de rétroactions ;
- les entités et les relations peuvent évoluer dans le temps, de nouvelles peuvent apparaître, certaines peuvent disparaître ;
- le système complexe est ouvert, c'est-à-dire qu'il existe des échanges avec le monde extérieur ;
- le système complexe a une histoire. Quand on l'observe à un moment donné, il faut la prendre en compte si c'est possible, ou du moins en avoir conscience ;
- il comporte des emboîtements, c'est-à-dire qu'il est composé de sous-systèmes ;
- ses frontières sont difficiles à cerner et résultent souvent du choix de l'observateur, c'est ce qu'on appelle la « fermeture du système ».

Un système peut être qualifié de « structurellement complexe » s'il est constitué de nombreuses entités reliées entre elles (Figure 7). Un tel système peut cependant exhiber un comportement simple, régulier (comme des systèmes à nombreux compartiments mais où les relations sont linéaires). Un système, même structurellement simple, peut exhiber un « comportement complexe », le plus complexe étant un comportement erratique, chaotique.

Le hasard observé (au moins dans une partie du monde réel au comportement qualifié de stochastique), résulterait d'un comportement complexe erratique, celui-ci pouvant être engendré par des processus ou des combinaisons de processus déterministes engendrant du chaos (dans le sens scientifique des termes hasard et chaos). »



Figure 7 – Ramures d'arbres, colonies de termites, fourmilières... la nature regorge de systèmes « structurellement complexes ».

\* Extrait du livre d'Alain Pavé. (2007). *La nécessité du hasard, vers une théorie synthétique de la biodiversité*. EDP Sciences, et références citées.

Comme il est impossible d'y déroger, les performances sont assujetties aux lois classiques de la physique, de la chimie et surtout de la thermodynamique (voir aussi le [Chapitre de P. Letellier](#)), lois qui structurent le vivant. Mais elles sont aussi contraintes par les lois de la complexité. Essayons, sur la base de cette double approche, de décrire et d'explicitier la progression des records du monde et d'en comprendre les lois mathématiques de croissance et les principes fondamentaux. On peut pour cela s'appuyer sur l'une des définitions les plus simples du vivant : **un système critique auto-organisé qui s'oppose, transitoirement, à la décroissance énergétique universelle**. La décroissance de l'énergie est en effet exponentielle et contingente de l'inéluctable croissance de l'entropie qui lui est associée ([Encart : « Ilya Prigogine, un parcours d'exception, une révolution conceptuelle »](#)).

## Ilya Prigogine, un parcours d'exception, une révolution conceptuelle

Ilya Prigogine (1917-2003), prix Nobel de chimie 1977, a transformé notre compréhension du monde (Figure 8). Il a développé la théorie des structures dissipatives et de l'auto-organisation des systèmes, en fondant l'irréversibilité des phénomènes temporels. Il a ainsi donné une nouvelle dimension à la thermodynamique en démontrant que l'entropie (Figure 9) n'était pas la seule grandeur à prendre en compte, au contraire des approches classiques qui ne considéraient, jusque là, que les phénomènes théoriquement réversibles.

### *Un parcours atypique et plein d'enseignement*

Ilya Prigogine explique ainsi son parcours : jeune émigré de Moscou, exilé en Belgique à Bruxelles, il voulut comprendre comment on arrivait à devoir fuir son propre pays. Il aborda donc la politique et étudia le droit. Voulant comprendre le comportement d'un accusé, il étudia la psychologie et s'intéressa au fonctionnement du cerveau. Il étudia la biologie, la chimie puis la biochimie. Poussant plus loin sa compréhension des interactions, il étudia la physique des particules. De la physique, il passa à l'astrophysique puis à la cosmologie. Il aborda alors les questions fondamentales : la matière, le vide, le temps et son irréversibilité (la flèche du temps). Pour comprendre celle-ci, il étudia enfin les structures dissipatives.



Figure 8 - Ilya Prigogine a transformé notre compréhension du monde.

**EDP Sciences : mettre en petit**

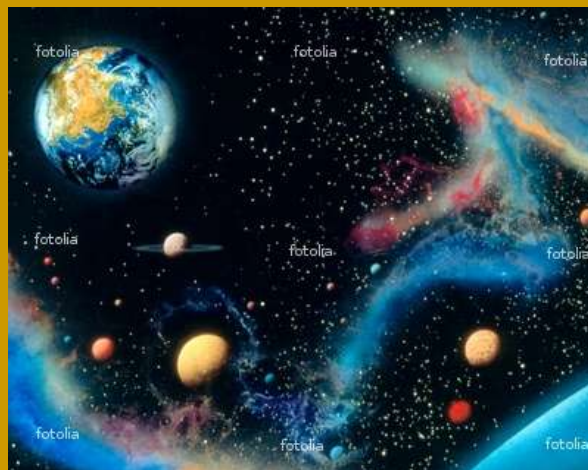


Figure 9 - L'un des principes de la thermodynamique classique stipule que l'univers, ainsi que tout système isolé qu'il contient, a tendance à évoluer vers un état de désordre croissant. On dit qu'il y a « création d'entropie ».

### *Les lois de la physique et celles du vivant*

Ilya Prigogine explique que les lois physiques universelles décrivent uniquement des phénomènes qui évoluent vers le désordre, ou qui sont à l'équilibre ou proches de l'équilibre. Or, le vivant fonctionne toujours loin de l'équilibre, là où les processus qui produisent cette entropie, en dissipant de l'énergie, construisent un nouvel ordre. La « vie » peut être considérée comme un phénomène d'auto-organisation de la matière, évoluant vers des états de plus en plus complexes. Le principe de complexité progressive est alors fondateur, lié à la notion de « direction du temps » (ou flèche du temps) : il y a un avant et un après, et passé et futur jouent des rôles différents. Cette loi d'irréversibilité est asymétrique et probabiliste. La thermodynamique de Prigogine décrit le monde en probabilités, traitables mathématiquement. Cela veut dire que la « probabilité » n'est pas que le fruit



de notre ignorance (comme semblait le penser Einstein), mais une réalité intrinsèque, irréductible, aux systèmes dynamiques, en évolution, et pour lesquels, même si nous connaissons les conditions initiales et les forces en action, nous ne pourrions pas calculer le mouvement et la trajectoire. Sur une trajectoire existent des points singuliers, des points de bifurcation, où s'ouvrent plusieurs trajectoires possibles. Parmi elles, une seule sera suivie. Mais laquelle et pourquoi ? On ne peut pas passer de la probabilité à la trajectoire, quand le système est non intégrable selon la classification de Poincaré. Car c'est une accumulation de petits éléments qui conditionnent le futur, c'est-à-dire le cours de l'histoire, de l'évolution, et de nombreux phénomènes, météorologiques, cosmologiques. Par exemple, tous les poissons ne sont pas devenus des sauriens ; seul un petit nombre a suivi cette voie, de même que seuls quelques sauriens sont devenus des oiseaux et que seuls quelques singes sont devenus des hommes... sans que nous puissions prévoir la suite de la trajectoire de cette évolution ! Par contre, nous savons que jamais la trajectoire inverse, notre retour vers un état initial, singe ou bactérie, ne sera possible car il est exclu par l'irréversibilité thermodynamique.

### *Et la chimie...*

Le phénomène d'instabilité du mouvement est universel et rencontré dans de nombreux systèmes de notre vie quotidienne. Il implique que de très petites causes engendrent de grands effets, d'où la possibilité qu'ont de tels systèmes d'emprunter une multiplicité de trajectoires.

La réaction chimique elle-même est fondamentalement non linéaire, mettant en jeu, au niveau moléculaire, des processus complexes qui suivent la collision d'au moins deux molécules. Et pourtant, l'expérience du chimiste montre qu'une réaction, dans des conditions définies, donne toujours le même résultat, c'est-à-dire qu'elle est simple et déterministe. Ceci n'est « vrai » qu'à l'échelle de l'observation macroscopique et dans un système fermé qui, selon le second principe de la thermodynamique, atteint inexorablement l'état d'équilibre. Dans des conditions éloignées de cet équilibre, les lois cinétiques sont à l'origine d'autres comportements, tels que la coexistence entre plusieurs états, les phénomènes de cycles, de rythmes temporels ou des structurations spontanées dans l'espace.

De nombreuses sciences chimiques ont intégré et développé les notions découvertes et conceptualisées par Ilya Prigogine. Elles ont même, bien avant la mécanique des fluides, l'optique, les circuits électroniques, etc., joué un rôle de premier plan. Dès le milieu des années 1960, Adolphe Pacault (1918-2008) s'est intéressé à la thermodynamique non-linéaire, aux horloges chimiques et aux structures de non-équilibre, dans la lignée des travaux du chimiste russe Belousov, qui découvrit en 1950 les réactions oscillantes. Ce sont des systèmes, qui, bien que très simples (divers produits dans l'eau à température ambiante, par exemple) hésitent, oscillent, entre deux états, avec une grande régularité jusqu'à épuisement d'un des réactifs.

Une application passionnante de ces concepts relève de la chimie des cristaux liquides et des gels, et son extension à la mécanique et à la dynamique cellulaires. Parmi les composants du cytosquelette cellulaire, on trouve les filaments d'actine, organisés en gel réticulé. Dans ces gels se trouvent les filaments de myosine, moteurs moléculaires responsables de la contraction musculaire (**voir l'encart « La contraction musculaire »**). L'introduction et l'hydrolyse permanente de molécules d'ATP fait de ces gels des systèmes ouverts, perpétuellement hors d'équilibre, et contractiles : les myosines se structurent spontanément dans l'espace et accrochent les filaments d'actine disposés en hexamères. L'activité de ces moteurs génère une anisotropie et un cisaillement dans le gel d'actine... qui le rend capable de se propulser spontanément. Sur les mêmes bases mathématiques, analogues à celles décrivant le comportement de cristaux liquides, Jacques Prost explique des phénomènes comme la division, la cicatrisation ou la motilité cellulaires.

*Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles.* Dunod, 1968, ISBN 2-87647-169-8.

*Structure, stabilité et fluctuations* - avec P. Glansdorff, Masson, 1971, ISBN 2-2252-9690-1.

*À la rencontre du complexe* - Grégoire Nicolis, Presses Universitaires de France, 1992, ISBN 2-1304-3606-4.

*Le monde s'est-il créé tout seul ?* Entretiens. Le livre de poche Albin Michel 2008.

*L'Actualité Chimique*, décembre 2009, N° 336 Hommage à Adolphe Pacault.

Prenons l'évolution des records du Tour du Monde à la voile. Entre le record de Francis Chichester en 7 mois et demi sur un bateau de 16 mètres et celui de Franck Cammas de mars 2010 en 48 jours 7 heures sur un 32 mètres, la progression est stupéfiante. La part de

chacun des marins y est certes incontestable mais la technologie joue un rôle majeur : l'une des bases de ce record est ainsi la relation linéaire entre la taille du bateau et sa vitesse, c'est-à-dire entre l'énergie disponible (l'importance de la dépression créée par l'écoulement de l'air sur la surface totale de la voile) et sa restitution sur l'océan (Figure 10).

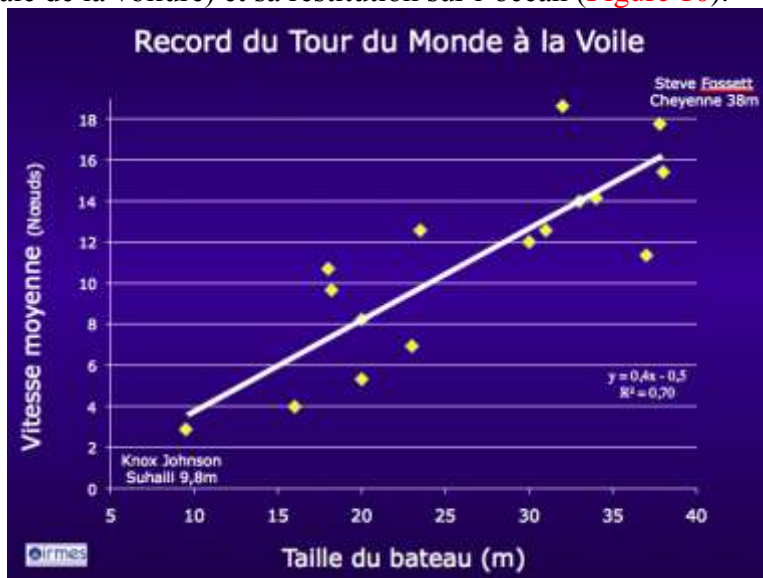


Figure 10 - Du « Suhaili » de 9,80 mètres de Sir Knox Johnson en 1968 (faire le tour du monde sur un voilier de moins de 10 mètres, il fallait oser) au « Cheyenne » de 38 mètres de Steve Fossett en 2004, en passant par les bateaux de tous les détenteurs du record, on observe une relation linéaire entre vitesse et taille du bateau.

Cette course à la taille se retrouve dans le gabarit des sportifs eux-mêmes, dans les sports plus physiologiques tels que la natation ou l'aviron. Car « plus fort », c'est d'abord « plus grand ». L'un des rares cas réussi d'une sélection qu'on pourrait assimiler à une conception génétiquement programmée dans le domaine sportif nous vient de Chine. En effet Yao Ming le seul enfant de Yao Zhiyuan (2,01 mètres) et de Fang Fengdi (1,90 mètres), tous deux joueurs professionnels de basketball, était programmé pour devenir, trente ans plus tard, l'individu rare qui, du haut de ses 2,29 mètres, est actuellement le plus grand joueur en activité de la NBA, championnat américain de basket (Figure 11). L'évolution de la taille se retrouve également chez les recordmen du cent mètres : en 1936, Jesse Owen ne mesurait que 1,78 mètres, Jim Hines, champion olympique en 1968, 1,83 mètres, Carl Lewis 1,92 mètres et Usain Bolt mesure aujourd'hui 1,96 mètres. La puissance est directement liée au volume musculaire et à la taille de la charpente osseuse qui supporte cette masse et permet d'accroître la vitesse (Figure 12).



Figure 11 - Yao Ming, basketteur d'une taille exceptionnelle.

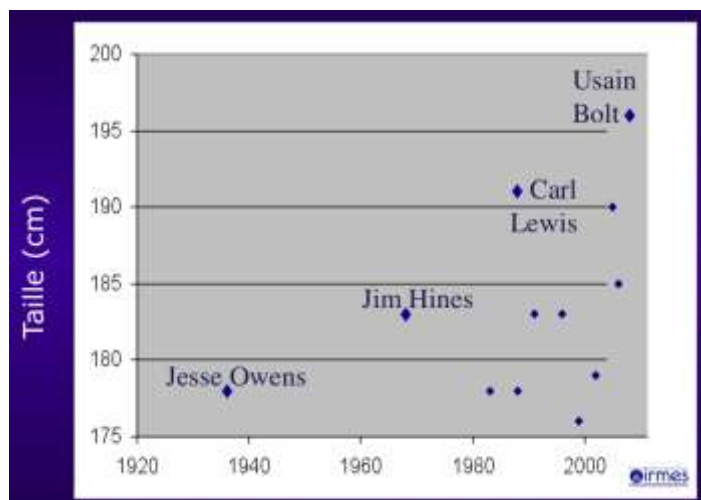


Figure 12 – L'augmentation de la taille des recordmen du monde du cent mètres en un siècle est très explicite !

### 3. Rythmes et perturbations : réactions aux modifications des conditions

Les principes du vivant sont doubles : le premier est celui de la dissipation énergétique (paragraphe 2), le second celui des perturbations. Chacune d'entre elles occasionne une réponse (changement de niveau) avec variabilité initiale forte des valeurs observées ; elle est suivie d'une évolution vers l'équilibre, à un niveau supérieur ou inférieur, dans l'attente de la perturbation suivante. La combinaison des deux principes produit des phénomènes d'oscillation. Parmi les phénomènes oscillatoires, on connaît bien les rythmes circadiens, construits sur l'alternance jour/nuit, les rythmes circannuels qui s'appuient sur les saisons (**Encart : « La chronobiologie et ses rythmes »**). Ces rythmes fondamentaux, ces équilibres, l'homme n'a pu s'en affranchir en dépit de ses progrès technologiques. En effet, l'activité physique modérée, celle que nous en accomplissons tous les jours, est éminemment marquée par le cycle des saisons comme le sont nos rythmes hormonaux, nos principales maladies et nos cycles de consommation, de dépression, de violence ou de mortalité ; l'activité physique intense (sans qu'il s'agisse du sport de haut niveau) est également caractérisée par un cycle dont le pic survient en été (**Figure 13**).

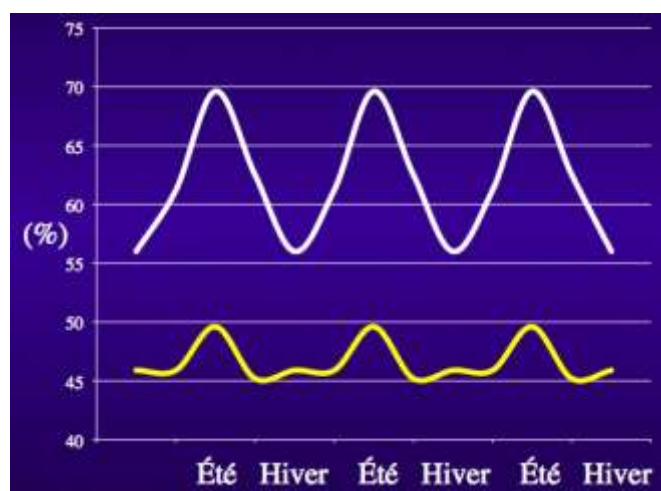


Figure 13 – Pourcentage de la population générale pratiquant une activité lors de trois années successives. Ces courbes mettent en évidence la très forte saisonnalité de l'activité physique. Courbe blanche : Activité physique modérée (ex : marche régulière) ; courbe jaune : activité physique intense (course rapide).

## La chronobiologie et ses rythmes

Qu'y a-t-il de commun entre le décalage horaire ressenti après un vol transatlantique, les troubles du sommeil plus fréquents le dimanche soir après deux grasses matinées consécutives, la variabilité saisonnière des performances sportives et les changements d'heure légale, en mars et octobre ? Ce sont les horloges biologiques, qui rythment nos vies sans que nous en ayons véritablement conscience (Figure 14). Elles constituent une dimension essentielle du monde vivant, animal comme végétal, et même microbien, permettant aux organismes de se préparer énergétiquement à leur phase d'activité. Mais elles ont aussi bien d'autres fonctions fondamentales, comme déclencher la période des amours, guider les oiseaux dans leurs migrations saisonnières ou les abeilles dans leur butinage.

Dès 1729, les savants disposaient des premiers indices de l'existence d'une horloge biologique. Elle ne sera pourtant admise et démontrée que dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, notamment grâce aux travaux du neurobiologiste français Michel Jouvét sur le sommeil. Mais comment le vivant mesure-t-il le temps avec une telle régularité ? Comment met-il quotidiennement ses horloges internes à l'heure solaire ? Et comment produit-il tous les cycles physiologiques qui rythment ses journées ?



Figure 14 - Chaque être vivant possède une « horloge interne » qui contrôle la succession des périodes d'activité et des périodes de sommeil.

### *Une mécanique bien réglée*

Seuls les êtres humains disposent d'un réveil. Et pourtant, le coq chante le lever du jour, les oiseaux gazouillent, nombre d'animaux sortent de leur sommeil lorsque les étoiles cèdent leur place au soleil, tandis que d'autres, au contraire, n'abandonnent la sécurité de leur terrier qu'à la nuit tombée. Qu'est-ce qui déclenche toute cette activité ?

Chaque être vivant possède une « horloge interne » qui contrôle la succession des périodes d'activité et des périodes de sommeil. Elle régule ainsi le rythme biologique sur une période d'environ 24 heures, ce qui lui vaut la dénomination d'horloge « circadienne » (du latin « environ un jour »), en phase avec l'alternance du jour et de la nuit. Le rôle de l'horloge est de préparer l'organisme au réveil, même avant la fin de la période d'obscurité (ou de lumière pour les organismes nocturnes), de suivre l'évolution des saisons, grâce aux variations de durée du jour, et de mettre en place les différentes fonctions physiologiques aux différents moments de la journée. Cette horloge tourne même en l'absence d'alternance du jour et de la nuit, permettant aux êtres vivants (animaux ou végétaux) de préserver leur rythme d'activité dans des conditions artificielles.



Figure 15 - Le coq chante le lever du jour, les oiseaux migrent, les marmottes hibernent en hiver... Toutes les activités des êtres vivants se déroulent de façon périodique, en suivant des rythmes observables et mesurables : alternance veille-sommeil, reproduction saisonnière des végétaux (floraison) et des animaux, migrations des oiseaux...

### ***Un réveil dans la tête***

Le cerveau humain contient cette horloge interne. Elle se situe dans une partie située à l'arrière de la tête – l'hypothalamus –, au niveau de ce que les anatomistes appellent le noyau suprachiasmatique, à la croisée des voies visuelles, qui informent sur l'alternance jour/nuit puisqu'il faut voir la lumière pour pouvoir se recalibrer sur les conditions environnementales locales. Un tel rythme d'activité existe aussi chez les organismes qui ne sont pas soumis aux alternances jour/nuit, comme ceux vivant au fin fond des grottes ou ceux plus ou moins profondément cachés dans le sol et qui souvent n'ont plus d'organe visuel. La raison en est que le mode de vie de ces animaux est relativement récent au regard de leur évolution et qu'ils ont gardé une trace de cette horloge biologique ancestrale. Elle leur permet de fonctionner selon un rythme qui ne sera plus calé sur l'alternance jour/nuit. Cependant, chez des espèces presque aveugles comme la taupe par exemple, un très petit nombre de cellules rétinienne suffit à percevoir une variation de l'intensité lumineuse locale, et donc à rythmer l'activité selon un schéma peu différent du nôtre.

Les gènes (*clock*, *per*...), les récepteurs nucléaires (ROR, PPAR...) ou les facteurs de transcription (*Mef2*) et les boucles régulatrices qui contrôlent ces rythmes sont partagés par de très nombreuses espèces à la surface terrestre. L'observation de coupes de cerveau de drosophiles permet en effet, grâce à un marquage fluorescent, de localiser les neurones qui expriment le gène *per* (pour période) et de voir comment ils sont affectés chez les mutants dont le rythme d'activité est perturbé. On connaît aujourd'hui une dizaine de gènes que l'on retrouve chez l'homme et la drosophile, ce qui montre que l'horloge biologique est une fonction déjà présente chez de très lointains ancêtres, communs aux êtres vivants actuels. Les recherches sur la drosophile permettent de mieux comprendre les mécanismes physiologiques et génétiques qui contrôlent l'activité des organismes et d'étudier les facteurs à l'origine de perturbations pathologiques ou environnementales (troubles du sommeil, décalage horaire, cancers...).

D'après « *Les horloges du vivant* » par André Klarsfeld, Éditions Odile Jacob, 2009.

Qu'en est-il chez les sportifs de haut niveau ? Sont-ils eux aussi soumis à ces rythmes ? Nous avons étudié l'ensemble des performances des cinquante meilleurs sprinteurs du 100 mètres masculin français, sur l'ensemble de leur carrière, de 14 ans à 38 ans, soit 5 400 résultats : on observe des cycles parfaitement identifiables. La sommation des données montre clairement une augmentation des performances avec le printemps, culminant au début de l'été, moment des grands championnats. Mais est-ce le championnat qui entraîne les meilleurs résultats ou n'est-ce pas plutôt que les dates des compétitions ont été choisies pour que la performance soit la meilleure ? On note après le point culminant de la saison un décrochage important, une autre exponentielle, correspondant aux analyses mathématiques

décrites ci-dessous (Figure 16). Cependant, les variations saisonnières sont légèrement différentes selon le sexe de l'athlète. La phase de décrochage en octobre-novembre est plus marquée pour les femmes (-3 % par mois, contre -2 % pour les hommes).

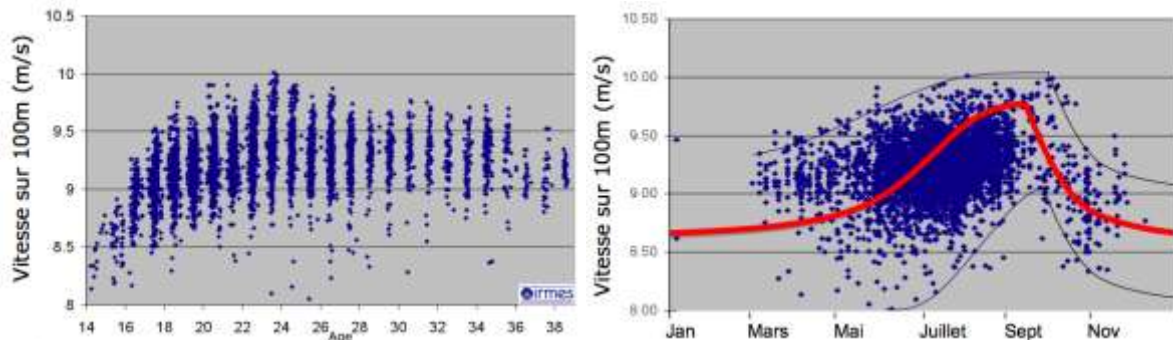


Figure 16 – Évolution des performances des 50 meilleurs sprinters français (5 400 temps de course chronométrés de 2004 à 2009). A) vitesse moyenne sur le cent mètres masculin, rapportées à l'âge de l'athlète ; B) évolution saisonnière de ces sprinters. Toutes les performances sont alors exprimées selon le jour calendaire.

**Fichiers sources à nous fournir**  
**EDP Sciences : ajouter A et B.**

Chez les très grands champions, se superpose au rythme circannuel un rythme quadriennal ultrannuel, le rythme olympique, qui montre dans l'année des Jeux, l'ensemble des performances de l'athlétisme mondial progresse de 1 % suivi d'un recul de 0,4% dans l'année post-olympique, puis à nouveau une augmentation, plus faible, dans les deux années suivantes. Ce cycle se reproduit très régulièrement depuis 1896 (Figure 17).

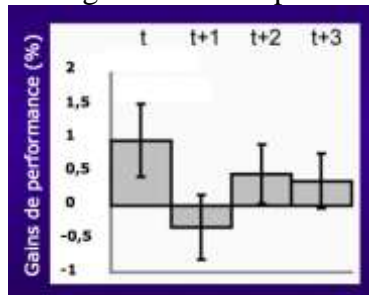


Figure 17 – Rythme ultrannuel quadriennal en athlétisme : on observe un gain de performance selon l'année olympique (année t).

Les outils mathématiques descriptifs mis au point à l'Institut de Recherche bioMédicale et d'Épidémiologie du Sport (IRMES) permettent d'interroger les variabilités de performance en réponse à diverses perturbations (Encart : « **Élaboration d'un modèle de prédiction** »). On observe alors des structures oscillantes, avec une remarquable cohérence entre modèle et réalité. Imaginons que l'on introduise une nouvelle technologie dans une discipline sportive : on observe une augmentation rapide de la performance, après un bref temps d'adaptation et une courbe d'apprentissage qui évolue jusqu'au nouvel état d'équilibre (partie *ON* de la Figure 18). Lorsqu'on supprime la source de la perturbation (partie *OFF* de la Figure 18), les performances diminuent brutalement.

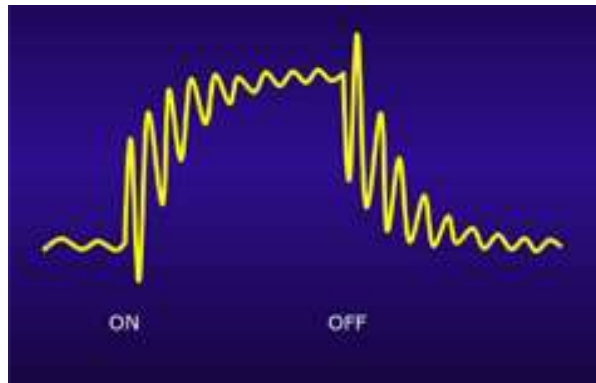


Figure 18 – L'introduction d'une perturbation (phase « *ON* »), telle qu'une technologie nouvelle, induit, après un bref temps d'adaptation et d'apprentissage, une augmentation rapide du niveau, suivie d'une régulation qui conduit à un état d'équilibre. Après arrêt de la perturbation (phase « *OFF* »), la performance diminue brutalement. L'importance de l'effet « *OFF* » est comparable à celui de l'effet « *ON* » avec à chaque fois, augmentation de l'amplitude des variations de la valeur observée avant équilibre, traduisant un accroissement transitoire de la variabilité ou une plus grande volatilité, au sens économique du terme.

### Élaboration d'un modèle de prédiction

Nous avons établi un modèle (Figure 19) afin de déterminer l'évolution des records du monde. Ce modèle repose sur une équation exponentielle à deux paramètres :

$$\text{record}_t = \Delta_{WR} \cdot \exp^{(-a \cdot t)} + b$$

- d'une part, chaque période est modélisée par une équation exponentielle qui atteint une limite, matérialisée par l'asymptote ;
- d'autre part, le coefficient de détermination  $r^2$  permet d'évaluer la qualité d'ajustement du modèle aux données. Plus le modèle est ajusté, plus le coefficient de détermination  $r^2$  est proche de 1.

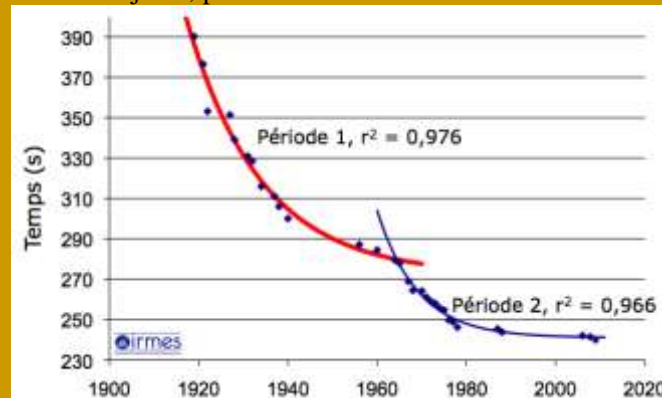


Figure 19 - Modélisation de l'évolution des records du monde du 400 mètres nage libre féminin.

Le modèle s'ajuste particulièrement bien aux données puisque les coefficients de détermination  $r^2$  obtenus sont proches de 1 ( $r^2_{P1} = 0,976$  et  $r^2_{P2} = 0,966$ ).

Ce modèle est utilisé dans un algorithme à trois étapes (Figure 20) :

- le modèle est utilisé entre le premier et le dernier record. Les variations du coefficient de détermination  $r^2$  automatisent le découpage en périodes, le but étant de distinguer les principales évolutions au cours d'une même époque ;
- le modèle est ajusté aux records du monde ;
- La date  $t$  est estimée par l'équation inverse à  $1/2000^{\text{ème}}$  de l'asymptote. Cette date estimée donne la limite de l'espèce humaine dans cette épreuve. Concernant la limite atteinte par épreuve, on s'aperçoit que 13 % des épreuves ont déjà atteint leurs limites. On estime par ailleurs que, dans vingt ans, 50 % des épreuves ne seront plus battables qu'à  $1/2000^{\text{ème}}$  de leur valeur maximale.

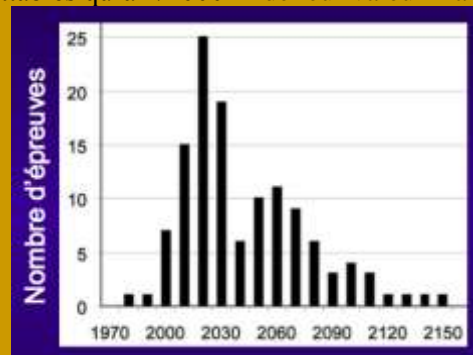


Figure 20 – Modèle de prédiction de la stagnation des records dans les épreuves olympiques d'athlétisme, natation, cyclisme sur piste, patinage de vitesse et haltérophilie. La non amélioration d'un record est établie lorsque celui-ci atteint 99,95 % de la valeur asymptotique calculée. Le nombre total d'épreuves arrivant à leur maxima est quantifié pour chacune des années où cet événement se produit. L'analyse des dix meilleurs athlètes mondiaux, et non plus du seul recordman, semble indiquer que ces frontières pourraient être atteintes encore plus tôt.

Si les conditions de compétition et de la physiologie humaine demeurent, 50 % des épreuves ne seront plus perfectibles au-delà d' $1/2000^{\text{ème}}$  d'ici vingt ans. Nous allons donc assister à une raréfaction des records. À terme, la notion même de « course au record » risque de se déprécier fortement.

Cela nous amène à relativiser la pérennité de la devise olympique « *plus vite, plus fort, plus haut* ». Par ailleurs, on peut se demander s'il ne serait pas judicieux de modifier les objectifs olympiques et de s'orienter vers une valorisation des luttes entre athlètes plus que vers des performances pures. Enfin, si cette course aux records est maintenue, allons-nous observer un désintérêt progressif des media pour ces disciplines, notamment celles touchées par le dopage ?

D'après Geoffroy Berthelot, *Épidémiologie de la performance : 1896-2008, la fin du citius*. Extrait du 2<sup>e</sup>



L'effet des combinaisons sur la natation mondiale est particulièrement significatif. Le port de la combinaison a été instauré pour diminuer la traînée hydrodynamique et réduire les microturbulences autour de la surface cutanée, de même que les macroturbulences par un effet de compression très important sur la poitrine, les fesses et le dos. Il en résulte une pénétration dans l'eau beaucoup plus efficace en particulier dans les phases non nagées : au moment du plongeon ou juste après le virage (voir aussi les [Chapitres de D. Masseglia](#) et de [F. Roland](#), qui donnent de nombreux exemples d'introduction de nouvelles technologies dans le sport).

Or le nombre de records établis au cours des trois dernières olympiades (Sydney, Athènes et Pékin), comparé à l'ensemble des records battus au cours des précédentes, montre une augmentation significative qui ne semble due qu'à un seul paramètre : l'introduction de la combinaison en natation. Il est en effet possible d'en mesurer l'effet, en ne dénombrant que *i*) les records battus dans les disciplines autres que la natation et *ii*) les records établis en natation où les nageurs n'ont pour autant pas utilisé de combinaison (la plupart à Sydney, très peu à Athènes, aucun à Pékin). On constate alors que les records du monde établis aux Jeux Olympiques en 2000, 2004 et 2008 dépendent pour deux tiers d'entre eux du seul paramètre « combinaison ». Isoler aussi nettement l'impact d'un seul paramètre est, en épidémiologie, tout à fait exceptionnel.

La [Figure 21](#) illustre ainsi la chute impressionnante du temps du record du monde du 50 mètres nage libre masculin : Alexander Popov, dernier nageur en maillot de bain l'établit en 21,64 secondes en 2000. Eamon Sullivan sera le premier à l'améliorer en combinaison en janvier 2008. Il sera suivi d'Alain Bernard en 21,50 secondes ; Sullivan établit un nouveau record en août 2008, Frédéric Bousquet en avril 2009 et enfin Cesar Cielo en 20,91 secondes le 18 décembre 2009. La progression de la performance a été, en moins de deux ans, strictement équivalente à celle observée au cours des vingt-cinq années précédentes.

Les combinaisons en polyuréthane 100 % constituent par ailleurs un cas très particulier de l'introduction d'une innovation technologique. Elles ont été autorisées en février-mars 2009, suspendues en avril-mai 2009, puis réintroduites pour les championnats du monde en juillet à Rome, ce qui avait entraîné une polémique mondiale, avant d'être (définitivement ?) interdites en janvier 2010. Les résultats sont remarquables : début 2009, la combinaison est acceptée, les performances mondiales progressent de 1,6 %. En avril et mai, elles sont refusées temporairement, les performances reculent de la même valeur. Elles sont à nouveau acceptées pour les championnats du monde et toute une série de records impressionnants est établie à ce moment-là.

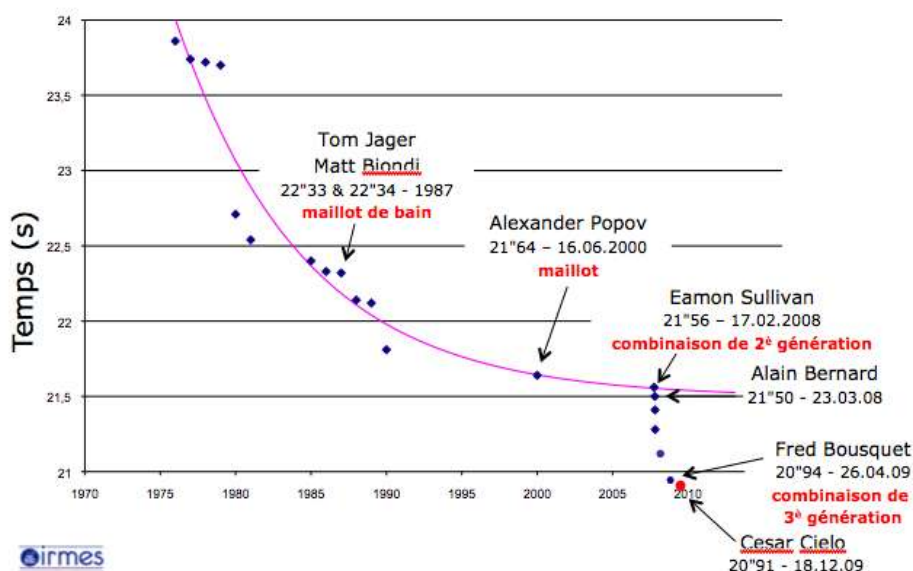


Figure 21 – Au 50 mètres nage libre masculin, l'introduction de la combinaison a créé une avancée considérable à partir de 2008. Le meilleur temps de la saison 2010 est de 21,36 secondes, par F. Bousquet, en recul de 2,1 % par rapport au record de C. Cielo. Photo : Frédérick Bousquet (en combinaison rouge, ligne d'eau numéro 3) au départ de la finale du 50 mètres nage libre des championnats de France le 26 avril 2009. Il remporte la course en réalisant un nouveau record du monde en 20,94 secondes.

Et ensuite ? Sur la base des modèles évoqués précédemment, le recul de 1,4% (chez les femmes) à 1,8% (chez les hommes) des temps réalisés par les dix meilleurs nageurs mondiaux au cours de la saison 2010 est en parfait accord avec les prévisions. Cette situation n'est pas toujours bien vécue par les champions : Frédérick Bousquet en octobre 2009 déclarait son malaise, sa honte même, d'être obligé de nager « quasiment nu ». L'impact de la combinaison était donc ressenti comme extrêmement puissant. Béquille technologique aussi bien que mentale, ces outils hautement élaborés étaient un appui dont les sportifs doivent apprendre à se passer. Les résultats de l'équipe de France aux championnats d'Europe en août 2010 à Budapest (1<sup>ère</sup> nation européenne malgré des performances en recul de 1,7 %) montrent que l'on peut anticiper avec brio ces reflux et leur impact psychologique.

#### 4. Cycle vital : croissance et décroissance exponentielles

La vie, que l'on traite du transfert d'énergie, du système circulatoire ou respiratoire, ou à un échelon plus complexe, celui de l'occupation de l'espace, de la durée de vie d'une cellule unique ou de l'organisme entier, voire de l'espèce, ne peut être décrite par les équations classiques. Il a fallu l'invention, par le polytechnicien français Benoît Mandelbrot, d'une nouvelle branche des mathématiques et d'une nouvelle notion, *la dimension fractale* (nombre non-entier) d'un objet ou d'un système complexe, pour approcher, dans une multitude de domaines d'applications, la modélisation et la compréhension de ces phénomènes (**Encart** : « **Le génie mathématique de Mandelbrot, ou la régularité dans l'irrégularité** »).

##### **Le génie mathématique de Mandelbrot, ou la régularité dans l'irrégularité**

Le grand mathématicien français, Benoît Mandelbrot (**Figure 22**), lauréat de très nombreux prix internationaux, a révolutionné la science en inventant la notion de **fractale**, d'abord dans le domaine de l'économie. L'idée fondamentale exprime le fait que le cours d'une bourse sur une journée ressemble à celui sur une semaine, sur un mois ou une année : en d'autres termes, la forme mathématique correspondante reste identique à des échelles différentes.

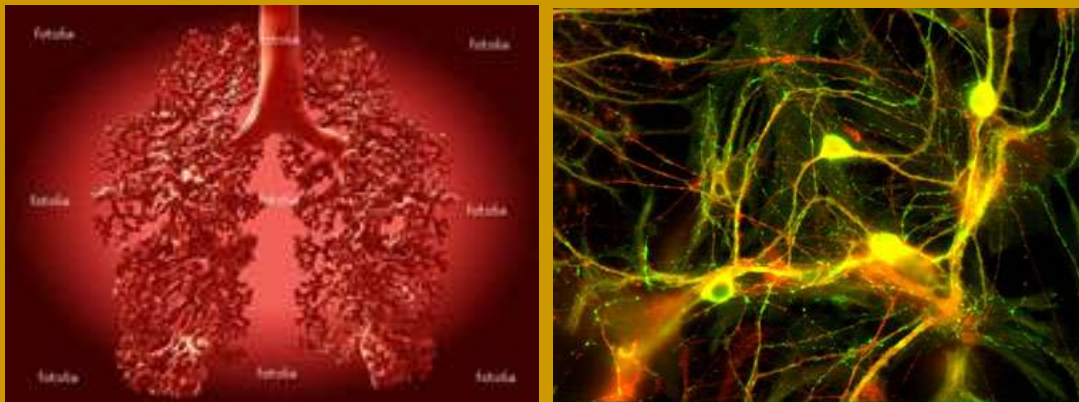
Cette notion constitue une branche nouvelle des mathématiques, avec des applications dans toutes les sciences, physiques, chimiques, biologiques. Elle traite de la science des objets qu'on pourrait qualifier de bizarres, ceux que les mathématiques classiques ne pouvaient approcher, et décrit aussi bien les crues du Nil, la forme des nuages et des arbres comme celle des poumons ou l'urbanisme des villes (**Figure 23**). Dans ces cas, et contrairement à la prédiction statistique classique qui prévoit une égalisation par la loi des grands nombres (c'est-à-dire une certaine forme de « bon sens macroscopique »), les aléas ici ne s'annulent pas mais s'additionnent. L'essentiel des phénomènes naturels obéissent à cette forme de hasard que nous avons encore du mal à concevoir malgré des applications graphiques qui génèrent un monde de géométries complexes, bien loin de la finance, d'une étonnante beauté. Quelques applications dans le domaine musical ont même été tentées.



Figure 22 – A) Benoît Mandelbrot, père des fractales. B) Fractales dites de Mandelbrot.  
**EDP Sciences : ajouter A et B aux figures.**



Figure 23 – Nuages, arbres, vagues,... les fractales sont présentes partout dans la nature... Partons en Bretagne et contemplons rochers et vagues de l'île d'Ouessant, en Bretagne : on retrouve, en haut du petit rocher du premier plan, une structure analogue à celle du gros rocher sur lequel la vague vient se fracasser.



...et chez le vivant aussi. À gauche : poumon. À droite : neurones d'hippocampe de souris.

L'exemple le plus fameux est celui de la côte de Bretagne, dont la longueur dépend de l'échelle à laquelle on la mesure, et qui possède une dimension, dite de Hausdorff, non-entière, entre 1 et 2. La longueur de cette côte, différente de sa dimension, est en toute rigueur infinie. Et nous devons désormais accepter cette idée d'une dimension non-entière comme nous avons accepté celle de nombre imaginaire. Les multiples exemples où s'applique sa théorie ont en commun ce que Benoît Mandelbrot nomme d'abord une homothétie ou invariance d'échelle, et plus tard autosimilarité. Cette propriété s'explique par le fait que toute image fractale est engendrée par un processus d'itération théoriquement infini.

Le concept de fractale n'est pas identique mais approche parfois celui de chaos. Dans les deux cas, il n'est pas possible connaissant deux points, même très proches, d'interpoler la valeur exacte ou même approchée d'un point intermédiaire. Ce point peut, en réalité, se situer n'importe où. C'est évident, dans le cas de la côte de Bretagne, puisque pour 2 points distants de 2 km, un point situé à mi-distance peut se trouver sur un promontoire, dans un golfe, mais pas du tout sur la côte.

Le concept de fractale, conçu pour décrire les phénomènes naturels ou créés par l'homme, a permis de les appréhender et de les comprendre, comme la structure de l'univers, la modélisation des plantes (L-systèmes), la mise en évidence de certaines pathologies cérébrales. Il a permis de les modéliser avec un réalisme parfois surprenant, comme dans les études des performances sportives et leurs perturbations par des innovations technologiques.

« Je n'ai vu qu'un arbre, un seul, mais je l'ai vu.  
Je connais par cœur sa ramure touffue,  
et ce tout petit bout de branche me suffit.  
Pour connaître une feuille, il faut toute une vie. »  
Georges Brassens

La représentation fractale dite autosimilaire s'applique notamment à l'ordonnement des événements, aux phénomènes de croissance et de décroissance, que nous avons évoqués en examinant l'effet des perturbations, et peut expliquer des relations *a priori* inattendues.

Le cycle vital est en effet le même pour tous : la progression individuelle est très rapide au cours de l'enfance puis de l'adolescence, culmine aux alentours de vingt-cinq ans, puis décroît jusqu'à atteindre la limite de notre propre vie. La relation performance/espérance de vie peut être modélisée par une relation simple : une double exponentielle, croissante puis décroissante (Figure 24A). Or il existe un lien extrêmement fort entre la performance de l'espèce et son espérance de vie. La Figure 24B montre ce que peut être une « courbe d'espèce ». Elle décrit les records du monde du 100 mètres féminin en fonction de l'âge des championnes. Sur cette courbe, se trouvent aussi bien le record de Florence Griffith-Joyner (actuelle détentrice du record du monde) que celui de la coureuse la plus âgée, 85 ans, courant dans les masters (dans ce cas à Sydney en octobre 2009). Le prolongement de la courbe permet d'estimer la durée maximale de vie de l'espèce humaine de sexe féminin à 120 ans. Or le record officiel est bien celui de Jeanne Calment, décédée en 1997 à l'âge de 122 ans, bien proche des 120 ans issus des calculs. Cette même corrélation se retrouve sur le 1 500 mètres, le 5 000 mètres, le 10 000 mètres, le saut en hauteur masculin et féminin, en natation (avec une championne de 98 ans, Margot Bates, à Sydney en 2009)... La modélisation suit donc parfaitement les capacités globales de notre espèce dans l'ensemble des domaines de la performance physiquement mesurable.

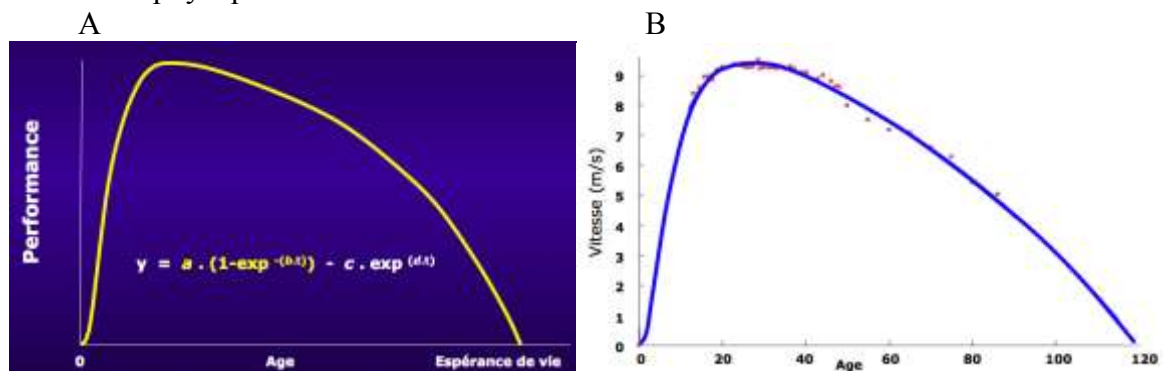


Figure 24 – A) Normes théoriques de progression individuelle. Les coefficients a, b, c et d modulent les deux exponentielles. B) Records du monde selon l'âge sur le 100 mètres féminin. Courbe d'espèce.

**EDP Sciences : ajouter A et B**

Grâce à cette courbe de potentiel maximal, il est possible d'extrapoler, pour chaque athlète, ce que seront ses performances au cours des prochaines décennies, en l'absence de pathologie ou d'accident (Figure 25). Dans le cas du 50 mètres nage libre, cette approche permet de prédire la vitesse théorique de nage d'Alexander Popov à 60 ans (courbe noire) ou de Thomas Jager (courbe bleu foncé). Il faut noter qu'un athlète peut généralement établir un ou deux records du monde, mais qu'il est exceptionnel d'en réaliser davantage (Serguei Bubka, au saut à la perche, étant l'un des rares contre-exemples). À partir des points

maximum individuels, il est enfin possible, pour une épreuve sportive donnée, de prévoir l'évolution future des records de cette discipline (courbe rouge). On conçoit bien ainsi la contribution individuelle à l'ensemble. Dans la plupart des sports cette dernière courbe des maxima tend actuellement vers une asymptote.

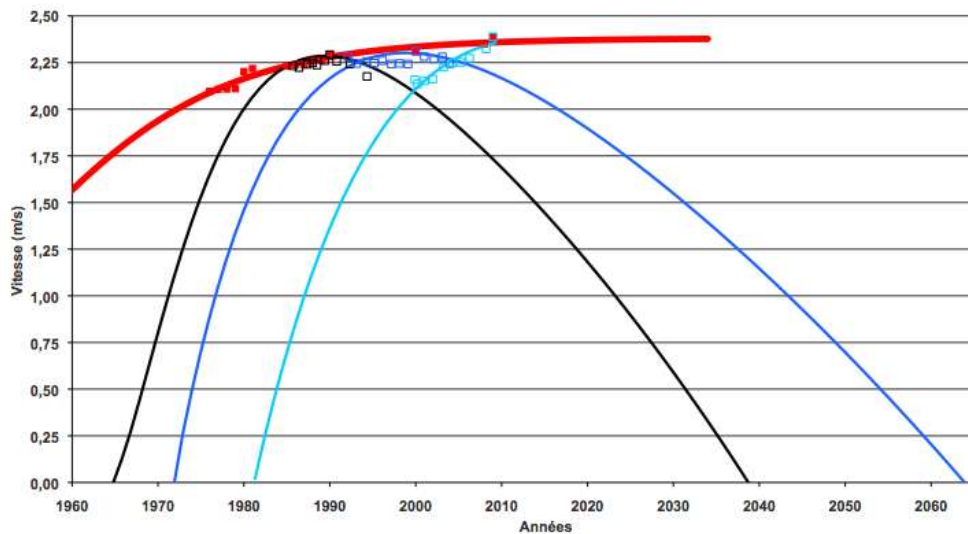


Figure 25 - Records du monde du 50 mètres nage libre masculin (vitesse moyenne mesurée sur 50 mètres lors de chaque course). Contributions individuelles de A. Popov (courbe noire), T. Jager (courbe bleu foncé) et F. Bousquet (courbe bleu clair) à la courbe de progression générale de l'espèce (courbe rouge).

## 5. Contexte de la performance et évolution

### 5.1. Raisons du dépassement

L'Hybris prométhéenne est ce besoin constant chez l'homme de toujours tenter de s'élever au-dessus de sa condition, de se mesurer aux Dieux (voir le [Chapitre d'I. Queval](#)), ce que le philosophe Gaston Bachelard désignait comme un complexe d'Œdipe intellectuel, le « *savoir plus que nos pères* ». La science et la technologie, qui ont décuplé nos connaissances aux XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles, résultent elles aussi de cet insatiable besoin de compréhension, cherchant à résoudre les questions qui n'ont pas obtenu de réponse. C'est d'ailleurs bien sur ce principe que fonctionne la recherche, posant dix questions nouvelles pour chaque réponse obtenue, ouvrant et enrichissant constamment la question initiale. Cette règle ne serait-elle pas un principe vital ?

### 5.2. Fondements de la maximisation et optimisation des rendements

Les records du monde sont l'expression de la physiologie de l'extrême et des limites de l'espèce humaine. Une étude menée par l'IRMES a porté sur 3 263 records recueillis dans 147 épreuves relevant d'un total de cinq disciplines de force et de vitesse ([Figure 26](#)). La fréquence annuelle du nombre des records mondiaux cumulés depuis 1896 (premiers Jeux) montre l'impact des deux conflits mondiaux, et celui, transitoire et moindre, de la grande crise économique des années 1930. Après une forte augmentation au sortir de la seconde guerre mondiale, les records se raréfient à partir de 1968. Cette très nette régression, malgré le développement du dopage dans l'ensemble des pays, n'est liée à aucun événement majeur. La décroissance semble inéluctable, en dépit d'un petit rebond récent lié à deux phénomènes : l'introduction de la combinaison de natation d'une part, et d'une nouvelle discipline, l'haltérophilie féminine, d'autre part.

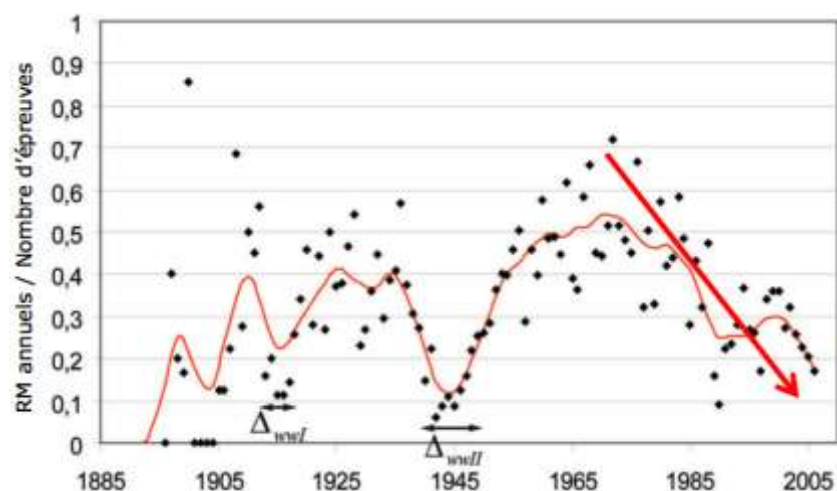


Figure 26 – Nombre de records du monde établis chaque année rapporté au nombre d'épreuves olympiques officielles. Ce rapport est conditionné par les limites génomiques et environnementales de l'espèce humaine. Il est en constante régression depuis 40 ans. wwI : Première Guerre mondiale ; wwII = Seconde Guerre mondiale.

Par ailleurs, l'écart entre les hommes et les femmes au niveau des performances est stable, aux alentours de 10 %, pour l'ensemble des disciplines depuis presque trente ans. En effet, les courbes de performance pour les deux sexes ont évolué de façon parallèle atteignant leur asymptote en même temps. Le 400 mètres nage libre féminin est un bon exemple de la pertinence des modèles de prédiction (voir l'**encart : « Élaboration d'un modèle de prédiction »** et **Figure 27**). Comme précédemment, on constate deux périodes d'évolution : avant et après 1965. Ce graphique montre aussi que l'évolution du record du monde de cette épreuve, comme toutes les autres disciplines féminines ou masculines, suit une courbe bi-exponentielle.

La raréfaction des records depuis près de 30 ans, avec des gains relatifs faibles (aucun record battu au cours de la décennie précédant Laure Manaudou en 2007 et Federica Pellegrini en 2008 et 2009, toutes deux en combinaison) est également évidente sur ce graphique. La même tendance se retrouve dans tous les sports, avec parfois l'apparition de phénomènes inattendus. Depuis 25 ans, la courbe du lancer du poids féminin montre ainsi un recul de 7 % des performances des 10 meilleures athlètes mondiales, depuis l'époque où cette discipline était largement dominée par les athlètes des pays de l'Est, dont les protocoles de dopage sont mis à jour par la publication des archives de la Stasi. Cela suggère qu'après la période de guerre froide et ses courses effrénées à l'armement, à l'espace ou aux records sportifs, soit les athlètes se sont désinvestis, ce qui est peu probable, soit ils utilisent désormais un peu moins de ce qui était injecté à l'époque. En athlétisme, et malgré l'apport de molécules (EPO recombinante) ou de protocoles nouveaux (microdoses répétées), 70 % des épreuves ne progressent plus depuis vingt ans (**Figure 28**).

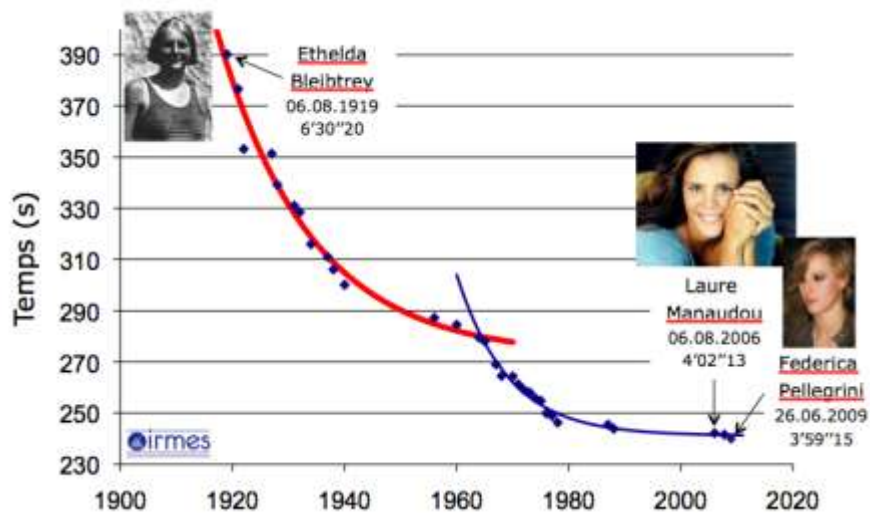


Figure 27 – Évolution des performances sur le 400 mètres nage libre féminin.

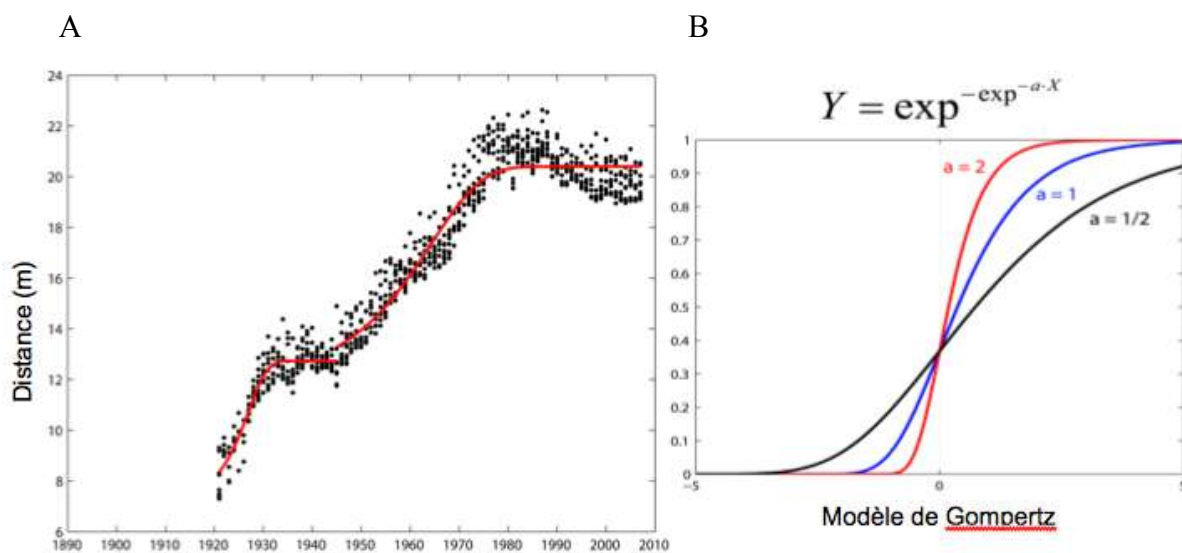


Figure 28 – Évolution (A) et modélisation selon le modèle de Gompertz (B) de l'évolution des performances au lancer du poids féminin.

EDP Sciences : ajouter A et B

### 5.3. Limites physiologiques et luttes contre la stagnation

Dans les années qui suivent la chute du mur de Berlin, de nombreux entraîneurs est-européens s'installent en Chine. Alors que le record du monde du 3 000 mètres féminin est établi depuis dix ans, et que les meilleures performances fluctuent peu chaque année, autour d'une moyenne stable, cinq performances vont surpasser l'ancien record du monde. Elles sont toutes établies le même jour, au même endroit, lors de la même épreuve : cinq athlètes chinoises vont en effet battre ce record en une course, ce qui ne s'est jamais vu dans cette discipline ni dans aucune autre épreuve depuis 1896 et ne se verra plus depuis. Comment expliquer l'apparition brutale d'une physiologie aussi atypique ? S'agirait-il d'une progression généralisable, quoique surprenante, à l'ensemble de l'espèce ? La réalité est bien plus prosaïque et la suite des événements montrera une autre tendance puisque des phénomènes analogues se reproduiront en 1994 en natation, en 1997 sur le 1500 mètres féminin avec neuf athlètes chinoises parmi les dix meilleures mondiales puis avec l'exclusion de l'ensemble des équipes masculines d'aviron ou féminine de demi-fond russes avant les Jeux de Pékin.



Ponctuellement, des pratiques illicites, qu'on pourrait qualifier de « dopage technologique », peuvent avoir des impacts très forts, que le bon sens permet parfois de suspecter mais que confirme maintenant la mesure de leur degré d'atypicité. Ce n'est pas sans danger vital pour l'athlète. Même une course phare comme le 100 mètres féminin, à évolution régulière selon la double exponentielle déjà connue, arrive à une limite, un plancher, autour de 10,9 secondes. Il n'y a, depuis vingt ans, quasiment plus de progression des dix meilleures athlètes mondiales. Reste néanmoins un point singulier, hors norme, aberrant, celui de Florence Griffith-Joyner. Ce ne fut pas son seul exploit, puisque la même année 1988 à Séoul, elle établit un record du monde du 200 mètres tout aussi étonnant, et toujours officiellement valable. Elle décéda subitement en 1998 d'une cause non élucidée mais dont le lien avec l'hypertrophie musculaire, et possiblement cardiaque, dont elle avait fait preuve dans les mois précédant ces records a toujours laissé la marque d'une grande ambiguïté (Figure 29).

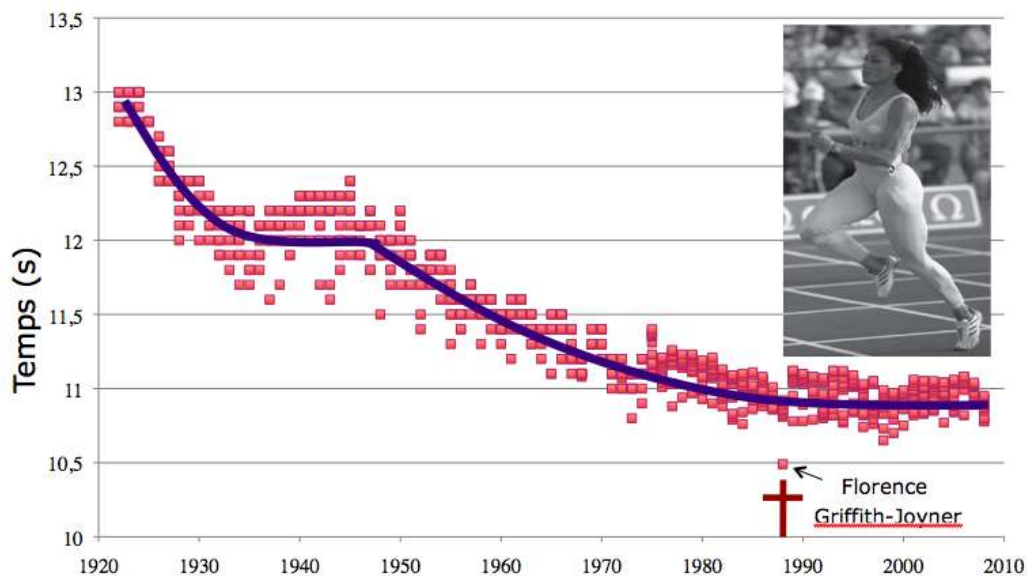


Figure 29 – L'évolution des performances sur le 100 mètres féminin est régulière et suit une double exponentielle comme le prédisent les modèles mathématiques. La performance hors norme de 1988 (record toujours considéré comme valide en 2010) est réalisée par Florence Griffith-Joyner. L'hypertrophie musculaire dont elle avait fait preuve, à la même période et dans les mêmes proportions que Ben Johnson, et surtout son décès prématuré en 1998, avait nourri de très forts doutes sur un dopage, pour l'instant non prouvé, à l'origine de ces performances.

## 4. Performances et génétique

L'homme serait-il une espèce particulière, finalement peu représentative, au sein du biotope, du monde vivant colonisé et modelé par lui ? Le monde animal, lorsqu'il est face à une demande analogue, lorsqu'on lui demande un comportement d'« athlète », conforte-t-il les résultats présentés ci-dessus ? En quoi la sélection, les croisements soigneusement documentés et mis en œuvre par les éleveurs, changent-ils la nature de ces résultats ? Le monde végétal peut-il avoir sa place dans cette étude générale du vivant, de ses performances et de leur évolution dans le temps ?

### 4.1. Chevaux et lévriers

Partons des trente courses les plus cotées dans le monde (Derby d'Epsom, prix d'Amérique, etc.) ; considérons les dix meilleurs chevaux ayant participé chaque année à ces

courses. Leurs records s'organisent sur une exponentielle simple, comme nous en avons déjà vu, mais évidemment sans les décrochages marqués des deux guerres mondiales (Figure 30).

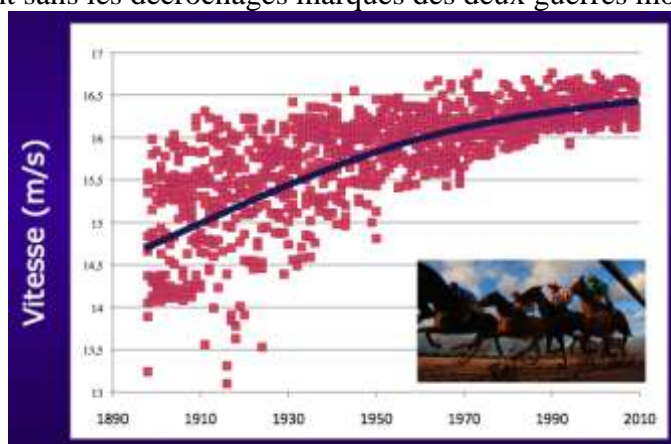


Figure 30 – Les dix chevaux les plus rapides sur les trente premières courses mondiales.

Les lévriers ont la particularité de constituer un groupe homogène. Courent des lévriers irlandais, américains, australiens souvent issus des mêmes géniteurs. À partir des 25 principales courses et des performances des 10 meilleurs lévriers, on observe la même évolution exponentielle. De plus l'asymptote est atteinte en même temps que chez l'homme ou le cheval. Avec des paramètres, des coefficients un peu différents, la progression et les plafonds de chaque courbe surviennent de façon tout à fait comparable pour chacune des trois espèces (Figure 31).

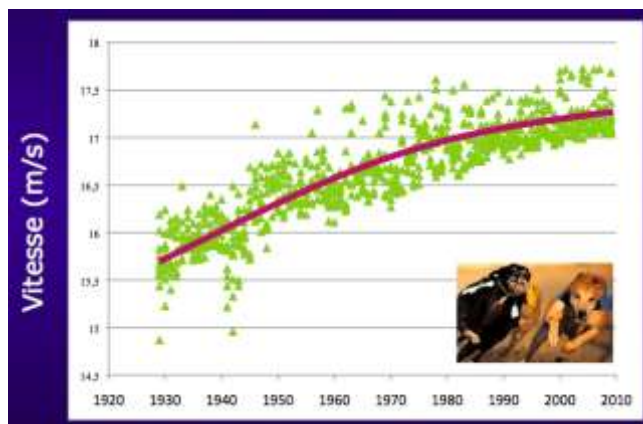


Figure 31 – Les dix meilleurs lévriers, sur les vingt-cinq premières courses mondiales.

## 4.2. Rendements agricoles

Malgré une utilisation extensive des engrais, une des plus importantes du monde, les rendements céréaliers en France ne progressent plus que très lentement depuis 10-15 ans. Leur évolution suit également une mono-exponentielle, quelle que soit l'espèce étudiée, à l'exception du maïs (Figure 32). La première cause de cette stagnation démontrée en 2010 par l'INRA est l'élévation des températures en fin de printemps. À l'échelle mondiale, le riz, dont dépend la nutrition d'une partie très importante de l'humanité, suit une courbe analogue, qu'il s'agisse du rendement par hectare ou de la production par tête.

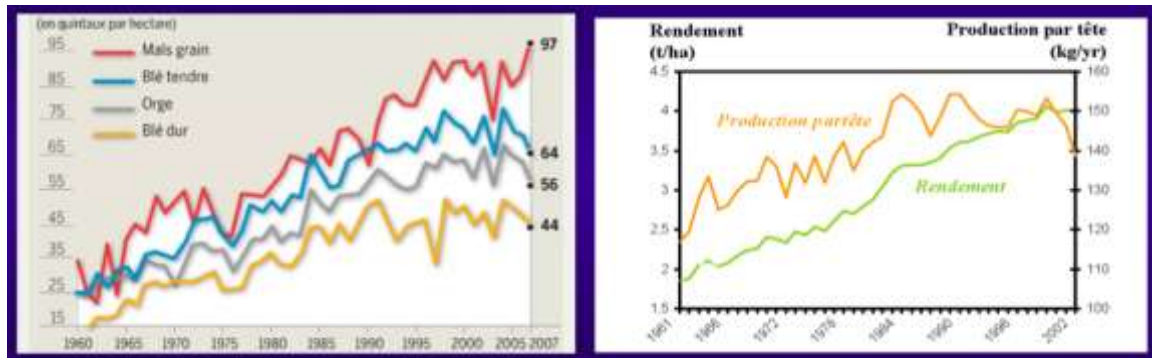


Figure 32 – Les rendements céréaliers du blé (A) en France et ceux des rizières (B) stagnent depuis plusieurs années.

EDP Sciences : ajouter A et B

La fin de la maximisation des rendements pour nos espèces asservies est donc d'une brûlante actualité. Espèces proches de l'homme, chien, cheval, ou espèces végétales, dont dépend notre alimentation, toutes posent la question de leur optimisation future.

#### 4.3. Évolution de la biométrie humaine : taille et espérance de vie

La taille moyenne de l'homme a-t-elle évolué, comme semblent en témoigner les armures de nos ancêtres au Moyen-Âge ? L'évolution séculaire de la taille humaine (Figure 33) montre que la courbe observée pour la France et la Grande-Bretagne est étonnamment régulière. L'augmentation de la taille est rapide au début du XIX<sup>e</sup> siècle, et atteint un plafond dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle.

Notre espérance de vie (INSEE, janvier 2010) a également connu une progression rapide, en particulier au cours de la décennie suivant la Seconde Guerre mondiale, avec un gain de six mois par an. Une érosion progressive du gain annuel est ensuite notée pour atteindre, dans les trois dernières années, une augmentation d'un mois par an seulement pour les femmes françaises (espérance de vie actuelle : 84,5 ans), et de 2 mois par an pour les hommes (77,8 ans). Ce ralentissement, particulièrement net concernant la durée de vie moyenne des Françaises suit, lui aussi, une loi mathématique exponentielle. L'espérance de vie en France (en bleu, Figure 34), une des plus élevées des pays développés, ou aux États-Unis (en rouge, Figure 34), suit le même ralentissement que celui qu'indique la moyenne mondiale (c'est-à-dire approximativement la moyenne actuelle de l'espèce humaine).<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Toussaint J.F., Swynghedauw B. (2010). Croissance et renoncements : vieillir à l'épreuve du temps. *Esprit*, 366 : 60-74.

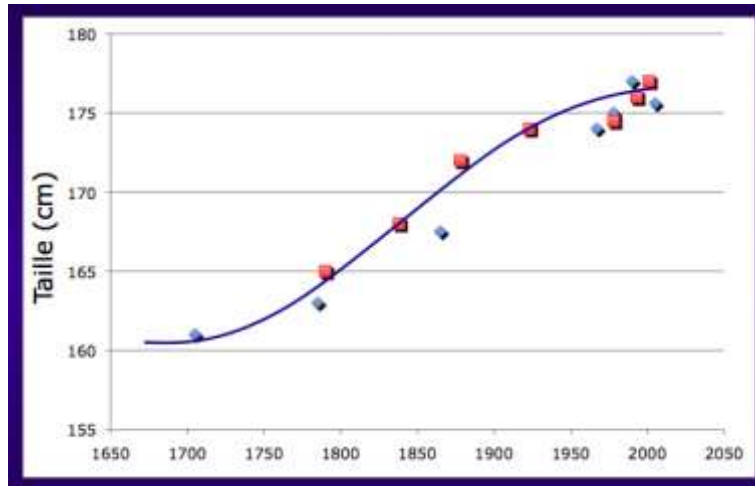


Figure 33 – Évolution séculaire de la taille masculine en France et en Grande-Bretagne.  
**EDP Sciences : ajouter légende : Losanges bleus : Taille en France ; carrés rouges : Taille en Grande-Bretagne.**

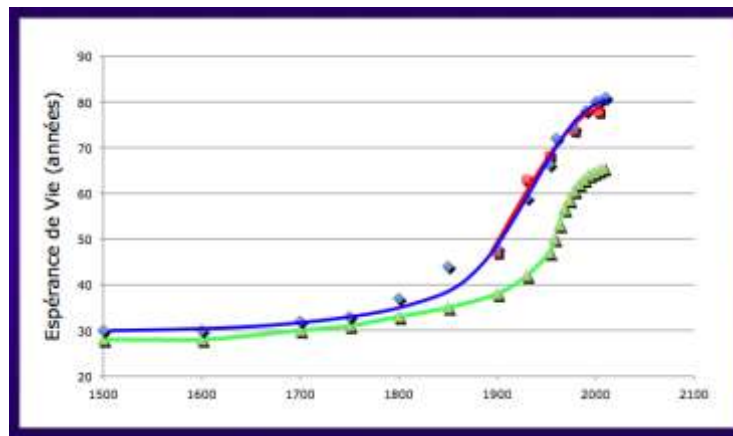


Figure 34 – Évolution séculaire de l'espérance de vie dans le monde : on observe un ralentissement à la fin du XX<sup>e</sup> siècle.

**EDP Sciences : ajouter une légende : losanges bleus : Tailles en France ; carrés rouges : Tailles aux États-Unis ; triangles verts : Tailles dans le monde.**

Une troisième donnée s'intègre dans la même problématique et suit les mêmes lois, celle de l'augmentation du PIB (Figure 35A). Le taux de croissance montre les deux reculs représentant les deux guerres mondiales, avec une courbe de régression linéaire du PIB par habitant. Mais qu'en est-il au niveau mondial, alors que les taux de croissance diffèrent de 1-2 % pour les pays très développés à 8-10 % pour les pays en développement, comme l'Inde ou la Chine ? Ces pays sont en fait encore sur la partie ascendante de leur courbe de croissance ; et, avec notre avance de 50 ans en matière de développement, nous sommes probablement sur l'asymptote, nous plafonnons (Figure 35B).

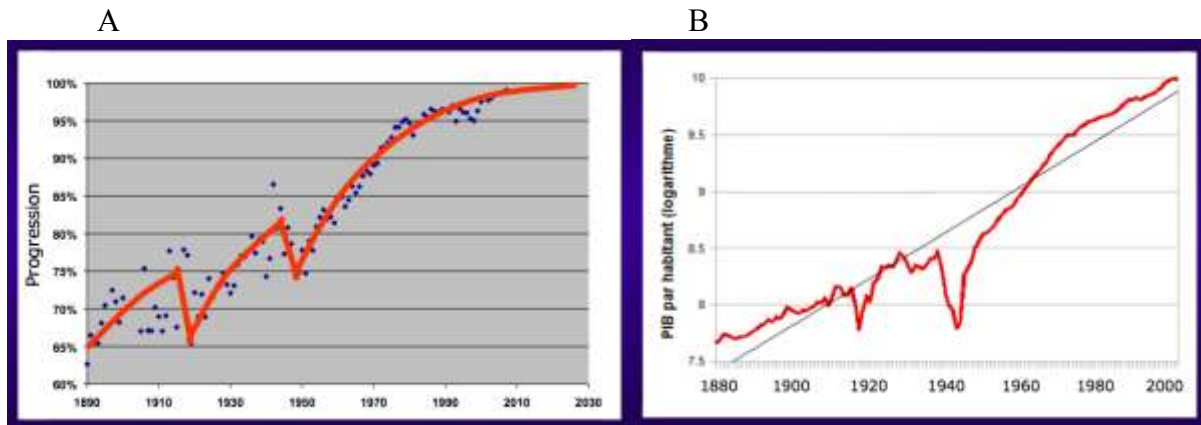


Figure 35 – A) Progression des records du monde en pourcentage de leur valeur asymptotique; B) Le taux de croissance du PIB français montre la même progression avec deux reculs correspondant aux deux guerres mondiales.

**EDP Sciences : ajouter A et B**

Ce qui est vraiment remarquable, c'est que tous ces processus évolutifs, décidément jamais linéaires, s'appliquent à l'ensemble de nos activités, qui semblent évoluer en parallèle. Ces tentatives d'explication, qui ne sont que des mécanismes théoriques intellectuels, s'appuient néanmoins sur les analyses d'une multitude de données complexes. Tous ces processus relèvent d'une même approche, fractale (voir l'encart : « **Le génie mathématique de Mandelbrot, ou la régularité dans l'irrégularité** »).

#### 4.4. Expansion phénotypique

L'impression que l'on retire des études précédentes, records sportifs, taille, espérance de vie, économie, est que l'espèce humaine arrive maintenant dans une période de stagnation, où le ralentissement de sa progression est constaté sur l'ensemble de ses champs d'activité, très divers mais tous caractérisés par des déterminants communs liés au développement. Sur les 200 dernières années, se dessine finalement la réalité d'une expansion phénotypique qui semble culminer au début du XXI<sup>e</sup> siècle : chaque courbe individuelle, comme chacune des courbes d'espèce, épreuve par épreuve, semble atteindre un plafond inexorable (Figure 36), borné par les exponentielles des records de vitesse (courbe rouge) ou d'espérance de vie (courbe bleue).

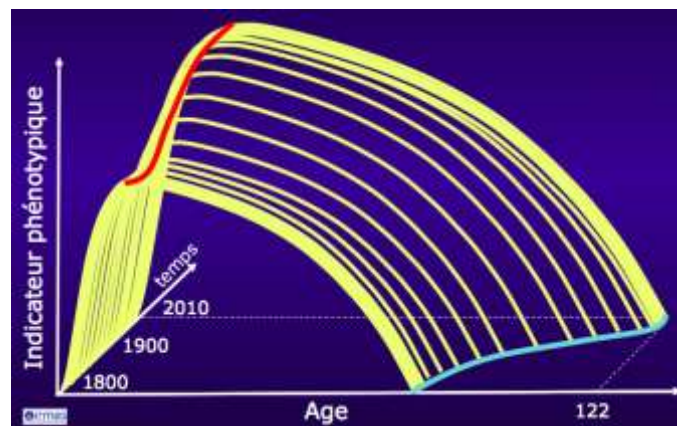


Figure 36 - Évolution du phénotype maximal avec l'âge et le temps. Chaque courbe d'espèce relie les estimations (XIX<sup>e</sup> siècle) ou les mesures (XX<sup>e</sup>) des vitesses maximales atteintes lors des records selon la tranche d'âge. La courbe rouge joint les sommets (pics) des courbes annuelles et constituent la courbe de croissance des records qui tendent vers la stagnation. La courbe bleue joint les maxima de durée de vie humaine qui semblent également stagner depuis 1997 et le record établi par Jeanne Calment.

## 5. Quand la progression atteint ses limites

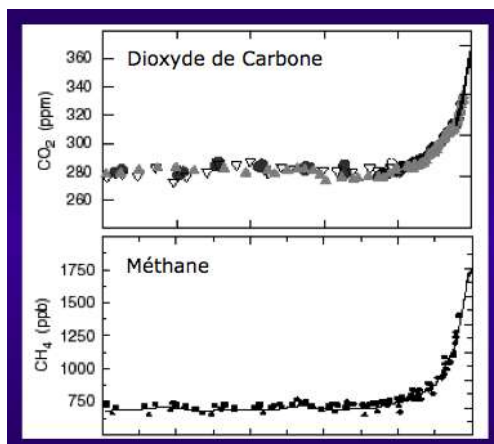
Quelles sont les raisons de ce ralentissement généralisé, de cette limite asymptotique que l'espèce humaine paraît atteindre ? Sont-elles dues à des contraintes endogènes ? Nous n'avons certes pas l'espérance de vie du séquoia, ni la taille de l'orque épaulard, et nous n'atteindrons jamais l'une ou l'autre de ces performances ! Les premières contraintes nous sont propres, d'ordre génétique. Les autres, exogènes, sont également bien connues : empreintes environnementales, pressions démographiques et leurs conséquences sur le partage des richesses, raréfaction des ressources (énergie fossile, eau, minéral, terre cultivable...), recul de la biodiversité, ces questions planétaires se posent aussi en termes d'équilibres entre espèces. Nos impacts sont multiples, sur l'économie, la santé publique, la paix, d'autant plus que, comme le chantait Leonard Cohen (*everybody knows it's moving fast*), on a l'impression que ça avance chaque fois un peu plus vite ces derniers temps.

Il n'est pas inconcevable que la limite patente de nos performances, associée à une augmentation majeure des contraintes externes (qui, elles, pourraient ne pas plafonner avant longtemps), génère une situation qui ne soit plus favorable au développement de notre espèce.

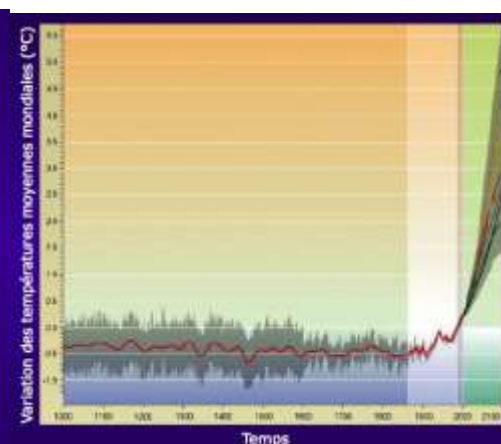
## 6. Interaction avec l'environnement

Paul Crutzen, prix Nobel de chimie, désigne sous le terme d'« anthropocène » la période où l'homme, par son activité, transforme de façon progressive et, peut-être irréversible, son biotope. Certes, l'action de l'homme sur son environnement a toujours été la marque de l'espèce (il s'agit en cela d'un autre principe évolutif, partagé par le vivant). Mais les augmentations régulières du CO<sub>2</sub>, du méthane, du protoxyde d'azote, sont des contraintes fortes, nouvelles, dont le lien avec le développement de l'activité humaine est plus que probable. Cette observation nous ramène à la question de l'énergie, aussi bien celle produite au sein d'une mitochondrie (voir l'encart : « La contraction musculaire »), combustion du glucose productrice de CO<sub>2</sub>, que celle de notre utilisation des énergies carbonées, qui sont du même type dans tout moteur à explosion. La similitude des courbes de la concentration en gaz à effet de serre, de l'augmentation de la température mondiale au cours du dernier millénaire et de notre consommation énergétique (dont 90 % provient des énergies fossiles) est frappante (Figure 37).

A



B



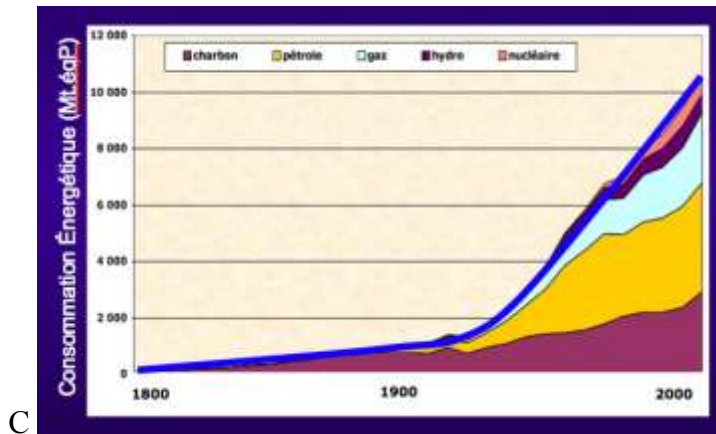


Figure 37 - Évolution comparée de la concentration atmosphérique de deux gaz à effet de serre, dioxyde de carbone et méthane (ppm : particule par million) (A), de la variabilité de la température terrestre montrant l'élévation séculaire récente et scénarisant les possibles futures variations (B) et de la consommation énergétique mondiale (Mt.éqP : Millions de tonnes équivalent Pétrole) (C).

EDP Sciences : ajouter A, B et C

La corrélation entre l'énergie que nous consommons et nos gains, d'espérance de vie, de qualité de vie, de soins, paraît donc tout à fait légitime. Ce lien est également manifeste dans le doublement de certaines de nos capacités (voir la Figure 35) par rapport à celles de l'humanité d'il y a deux siècles. Elle pose, en conséquence, la question de nos capacités maximales.

Pour mesurer l'impact de l'environnement sur la performance, on peut, à titre d'exemple, analyser l'ensemble des marathons mondiaux pour les plus importants depuis 1975 et depuis 1892 pour celui de Boston. Deux millions de données sont disponibles maintenant. La relation entre le temps du vainqueur et la température ambiante suit une parfaite courbe en U, avec un optimum à 10-11 °C (Figure 38). Même pour un cas individuel, celui du coureur de fond éthiopien Haile Gebreselassie, deux fois recordman du monde, en 2007 et 2008, cette relation persiste : lorsqu'il a à nouveau tenté de battre son record en 2009, la température extérieure de 18°C (5 °C de plus qu'en 2008), lui fait perdre deux minutes soit 2 % de plus que son temps de l'année précédente, obtenu pour une température très proche de l'optimum théorique calculé.

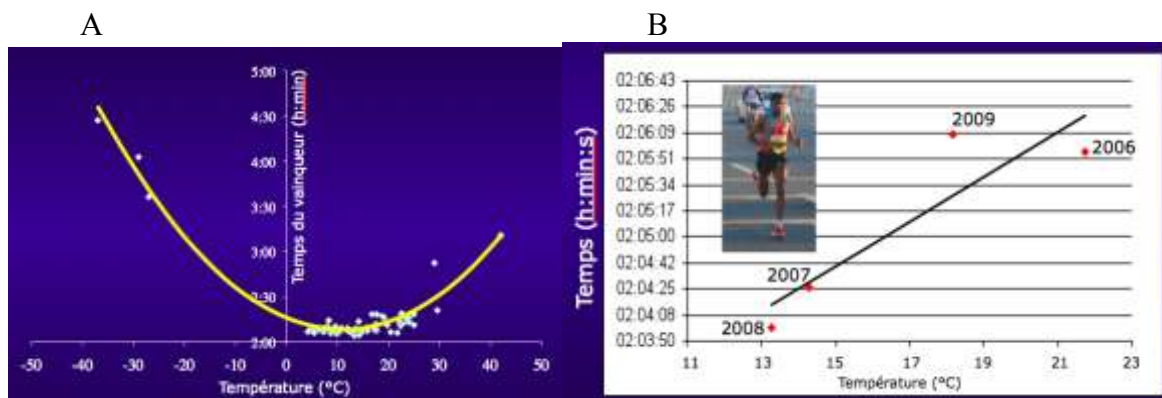


Figure 38 – A) Temps du vainqueur des marathons des huit dernières années à Paris, New York, Londres, Chicago, Berlin, Boston, au marathon du Pôle et au marathon des Sables. La température influe très fortement sur ces performances selon une fonction quadratique et un optimum à 10 °C, comme l'illustre également la courbe de performance de Haile Gebreselassie en fonction de la température (B) sur le Marathon de Berlin lors de ses 4 tentatives de record du monde (dont deux réussies en 2007 et 2008).

La relation température-mortalité (Figure 39) est aussi très explicite. L'optimum calculé se situe autour de 20 °C. Le froid n'est pas, malgré ce qu'en dit la sagesse des nations,

particulièrement sain : avec la baisse des températures apparaissent infections et problèmes cardio-vasculaires et une augmentation de la mortalité. De même si la température s'élève trop au delà de l'optimum. Dans l'un et l'autre cas, les personnes les plus vulnérables atteignent les limites de leurs capacités de thermorégulation. L'existence de ces relations température-performance et température-mortalité complète le lien observé entre capacités physiques et espérance de vie. On voit bien notre dépendance à un paramètre environnemental essentiel, la température de l'air ambiant.

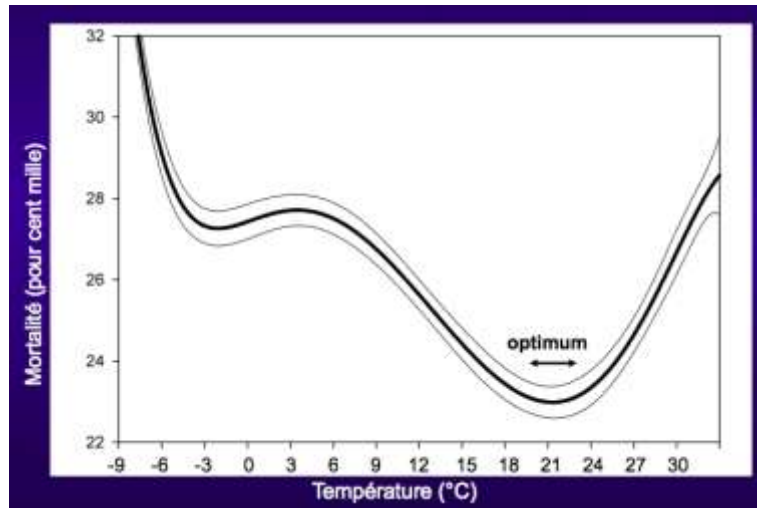


Figure 39 – Relation température-mortalité au pas de temps journalier.

## Fin de l'optimisation ou adaptation ?

Se pose désormais une question simple : notre espèce est-elle encore capable de s'adapter au monde ? George Bernard Shaw notait déjà que l'homme « déraisonnable » essaie constamment d'adapter le monde à ses besoins (il ajoutait qu'en conséquence « le progrès humain dépendait exclusivement des hommes non raisonnables »...). Est-ce encore des non-raisonnables, qui continuent de forcer l'environnement à s'adapter et acceptent le prix de cette transformation, que dépend notre marche vers le progrès ? Quelles sont nos marges d'adaptation ? Sommes-nous au terme de ce que nous pouvons réaliser ? Cette question, physiologique autant que philosophique, se pose atout autant pour nos limites psychologiques, puisque la plupart du temps nous ne nous voyons pas tels que nous sommes mais tels que nous nous rêvons. L'acceptation de soi, de nos limites, de celles des autres, les renoncements qui en découleront, pourraient bien être les questions centrales de notre proche avenir.



## Références et Crédits des Figures

- Fig. 1 : Licence CC-BY-SA-2.0, GFDL. Boltbeijing.jpg: Jmex60.
- Fig. 10 : Source : F. Desgorces, IRMES 2009.
- Fig. 12 : Source : V. Thibault, IRMES 2008.
- Fig. 13 : Mc Cormack G.R., Friedenreich C., Shiell A., Giles-Corti B., Doyle-Baker P.K. (2010). Gender and age-specific seasonal variations in physical activity among adults. *Journal of Community Health and Epidemiology. In press.*
- Fig. 16 : Source : L. Quinquis, IRMES 2009.
- Fig. 17 : Source : Berthelot G. *et al.* (2010). Athlete Atypicity on the Edge of Human Achievement: Performances Stagnate after the Last Peak, in 1988. *PLoS ONE*, **5** : e8800.
- Fig. 19 : Source : Berthelot G. *et al.* (2008). From Oxford to Hawaii Ecophysiological Barriers Limit Human Progression in Ten Sport Monuments. *PLoS ONE*, **3**: e1552.
- Fig. 21A : Source : S. Len, IRMES 2009.
- Fig. 21B : Licence CC-BY-SA. Sebjarod.
- Fig. 22 : Licence CC-BY-SA-2.0, Rama.
- Fig. 23C : A. Pavé.
- Fig. 23E : CNRS Photothèque / DUPRAT Fabrice. Laboratoire : UMR 6097 - Institut de pharmacologie moléculaire et cellulaire (IPMC) – VALBONNE.
- Fig. 24 : Source : S. Len, IRMES 2009.
- Fig. 27 : Source : N. El Helou, IRMES 2009.
- Fig. 28 : Source : Berthelot G. *et al.* (2010). Athlete Atypicity on the Edge of Human Achievement: Performances Stagnate after the Last Peak, in 1988. *PLoS ONE*, **5** : e8800.
- Fig. 29 : Source : M. Guillaume *et al.* (2009). Athlete Atypicity on the Edge of Human Achievement: Performances Stagnate after the Last Peak, in 1988. *PLoS ONE*, **4** : e7573.
- Fig. 31 : Source : F. Desgorces, IRMES 2010.
- Fig. 32 : Source : Revue Agreste, Juin 2009 ; INRA 2010 ; Base de données de la FAO.
- Fig. 33 : Source : R. Fogel. The escape from premature death and hunger, 2003. Expert Insem. Croissance & Puberté 2007, Vercauteren 1993, Kimura 1977, Damon 1974.
- Fig. 34 : Source : Insee, ONU, OCDE.
- Fig. 35A : Source : Berthelot *et al.* (2008). The Citius End: World Records Progression Announces the Completion of a Brief Ultra-Physiological Quest. *PLoS ONE*, **3** : e1552.
- Fig. 35B : Minefi 2008.
- Fig. 36B : GIEC 2007.
- Fig. 37 : Source : GIEC, 2001 ; AIE et Manicore 2009.
- Fig. 38 : Source : A. Marc, IRMES 2009.
- Fig. 39 : Source : Besancenot J.P. (2004). *La mortalité selon le contexte thermique. Le cas de la France.* Paris.