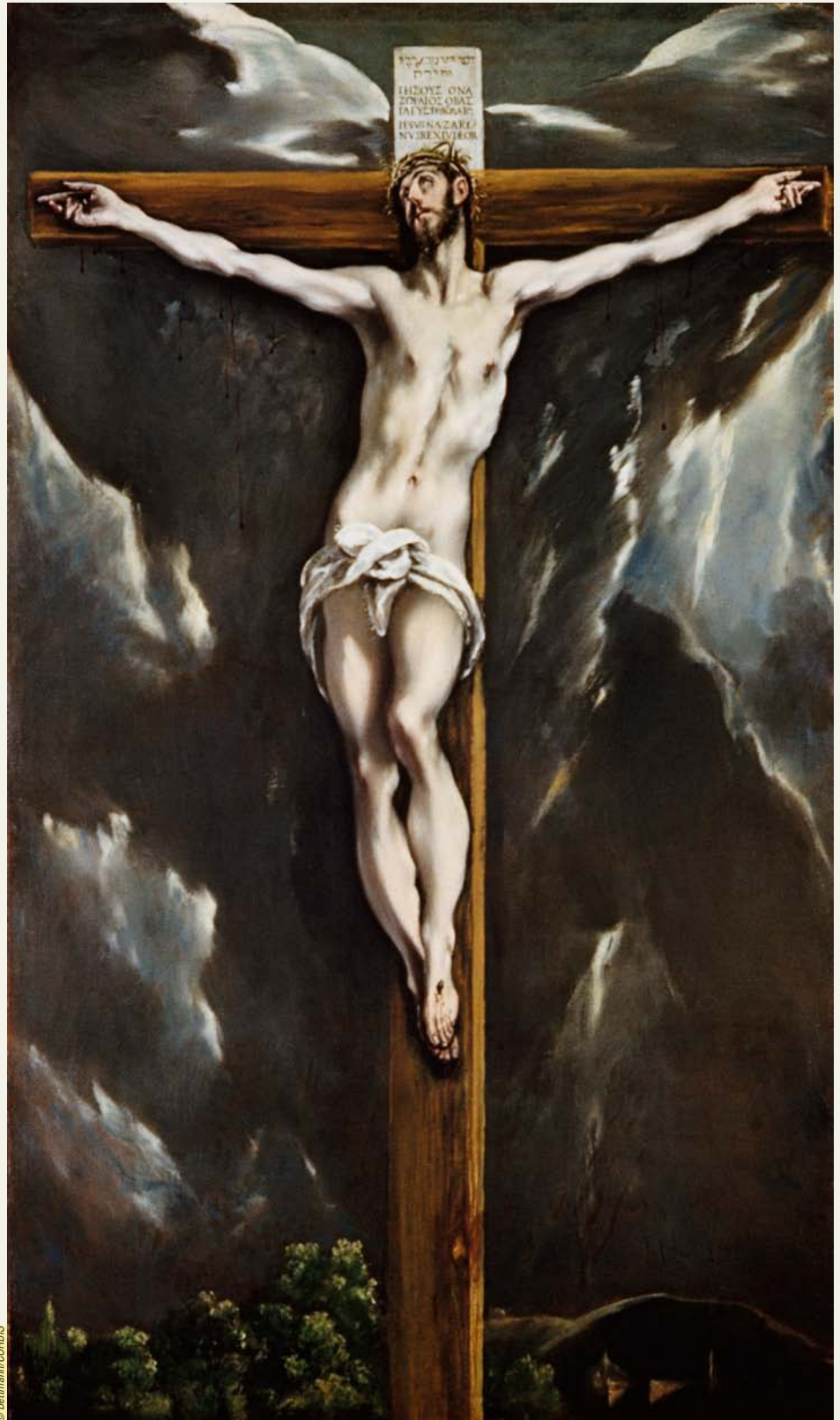


Si le nerf médian pâtit du supplice de la croix, ce n'est pas le cas du nerf ulnaire, qui reste intact. En détaillant les divers muscles innervés par les nerfs médian et ulnaire, l'équipe de Falls Church a montré comment l'ischémie du premier entraîne la disposition particulière des doigts observée lors d'un crucifiement. Les muscles de la flexion du pouce et de l'index ne sont plus commandés par le nerf médian : les deux doigts restent tendus. Précisons qu'au repos, c'est-à-dire en l'absence d'activation par des neurones, un muscle est détendu, non contracté. Ceux de l'auriculaire et de l'annulaire sont toujours commandés par le nerf ulnaire : les doigts se plient. Enfin, les muscles requis pour la flexion du majeur, dont le muscle fléchisseur profond des doigts, sont innervés par les deux nerfs : on comprend sa position intermédiaire.

Ainsi, le crucifiement se traduit par une neuropathie dont témoigne la position des doigts. Ce symptôme n'est pas décrit dans le film *La vie de Brian*, des Monty Python (1979), où pourtant un des personnages discute des avantages et des inconvénients des différents supplices des Romains, dont le crucifiement. Et à en croire l'humour grinçant qui caractérise ce film, la torture serait des plus confortables, car... on la subit au grand air.

J. Regan et al., Crucifixion and median neuropathy, *Brain and Behavior*, publié en ligne le 18 mars 2013.



© Bettmann/CORBIS

IDÉES DE PHYSIQUE

Des trains flottant au-dessus des rails

L'avenir du transport ferroviaire passera-t-il par la lévitation magnétique des trains, assurée par des électro-aimants supraconducteurs ?

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

En 2011, à l'occasion du centenaire de la découverte de la supraconductivité [état de résistivité électrique nulle, obtenu à très basse température], des trains miniatures ou un skate supraconducteurs flottant au-dessus de rails magnétiques nous ont émerveillés. Ces prototypes glissant sans frottement annoncent-ils les transports du futur ? Les compagnies *Swissmetro* ou *ET3* (*Evacuated Tube Transport Technologies*) nous promettent en effet sécurité, rapidité et frugalité énergétique en faisant circuler dans le vide des véhicules à sustentation magnétique. Ce type de lévitation est d'ailleurs déjà mis en œuvre dans la liaison commerciale *Transrapid* à Shanghai ou dans les prototypes *MLX* des *Maglev* japonais, qui détiennent le record du monde de vitesse sur rail (581 kilomètres par heure en 2003).

Lévitation stable ou instable ?

Comment le magnétisme permet-il de faire léviter de façon stable un train entier ? On pourrait croire qu'il est possible de faire léviter un aimant en le rapprochant d'un autre. En effet, avec des aimants au néodyme de quelques centimètres et quelques grammes, on obtient d'intenses forces d'attraction entre pôles opposés ou de répulsion entre pôles identiques, de plusieurs newtons. Mais on découvre vite que l'aimant que l'on cherche à faire léviter se retourne dès qu'on le lâche et se colle à l'aimant qui le repoussait. On démontre que quelle que soit la configuration

choisie, une lévitation à base d'aimants permanents (ou d'électro-aimants) est instable.

Pourtant, la lévitation d'un aimant au-dessus d'une plaquette de supraconducteur refroidi est stable (voir la figure 1). Que se passe-t-il ? Un matériau supraconducteur empêche les lignes de champ magnétique de pénétrer en son sein. Lorsqu'on approche un aimant, des courants électriques se forment à la surface du supraconducteur de telle façon que le champ magnétique qu'ils induisent compense le champ extérieur : le champ magnétique total reste nul à l'intérieur du matériau. Ces courants forment ainsi un



1. UN AIMANT PLACÉ AU-DESSUS d'un matériau supraconducteur lévite de façon stable. Il induit dans le supraconducteur des courants qui créent un champ magnétique opposé à celui qu'il exerce, quelle que soit la configuration géométrique (contrairement au cas de deux aimants que l'on rapproche). Ce phénomène correspond au diamagnétisme d'un supraconducteur : soumis à un champ magnétique, un tel matériau empêche les lignes de champ de pénétrer en son sein.

électro-aimant dont la polarité est en miroir de celle de l'aimant initial. Ce dernier est donc repoussé, quelle que soit son orientation, et la lévitation est stable. Hélas, comme on ne sait pas obtenir de supraconductivité à température ambiante, il est difficile d'imaginer l'installation de rails supraconducteurs sur plusieurs kilomètres.

Mais le même type de répulsion, dite diamagnétique, existe aussi avec de la matière à l'état normal, telle l'eau. Le champ magnétique d'un aimant que l'on approche crée en effet, au sein des nuages électroniques des molécules, des courants électriques, lesquels produisent un champ magnétique s'opposant à celui de l'aimant. Lorsque ce dernier est très intense, même l'eau s'aimante assez pour léviter. C'est ainsi qu'en 1997, le physicien russo-néerlandais Andre Geim a fait léviter de l'eau, une petite tomate et même une grenouille vivante (voir la figure 2) dans un champ magnétique de 16 teslas.

Cette valeur, 16 teslas, du champ est énorme et bien trop élevée pour des applications à grande échelle. Tout n'est cependant pas perdu. Un métal normal, tel le cuivre, peut aussi repousser un aimant. Il suffit pour cela que le métal et l'aimant soient en mouvement l'un par rapport à l'autre. Lorsqu'un aimant est déplacé parallèlement à la surface d'un conducteur, la variation avec le temps du champ magnétique en chaque point du conducteur induit des courants électriques, les courants dits de Foucault. Ces derniers engendrent un champ magnétique qui agit en retour sur l'aimant.

L'action des courants de Foucault s'oppose à la cause qui les a produits (loi de Lenz). Le premier effet est donc une force de traînée, opposée à la vitesse ; on le met à profit dans les freins à induction qui équipent les camions ou les trains à grande vitesse. Un second effet, moins connu, est l'apparition d'une force de portance qui repousse l'aimant : puisque le champ magnétique de l'aimant diminue avec la distance, et les courants induits aussi, la loi de Lenz favorise l'éloignement. De façon remarquable, la portance croît avec la vitesse de l'aimant pour atteindre une certaine valeur maximale, tandis que la traînée passe par un maximum, puis diminue à vitesse plus élevée.

Le train flotte grâce aux courants induits

En 1966, les chercheurs américains James Powell et Gordon Danby ont proposé d'utiliser ce mécanisme pour sustenter un train, et ont contribué à développer sur ce principe le *Maglev* japonais. Dans ce système, la force de portance, qui augmente avec la vitesse, n'est suffisamment élevée que si la vitesse du train dépasse un certain seuil, de l'ordre de 100 kilomètres par heure pour les MLX. Le train est donc muni de roues ne servant qu'aux phases de démarrage ou d'arrêt. En phase de lévitation, la stabilité du train est automatiquement assurée : si le véhicule se rapproche du sol, la force de portance, répulsive, augmente et empêche le contact.

La force de traînée pose en revanche un sérieux problème. Elle serait rédhibitoire si J. Powell et G. Danby n'avaient eu l'idée d'utiliser pour les rails, non pas un conducteur massif placé sous le train, mais des bobines conductrices en forme de huit connectées les unes aux autres et placées de chaque côté (voir la figure 3). Les deux boucles qui composent le huit ont des enroulements de sens opposés. Il s'ensuit que lorsque l'aimant qui lui fait face est centré, les flux magnétiques qui traversent ces deux boucles se compensent. Il n'y a alors pas de courant induit, donc pas de dissipation d'énergie.

Dans cette situation, il n'y a pas non plus de portance. Par conséquent, sous l'effet

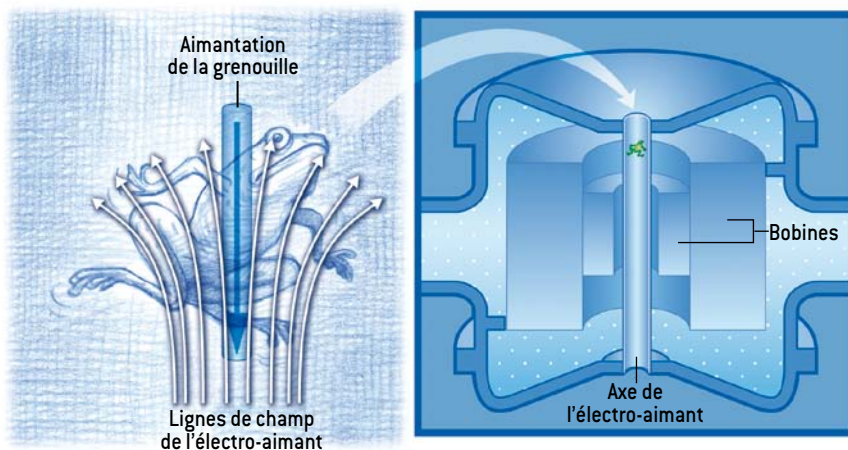
de son poids, le train s'abaisse légèrement sous le plan de symétrie. Des courants sont alors induits dans le circuit et engendrent une portance proportionnelle à l'abaissement, tandis que la traînée croît comme son carré. Pour les faibles écartements, cette traînée magnétique, 100 fois inférieure à la portance, est un ordre de grandeur inférieur à la traînée aérodynamique.

Le MLX fonctionne avec de tels rails. À grande vitesse, il flotte à quelques centimètres au-dessus du sol, un écart confortable pour pallier d'éventuels incidents. Par ailleurs, s'il se rapproche d'un des rails et

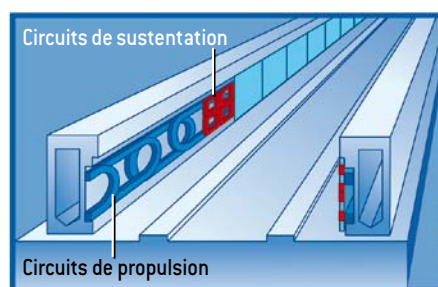
LES AUTEURS



Jean-Michel COURT et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>



2. UN CHAMP MAGNÉTIQUE PUISSANT ET NON HOMOGENE, produit par un électro-aimant, peut faire léviter de façon stable un objet ordinaire. En agissant sur les nuages électroniques des molécules, le champ magnétique induit en chacun des points de l'objet de minuscules boucles de courant électrique. Ces courants, via les champs magnétiques qu'ils engendrent, s'opposent aux causes qui les produisent : l'objet est repoussé vers des zones où règne un champ magnétique plus faible.



3. LE TRAIN EXPÉRIMENTAL JAPONAIS MAGLEV a un système de sustentation magnétique composé de circuits en huit (en rouge) disposés latéralement sur les rails et fonctionnant grâce à des électro-aimants supraconducteurs embarqués. Si le train dévie verticalement ou latéralement par rapport aux rails, le champ magnétique des électro-aimants induit dans les circuits en huit des courants, lesquels engendrent des champs magnétiques qui rectifient la posture du train. La propulsion est également assurée par des champs magnétiques, via un jeu de bobines embarquées et un autre jeu de bobines (en bleu) disposées le long des rails.