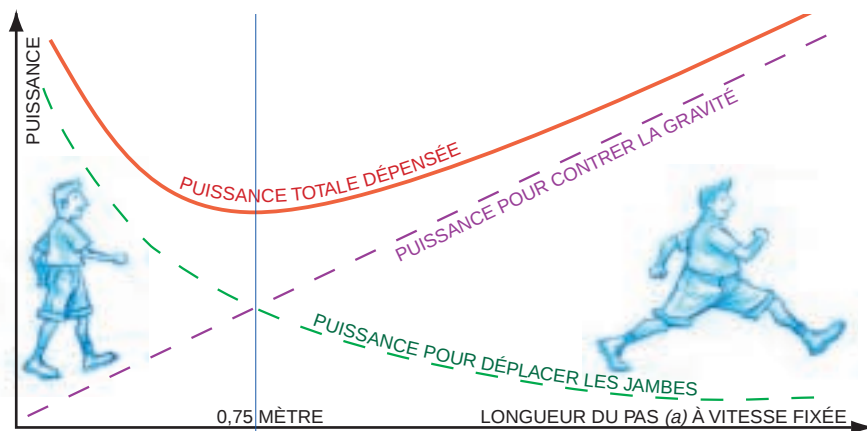




Lorsque l'on marche, on pivote autour du pied, de sorte que la hanche s'élève périodiquement (à gauche). La puissance à dépenser pour marcher à vitesse donnée est alors la puissance nécessaire à l'élévation périodique du corps plus celle nécessaire à l'accélération et à la décélération des jambes (courbes). Comme ces puissances varient en sens inverse en fonction de la longueur du pas, il existe un pas optimal (0,75 mètre pour une vitesse de 5 kilomètres par heure et pour un marcheur de 70 kilogrammes) où la puissance dépensée est minimale.

l'élévation des jambes (courbes). Comme ces puissances varient en sens inverse en fonction de la longueur du pas, il existe un pas optimal (0,75 mètre pour une vitesse de 5 kilomètres par heure et pour un marcheur de 70 kilogrammes) où la puissance dépensée est minimale.

mouche si nous mesurons 1/200 de notre taille réelle, soit environ 0,9 centimètre. Remarquons au passage que le nombre de pattes ou de jambes n'intervient pas : le «mille-pattes» ne se déplacerait pas plus vite s'il n'avait que quatre pattes.

De telles modélisations ont permis d'estimer la vitesse de déplacement de dinosaures en mesurant la longueur de leur pas sur des empreintes fossilisées et en estimant leur taille à partir des ossements. Ainsi le Tricératops avançait à la vitesse du Rhinocéros, environ sept mètres par seconde, et l'homme, s'il avait vécu à la même époque, aurait pu lui échapper.

LA COURSE

En courant, ce n'est plus la gravité qui engendre le mouvement périodique des jambes, mais le travail des muscles de la cuisse : le pas «forcé» est différent du mouvement pendulaire naturel. La force totale qu'exerce un membre dépend du nombre de fibres qu'il contient, c'est-à-dire de sa section. Le travail d'un membre, le produit de la force exercée par la longueur d'extension des muscles, est proportionnel à son volume, donc à sa masse. La période d'oscillation forcée des jambes pendant une course augmente avec leur longueur (à section de jambe donnée). La vitesse de course est alors à peu près indépendante de la longueur de la jambe, puisque c'est le quotient de la longueur du pas et de la période d'oscillation, toutes deux proportionnelles à cette longueur de jambe.

Ainsi, les grands ne courent pas sensiblement plus vite que les petits, excepté si la différence de musculature est notable. Notons aussi qu'en courant nous plions la jambe afin de mieux l'adapter à un balancement pendulaire plus rapide (elle est ainsi raccourcie). Pour déterminer le pas optimal, on minimise la puis-

sance nécessaire à la marche. Quelle énergie doit dépenser une personne qui marche sur une surface horizontale pour maintenir une vitesse constante ? À chaque fois qu'un pied se pose sur le sol, il est momentanément à l'arrêt alors que le reste du corps poursuit son déplacement. Quand ce pied quitte le sol il faut que toute la jambe soit accélérée vers l'avant afin qu'elle rattrape son retard ; elle sera ensuite décélérée jusqu'au moment où le pied se posera à nouveau sur le sol.

Pendant ces phases d'accélération et de décélération, deux ensembles de muscles antagonistes agissent successivement sur la jambe, chacun d'entre eux engendrant un travail égal à la variation de l'énergie cinétique du membre. Le travail des muscles qui propulsent la jambe est proportionnel au produit de la masse de la jambe (que l'on peut supposer proportionnelle à la masse M du corps) par le carré de la vitesse v du marcheur (Mv^2). Pour obtenir la puissance musculaire dépensée pour mouvoir les jambes, il suffit de multiplier le travail des muscles par la fréquence du pas, c'est-à-dire par le quotient de la vitesse et de la longueur du pas (v/a). La puissance nécessaire au mouvement des jambes est ainsi proportionnelle à Mv^3/a .

En plus de ce travail, les muscles doivent aussi fournir l'énergie gravitationnelle nécessaire à l'élévation périodique du centre de gravité du corps entre chaque pas. Ce travail est égal au produit de la masse du corps par l'accélération de la pesanteur et par l'élévation de hauteur (Mgh). Cette dernière est d'autant plus grande que l'amplitude du pas est grande et varie comme le rapport a^2/L , où L est la longueur de la jambe. La puissance correspondante, obtenue en multipliant ce travail par v/a , est donc proportionnelle à $Mgva/L$. Au final, la puissance à fournir par les muscles est la somme de deux termes,

l'un correspondant à la puissance nécessaire pour mouvoir les jambes, qui subissent une succession d'accélération et de décélérations, l'autre traduisant la puissance à fournir pour vaincre la pesanteur. Si l'on allonge le pas à vitesse constante le premier terme diminue alors que le second augmente.

Ainsi, il existe un pas de longueur optimale qui minimise la puissance totale à fournir. La longueur trouvée par cette méthode correspond au pas de la fréquence naturelle pendulaire : elle est proportionnelle au produit de la vitesse du marcheur par la période du pendule associé à la jambe. La puissance dépensée sera donc plus grande quand on marche plus vite (ce qui semble normal), mais aussi quand on se déplace à faible vitesse (ce qui est plus inattendu). Pour une vitesse de 5 kilomètres par heure, le pas optimal mesure environ 75 centimètres pour un marcheur de taille moyenne et le marcheur consomme environ 250 watts (la puissance de trois lampes électriques).

Dans le cas d'une montée, il faut tenir compte du travail pour compenser l'augmentation de l'énergie potentielle de pesanteur. Pour monter de 300 mètres et si votre poids est de 70 kilogrammes, le travail à fournir est d'environ 210 000 joules. Comme votre rendement n'est pas égal à un, mais plutôt de 40 pour cent, ce travail est 500 000 joules, soit approximativement 125 kilocalories, c'est-à-dire un bon bifteck... Il est difficile de maigrir.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA.

D'ARCY THOMSON, *Forme et croissance*, Seuil, collection Sources du savoir, 1999.

A. BELLEMANS, *Power demand in walking and pace optimization*, in *American Journal of Physics*, vol. 49, p. 25, 1981.



La fée électricité

ÉLIANE STROSBERG

Le plus grand tableau du monde retrace l'histoire d'une aventure scientifique et technique avec quelques erreurs...

En 1937, Raoul Dufy (1877-1953), déjà célèbre, est sollicité pour la conception des décors du Pavillon de la lumière de l'Exposition internationale des arts et techniques, à Paris. De son passage par le fauvisme, Dufy a conservé l'utilisation de la couleur pure, qu'il dissocie du dessin et de la couleur. Avec Henri Matisse (1869-1954) et Fernand Léger (1881-1955), il est un des premiers à noter que l'œil perçoit séparément la forme d'un objet et sa coloration.

Avec une peinture à l'huile aussi fluide que l'aquarelle, créée par son ami chimiste Jacques Maroger, Dufy peint de grands aplats de couleur presque unie, qui divisent l'espace du tableau. Ainsi libéré des contraintes de la perspective, il juxtapose des scènes à différentes échelles, mais aussi des systèmes *a priori* incompatibles, tels la mythologie antique et le machinisme moderne. Les futuristes italiens et les constructivistes russes se sont inspirés du mouvement dans leurs œuvres ; toutefois, en France, hormis Fernand Léger, Robert Delaunay (1885-1941) et sa femme Sonia (1885-1979), plus rares sont ceux qui peignent la vitesse.

Le travail de Dufy passe par trois phases : de longues observations *in situ* et l'analyse de diverses sources iconographiques ; la stylisation du sujet en signes ; enfin, l'insertion des signes dans une composition cohérente.

Pour son œuvre intitulée *La fée électricité*, Dufy ambitionne de représenter toutes les inventions et tous les personnages liés à l'aventure de l'électricité. Il consulte les dossiers de l'Académie des sciences, visite le Conservatoire national des arts et métiers, explore un arsenal où il découvre les grues, des aciéries pour leur fours électriques, et il dresse une liste des phénomènes naturels liés à l'électricité, tout en amassant des connaissances sur plus d'une centaine d'inventeurs associés à son développement. Il se documente notamment dans les *Merveilles de la Science*, de Louis

Figuier, dont les illustrations l'inspireront.

Au centre de cette rétrospective, les dieux de l'Olympe sont assemblés au-dessus d'une gigantesque usine électrique (on y reconnaît la centrale de Vitry-sur-Seine qui venait d'être construite et était à l'époque la plus puissante d'Europe), à laquelle un Jupiter tonnant transmet sa puissance par la foudre. De part et d'autre de cette scène, Dufy a représenté, dans le bas du tableau, 109 portraits de scientifiques et philosophes, et, dans la partie supérieure de la fresque, de nombreuses inventions liées à l'électricité et à l'énergie.

L'ensemble se lit de droite à gauche : Dufy relie les anciens Grecs, qui connaissaient les propriétés électrostatiques de l'ambre (nommée *elektriike*), aux savants

modernes de l'électricité, chimistes ou physiciens, à travers une longue chaîne de personnages dont les découvertes sont intimement enchevêtrées. À droite, Thalès de Milet (-625, -546), Archimède (-287, -212) et Aristote (-384, -322) semblent converser, tandis qu'à gauche, le général Ferrié, qui introduisit le télégraphe sans fil dans l'armée française, clôt le cortège. Toutefois, si pour certains, tels André-Marie Ampère (1775-1836), Michael Faraday (1791-1867) ou Benjamin Franklin (1706-1790), le rapport à l'électricité est évident, pour d'autres il est plus obscur. C'est le cas de Blaise Pascal (1623-1662), Léonard de Vinci (1452-1519), Karl-Friedrich Gauss (1777-1855) et Isaac Newton (1642-1727), célèbres, mais dont l'apport à l'histoire de l'électricité n'est pas



1. La fée électricité se lit de droite à gauche : l'histoire de l'électricité commence avec les Grecs et progresse jusqu'en 1937.

direct. Par ailleurs, Anthony Carlisle (1768-1840), Ewald-Georg von Kleist (1700-1748), Antonio Pacinotti (1841-1912) et Nicolas-Constant Pixii (1776-1861) sont des inconnus pour beaucoup.

Commençons par les premiers et déterminons les liens, parfois ténus, qu'ils entretiennent avec l'électricité. Pascal est célèbre pour la découverte de la pression atmosphérique, sans laquelle Otto von Guericke (1602-1686) n'aurait pas effectué son expérience : deux hémisphères de laiton où on a fait le vide ne peuvent être séparés par des chevaux de trait. Von Guericke a construit la première machine électrostatique, où une boule de soufre était électrisée par frottements. Par ailleurs, la présence de Pascal, auteur du *Traité de l'équilibre des liqueurs*, où il analyse les phénomènes hydrostatiques, est à rapprocher de celle de Léonard de Vinci pour ses inventions hydrauliques : l'utilisation de l'eau dans la production d'électricité, par exemple dans un barrage, est connue en 1937. De plus, anecdotiquement, lorsqu'ils décrivent la tension et la résistance dans un circuit électrique, les physiciens comparent souvent le courant électrique à un courant d'eau.

Newton (voir la figure 2) doit sa présence à la similitude de sa loi de la gravitation avec celle de Charles de Coulomb

(1736-1806), selon laquelle la force d'attraction de deux corps électrisés varie selon l'inverse du carré de leur distance. De plus, le 9 décembre 1676, Newton a brièvement parlé de l'électricité devant la *Royal Society*, mais cette allocution semble avoir été sans grande portée.



Photothèque des musées de la ville de Paris/Chevalier

2. Que fait Isaac Newton dans une histoire peinte de l'électricité ?

Gauss, génie universel, a marqué l'histoire de l'électricité en mesurant les charges électriques et en proposant comme unité le coulomb (il reliait la force entre des charges électriques à la quantité d'électricité de ces charges et à la distance entre elles).

Qui sont Carlisle, Kleist, Pacinotti, Pixii ? Le 2 mai 1800, le premier, avec William Nicholson (1753-1815), a décomposé l'eau avec la pile mise au point par Alessandro Volta (1745-1827) ; c'est la première expérience connue d'électrolyse. Le deuxième, Kleist, est le prétendant allemand à la paternité de la mise en bouteille de l'électricité : on stocke les charges électriques dans un condensateur, que l'on forme en tapisant les faces internes et externes d'une bouteille de verre avec des feuilles métalliques. Il s'oppose à un certain Cuneus, qui, à Leyde, aux Pays-Bas, aurait mis au point le même dispositif. En France, l'histoire a retenu le nom de «bouteille de Leyde» et, en Allemagne, celui de «bouteille de Kleist».

L'Italien Pacinotti (1841-1912) a inventé, quelques années avant le Belge Zénobe Gramme (1826-1901), une machine dynamoélectrique. Cependant, celle-ci, moins efficace, est restée oubliée à Pise, tandis que celle de Gramme a connu le succès en sortant



Photothèque des musées de la ville de Paris/Chevalier

Photothèque des musées de la ville de Paris/Chevalier



3. Les deux erreurs de Dufy : la séance devant la *Royal Society*, à Londres (à gauche) ne correspond pas à la date inscrite en bas du tableau. La scène représentant les expériences effectuées au bord



de la Tamise, en juillet 1747 (à droite), montre une machine de Ramsden, inventée 20 ans plus tard, alors que l'électricité a été produite par une bouteille de Leyde.

Photothèque des musées de la ville de Paris/Chevalier



4. L'électricité industrielle : la technique conduit à la modernité : paquebots, chemins de fer, etc.

l'électricité des ateliers, où elle était confinée, pour des applications de grande ampleur, tel l'éclairage public.

Enfin, Pixii est le constructeur d'une des premières machines à courant induit : un courant électrique est induit par le mouvement d'un aimant.

On ne saurait citer tous les personnages célèbres représentés tant ils sont nombreux ; de plus, Dufy prend quelques libertés avec la chronologie et, parfois même, avec la description des inventions. Par exemple, un œil averti allié à un esprit éclairé détecte deux erreurs dans la fresque de Dufy.

D'abord, la date (6 juin 1751) qui souligne l'évocation de la lecture, devant la *Royal Society*, des travaux de Franklin montre que Dufy a confondu deux séances : en s'inspirant de l'ouvrage de Figuière, il a peint la première, pendant laquelle le physicien américain est hué, alors que la date est celle de la seconde où l'auditoire était beaucoup plus réceptif, suite au succès de la publication des travaux de Franklin (voir la figure 3).

Puis, à gauche de cette scène, Dufy a représenté les expériences qui ont eues lieu près de la Tamise, à Londres, en juillet 1747 : l'eau du fleuve a transmis l'électricité d'une bouteille de Leyde (ou de Kleist!) à un fil sur l'autre rive. Or Dufy a peint, à nouveau induit en erreur par les *Merveilles de la Science*, une machine de Ramsden, inventée en 1766.

Dans la partie supérieure de la fresque, de nombreuses inventions sont liées à l'électricité et à l'énergie. Au départ naturelles, les énergies du soleil, du vent et de la foudre sont remplacées par le charbon et la vapeur. L'histoire de l'électricité statique, chimique, dynamique, puis

de l'électromagnétisme, de la lumière et des ondes se déchiffre telle une fable.

On distingue plusieurs inventions nées de l'électricité : un paquebot, le chemin de fer, le cinéma, etc. Le message est clair : avec l'avènement de l'électricité, le progrès s'accélère, les usines et les transports se développent, laissant place aux loisirs, concept nouveau pour l'époque (nous sommes un an après les accords de Matignon et les premiers congés payés). L'œuvre de Dufy célèbre ainsi le changement du mode de vie de chacun grâce aux inventions liées à l'électricité.

Dans l'édifice construit par l'architecte Robert Mallet-Stevens (1886-1945), sur le Champ de Mars, après avoir passé un sas obscur, le visiteur était confronté à *La fée électricité* dont l'effet était renforcé par la concavité des pans de mur noir. Dans une immense pièce sombre et nue, les projecteurs éclairaient la fresque avec une luminosité exceptionnelle.

Après l'exposition, le vibrant hommage devient encombrant : il faut attendre 1964 pour que le Musée d'Art moderne de la Ville l'accueille. C'est là que l'on peut l'admirer aujourd'hui.

Éliane STROSBERG est vice-présidente de l'association Rencontres Art et Science.

Bernard DORIVAL, *La belle histoire de La fée électricité de Raoul Dufy*, La Palme, Paris 1953.

André BERNE JOFFROY, *La fée électricité*, Musée d'Art Moderne de la Ville de Paris, 1983.

Alain BELTRAN, *La fée électricité, reine et servante*, XX^e siècle, 1989.

Éliane STROSBERG, *Art et Science*, Éditions UNESCO.

