

tion de la méthode de Monte-Carlo. Bien que ces résultats aient été obtenus dans le cadre de l'approximation de valence, cette approximation n'aurait probablement pas fourni huit résultats corrects si la chromodynamique quantique avait été fausse. Autrement dit, nos résultats confirment à la fois les prédictions de masse de la chromodynamique quantique et la fiabilité de l'approximation de valence.

Plus récemment, nous avons exploré les propriétés de la plus légère des boules de glu (les boucles fermées du champ chromoélectrique, mentionnées précédemment). Les premiers calculs, effectués par des ordinateurs plus lents que le *GF11*, étaient trop peu précis pour que l'on identifie clairement des boules de glu. En utilisant 448 des processeurs de *GF11* en continu pendant deux ans, nous avons calculé la masse de la boule de glu la plus légère et étudié sa désintégration en d'autres particules plus stables. Les calculs ont montré que cette particule était apparue dans des expériences effectuées au cours des 12 dernières années ; personne ne l'avait reconnue, car il n'existait pas de profil suffisamment détaillé de ses propriétés. Ainsi nos calculs «découvraient» une particule subatomique.

Malgré ces succès, il reste à confirmer directement la chromodynamique quantique, sans aucune approximation. À cette fin, on devra utiliser des ordinateurs plusieurs centaines de fois plus rapides que le *GF11* ou des algorithmes des centaines de fois plus efficaces que les meilleurs algorithmes actuels. Trois machines de cette envergure sont étudiées à l'Université Columbia, à l'Université de Rome et au Japon. On espère que ces ordinateurs expliqueront également certaines diffusions de particules observées dans les collisionneurs.

La physique théorique expérimentale

Au-delà de la découverte des masses des hadrons et des boules de glu, nos calculs sont le signe d'un changement fondamental de la physique des particules. Alors que les méthodes numériques étaient utilisées dans la plupart des disciplines, papier et crayon restaient les outils des physiciens théoriciens. Nos études numé-

HADRON	MASSE (EN MILLIONS D'ÉLECTRONVOLTS)	
	CALCULÉE	OBSERVÉE
KAON (Dans un état excité)	898 ± 12	896
PROTON	936 ± 80	941
PHI	1 026 ± 25	1 022
DELTA	1 205 ± 94	1 235
SIGMA	1 391 ± 62	1 388
XI + SIGMA – PROTON	1 484 ± 57	1 576
XI (Dans un état excité)	1 582 ± 50	1 537
OMÉGA	1 768 ± 69	1 676
BOULE DE GLU LA PLUS LÉGÈRE	1 740 ± 70	1 710

3. LES MASSES CALCULÉES DES HADRONS sont comparées aux valeurs mesurées expérimentalement. Les calculs sont plus simples quand on additionne les masses de la particule xi, de la particule sigma et du proton.

riques, toutefois, se sont imposées parce que les méthodes analytiques avaient échoué et que les ordinateurs étaient devenus assez puissants pour exécuter les algorithmes essentiels.

Cette évolution, du papier à l'ordinateur, a toutefois des conséquences profondes, car, dans les travaux théoriques, sur le papier, chaque étape peut (en principe) être vérifiée ; en étudiant l'enchaînement logique des étapes d'un calcul, on confirme le résultat. En revanche, la physique expérimentale ou le calcul numérique ne donnent pas cette certitude, cette confiance absolue dans les résultats. Dans ces deux cas, des résultats jugés plausibles sont acceptés si suffisamment de tentatives pour les réfuter ont échoué. Nous acceptons le résultat expérimental que toute pierre tombe, et non l'inverse, car personne n'a jamais vu une pierre s'élever spontanément dans l'air ; néanmoins, du strict point de vue logique, il n'est pas certain que les pierres tombent toujours.

Notre travail a été l'analogue d'une recherche infructueuse de pierre qui

ne tombe pas. Toutefois, si nous avions pu calculer la masse du proton sur un réseau à maille bien plus petite que celle que nous avons effectivement utilisée du fait de notre puissance de calcul limitée, nous aurions peut-être trouvé une valeur de 2 000 mégaélectronvolts (un mégaélectronvolt, ou MeV, correspond à $1,78 \times 10^{-30}$ gramme), en contradiction avec notre valeur extrapolée de $1,67 \times 10^{-27}$ gramme. Par conséquent, notre prédiction de la masse du proton est testée par la série de nombres entrant dans notre extrapolation, mais elle n'est pas vraiment prouvée.

Nos travaux sont ainsi, ce qui semble une contradiction, de la «physique théorique expérimentale». Compte tenu de la complexité des théories physiques, du coût des énormes projets expérimentaux et de l'augmentation constante de la puissance des ordinateurs, cette physique théorique expérimentale pourrait, dans certains domaines de la physique, devenir la façon la plus accessible d'étudier les phénomènes naturels.

Donald WEINGARTEN est physicien au Centre de recherches IBM Thomas Watson, à Yorktown Heights.

Ta-Pei CHENG et Ling-Fong LI, *Gauge Theory of Elementary Particle Physics*, Oxford University Press, 1984.

D. WEINGARTEN, *Lattice Quantum Chromodynamics*, in *Particles, Strings and Supernovae*, sous la direction de A. Jevicki et C.-I. Tan, World Scientific, Singapour, 1989.

H.J. ROTHE, *Lattice Gauge Theories*, World Scientific, Singapour, 1992.

F. BUTLER, H. CHEN, J. SEXTON, A. VACCARINO et D. WEINGARTEN, *Hadron Mass Predictions of the Valence Approximation to Lattice QCD*, in *Physical Review Letters*, vol. 70, n° 19, pp. 2849-2852, 10 mai 1993.

M. CREUTZ, *Quarks, Gluons and Lattices*, Cambridge University Press, 1993.

I. MONTVAY et G. MUNSTER, *Quantum Fields on a Lattice*, Cambridge University Press, 1994.

Quads et quazars

IAN STEWART

Dans le jeu de Quads, on essaye de former des carrés sur une grille tronquée.

Un informaticien de mes amis, Keith Still, dirige une société qui étudie par simulation les mouvements de foule au stade de Wembley, en Angleterre. Outre ses préoccupations sur la dynamique des foules, K. Still est une personne inventive : il m'a fait part d'un jeu qu'il a conçu il y a quelques années.

Ce jeu, que K. Still a nommé *Quads*, se joue sur une grille formée d'un carré de 11 cases de côté, auquel on a retiré les quatre cases des coins. Le nombre total de cases est donc 117. Les deux joueurs possèdent chacun 20 pions (rouges pour l'un et noirs pour l'autre), nommés *quads*, et sept (ou six pour un jeu court) pions blancs nommés *quazars*. Ils jouent à tour de rôle en plaçant un de leurs *quads* sur une case inoccupée de la grille. Le but du jeu est de former un carré quelconque avec ses *quads* (voir la figure 1 en haut).

En plaçant le quatrième sommet de son carré, un joueur crie : «Quad!» pour annoncer sa victoire. Il arrive qu'un joueur ne remarque pas un carré qu'il a formé au cours du jeu. Si, par chance, l'autre joueur s'en aperçoit, il peut crier : «Quad!» quand vient son tour. Tous ces oublis doivent être relevés dans le cours de la partie.

Le bas de la figure 1 montre une manière pour les noirs de placer une suite de *quads* de sorte que, à chaque tour, les rouges sont forcés de jouer sur une case donnée pour empêcher la victoire des noirs au coup suivant. Ce type de jeu forcé n'est guère intéressant et c'est pour cette raison que les *quazars* entrent en action. Ils sont utilisés précisément pour empêcher l'adversaire de terminer un carré. Ces pions ne comptent donc pas pour la formation des carrés. Ils sont

d'ailleurs blancs pour les deux joueurs. Il y a plusieurs règles pour les utiliser : d'abord, il faut attendre son tour, ensuite, on peut jouer autant de *quazars* que l'on désire, de un à six, mais on doit les jouer avant de jouer son

quad. Puis l'on joue ce dernier pour achever son tour.

Deux règles techniques subsistent. Si à la fin de la partie, un joueur a laissé une position qui aurait conduit nécessairement à une victoire au tour suivant s'il avait eu d'autres *quads* à jouer, ce joueur est déclaré vainqueur. Si la partie s'achève sans qu'aucun joueur ait formé un carré et si les joueurs ont joué des nombres différents de *quazars*, celui qui en a utilisé le moins gagne.

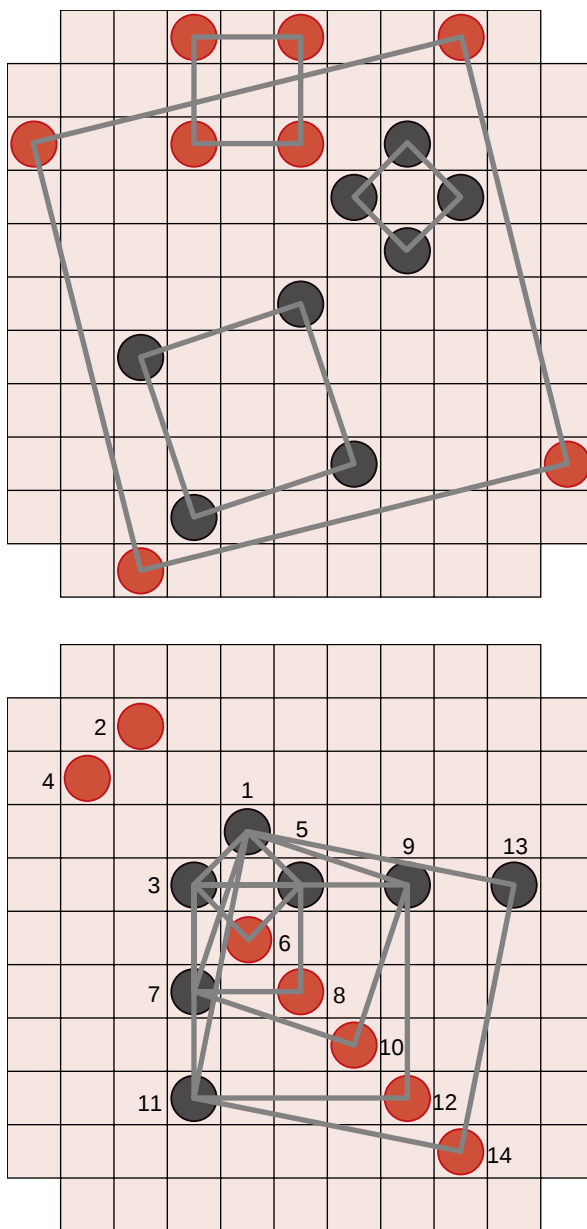
En raison du grand nombre de carrés réalisables, les *Quads* peuvent être étonnamment complexes. Par exemple, il est relativement aisé d'effectuer un coup «bicarré», qui crée deux carrés potentiels simultanément – un carré potentiel étant, bien entendu, un carré à trois sommets déjà occupés. L'adversaire peut contrer ces coups bicarrés en un seul tour à l'aide de ses *quazars*. Les coups bicarrés sont favorables car ils obligent l'adversaire à utiliser des *quazars*.

L'expérience montre que placer un *quad* dans la case centrale est une ouverture raisonnable. Par la suite, on doit surveiller les carrés potentiels, ainsi que ceux formés accidentellement qui peuvent avoir une orientation inattendue. Il faut également guetter les carrés multiples pouvant conduire l'adversaire à des coups bicarrés. La figure 2 vous plonge dans le jeu ; tous les carrés potentiels sont indiqués.

VARIANTES

Si ce jeu vous amuse, vous pouvez imaginer un certain nombre de variantes adaptées à diverses circonstances. Par exemple, de jeunes enfants trouveront le jeu plus accessible sur une grille plus petite et avec moins de *quazars* (5 pour une grille de 10 par 10, 4 pour une grille de 9 par 9, et ainsi de suite). De même, si trois joueurs jouent simultanément, chacun reçoit quatre *quazars* et 20 *quads* de trois couleurs différentes (par exemple, noir, rouge et jaune). Quatre joueurs auront chacun trois *quazars*, et cinq ou six joueurs, chacun deux.

K. Still décrit aussi d'autres variantes de ce jeu. Les *Quads* baladeurs sont analogues au jeu classique à deux joueurs, mais chaque joueur n'a que six *quads*

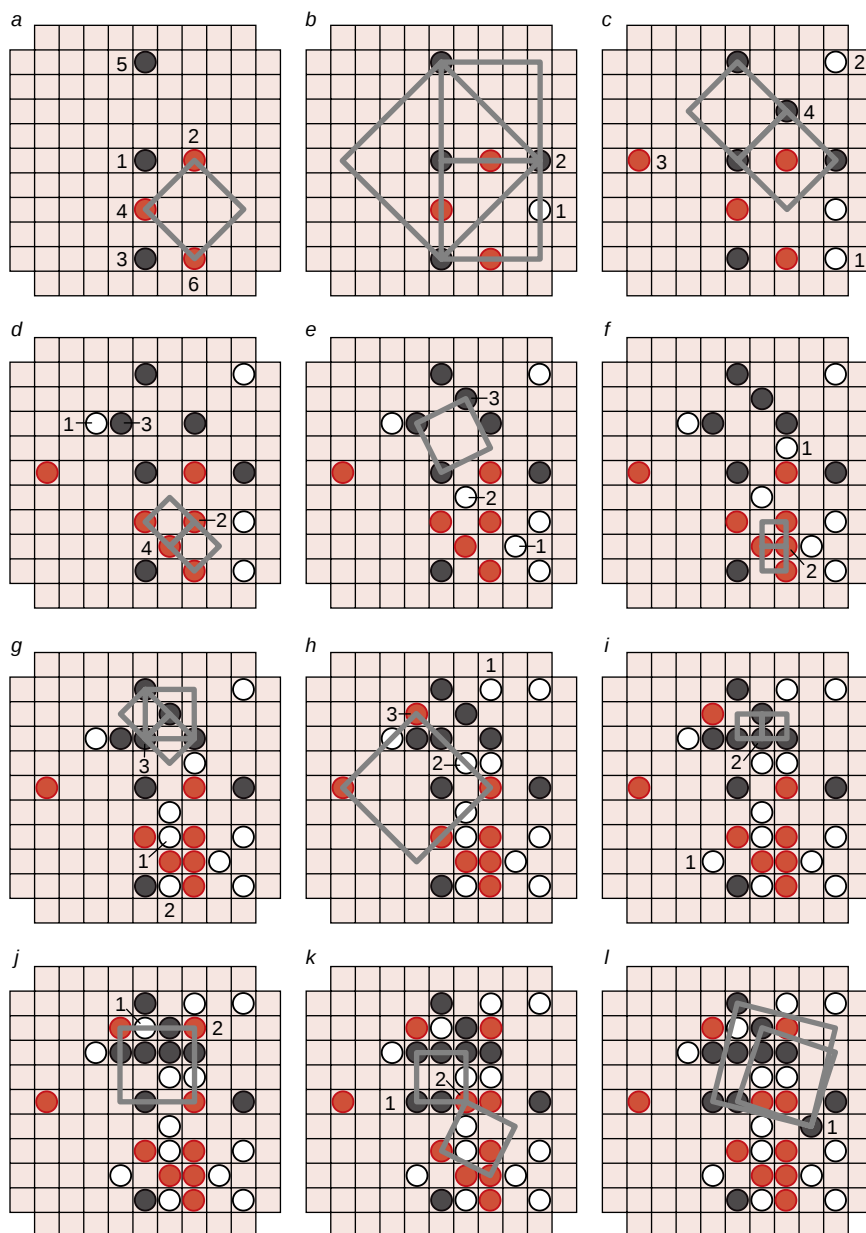


1. UN CARRÉ GAGNANT peut être de taille quelconque (en haut), de sorte que les noirs peuvent réaliser une suite de mouvements qui, en l'absence de *quazars*, forcent le jeu des rouges (en bas).

et six *quazars*. Une fois tous les *quads* posés, pour jouer son tour, il faut déplacer un de ses *quads* sur une case libre de son choix. À tout instant, on peut jouer ses *quazars*, mais une fois joués, ils ne peuvent être déplacés. Dans les *Polyquads*, chaque joueur a des *quads* de deux couleurs (voire plus), et il joue un *quad* de chaque couleur à chaque tour. Il ne crie : «Quad!» que lorsqu'il a formé un carré avec quatre *quads* d'une même couleur.

Dans le jeu des *Quads* rapides, chaque joueur reçoit six *quads* et six *quazars*. À chaque tour, il peut soit placer un nouveau *quad*, soit en déplacer un déjà posé. Les *quazars* sont joués, comme d'habitude, avant les *quads*. Les *Quads* croisés requièrent, comme au bridge, quatre joueurs formant deux équipes de deux. Les joueurs d'une même équipe s'assoient face à face autour de la grille ; une équipe a des *quads* noirs, l'autre des rouges. On tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, et il est interdit de parler. Vous devez comprendre quelle est la stratégie de votre partenaire avant que vos adversaires ne l'aient fait. Cependant, vous pouvez lui envoyer des signaux, par exemple en agitant vos bras, en frappant la table de votre tête ou en sautant sur votre chaise. Si des lecteurs ont l'idée d'autres versions amusantes de ce jeu, qu'ils me les communiquent ; elles seront publiées dans «Réaction».

2. CET EXEMPLE DE JEU montre tous les carrés potentiels lorsqu'ils apparaissent dans la partie. Les nombres indiquent l'ordre dans lequel les pièces ont été jouées. Après dix coups, les rouges ont épuisé leurs *quazars*, et les noirs gagnent en jouant un coup bicarré.



Réaction

Le numéro 218 de *Pour la Science* (décembre 1995) a engendré nombre de lettres éclaircissant l'historique de la suite de «Morse-Hedlund» non-3 : 0110100110010110...

Jeffrey Shallit, de l'Université de Waterloo, écrit : «De nos jours, cette suite est attribuée au mathématicien norvégien Axel Thue, qui traita du problème des répétitions dans une suite d'articles à partir de 1906. Il prouva même qu'elle est sans chevauchement, une propriété encore plus forte. Son application aux échecs fut, remarquée pour la première fois, dans un résumé de Morse dans le *Bulletin de la société américaine de mathématiques*, vol. 44, n° 9, 1938, p. 632. Pour avoir une vision plaisante de cette application du travail de Morse, voir *A mathematician gives an hour to chess*, par D. MacMurray, dans le numéro 10 d'octobre 1938 de la *Chess Review*.»

Jean Brette, du Palais de la découverte, nous signale une référence plus ancienne «cette suite avait déjà été rencontrée

implicitement en 1851 par le mathématicien français E. Prouhet (*Compte rendus de l'académie des sciences*, vol. 33, n° 8, 25 août 1851, p. 225) dans l'étude d'un résultat intéressant : on peut séparer les entiers compris entre 1 et 2^m en deux classes A et B comportant le même nombre d'éléments de façon que la somme des puissances k ième des éléments de A soit égale à celle des puissances k ième des éléments de B, pour tout k inférieur à m . Pour cela on construit la suite de Morse M_m de longueur 2^m . L'ensemble A contient alors tous les entiers j tels que le j ième terme de M_m soit égal à 0 et B contient les autres. Par exemple, pour $m = 3$, la suite M_3 est 01101001, $A_3 = \{1, 4, 6, 7\}$, $B_3 = \{2, 3, 5, 8\}$ et on vérifie bien que $1 + 4 + 6 + 7 = 2 + 3 + 5 + 8 = 18$ et que $1 + 16 + 36 + 49 = 4 + 9 + 25 + 64 = 102$. Dans son article, Prouhet généralise ce résultat aux entiers compris entre 1 et n^m qu'il sépare en n classes vérifiant les mêmes égalités».

Des pois sans poids

SHAWN CARLSON

Faites germer des graines en pesanteur réduite.

Des phénomènes aussi remarquables qu'insoupçonnés ont lieu lorsque vous inclinez une plante : des hormones nommées auxines se rassemblent dans la partie inférieure des racines et de la tige. Elles stimulent la croissance et la division des cellules de la tige, de sorte que le bas de la tige croît plus vite que le haut et provoque son redressement. Dans les cellules des racines, au contraire, les auxines retardent la croissance cellulaire : les cellules pauvres en auxines, proches du haut des racines, se développent beaucoup plus vite que les cellules riches en auxines du bas des racines, ce qui dévie ces

dernières vers le bas. Ainsi les plantes couchées s'alignent sans cesse avec la force de pesanteur.

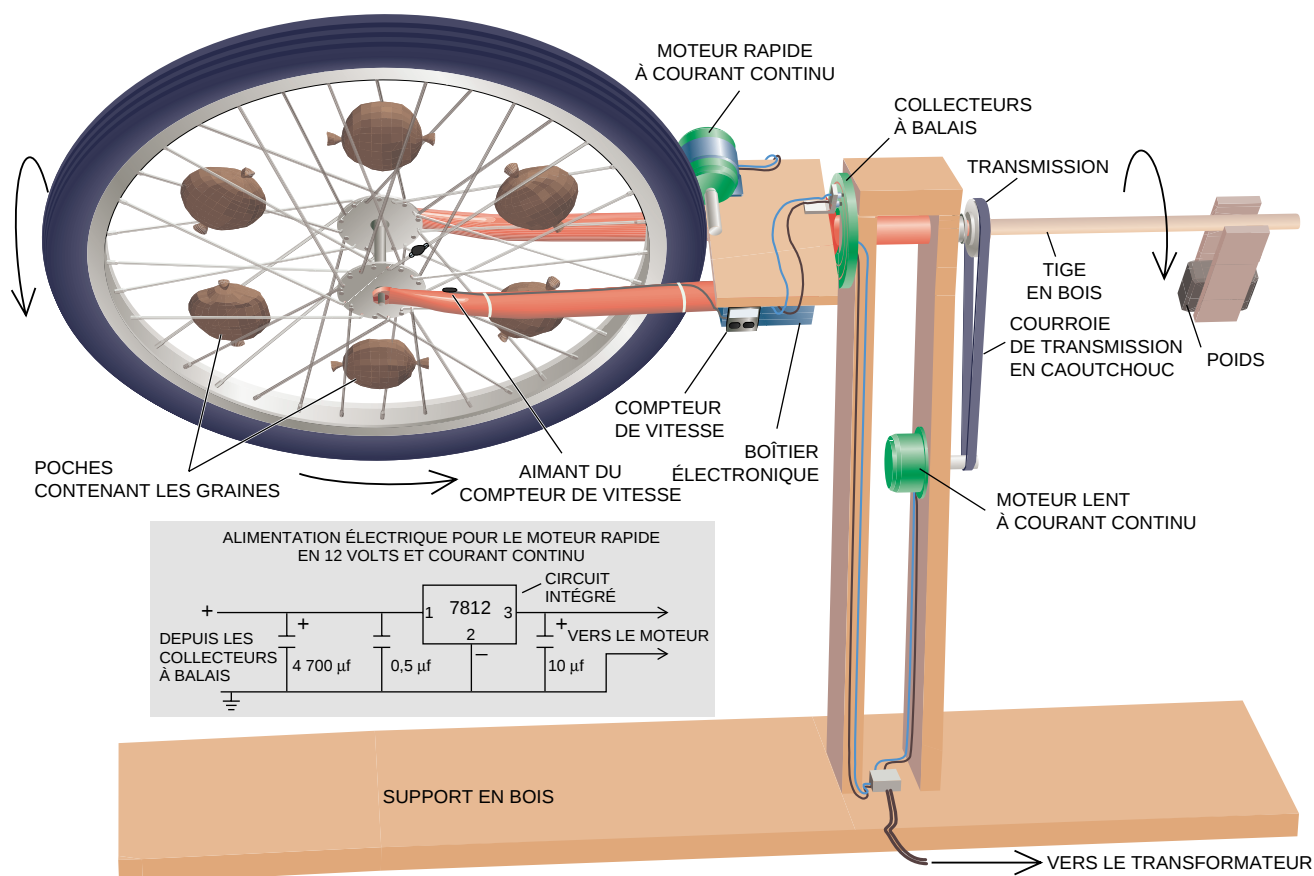
Les botanistes nomment géotropisme cette réaction des plantes à la pesanteur. Au début du XIX^e siècle, ils explorèrent le géotropisme en cultivant des plantes sur des roues en rotation, les exposant ainsi à des forces centrifuges ajoutées à la gravité ; les plantes poussent alors dans la direction opposée à la force résultante qui leur est appliquée, comme l'a montré le Palais de la Découverte.

Les botanistes ont d'abord observé que les plantes réagissent lentement à

la gravité : la plupart des plantes doivent être courbées pendant plus d'une minute avant que les auxines commencent à se répartir. Puis, au début du siècle, ils utilisèrent un appareil nommé clinostat, afin d'étudier les réactions des végétaux dans un environnement où la gravité est presque nulle. Les clinostats restent utilisés aujourd'hui : en faisant tourner lentement la plante aussi bien verticalement qu'horizontalement, le clinostat empêche celle-ci de s'orienter sur la gravité terrestre. La plante pousse alors comme s'il n'y avait pas de gravité du tout. Les clinostats ont fasciné des générations de scientifiques amateurs.

Curieusement, les biologistes professionnels ont prêté peu d'attention à ce qui est peut-être le plus intéressant domaine de recherche : le comportement entre 0 et 1 *g* (où *g* représente l'accélération communiquée à toute masse par la force de pesanteur terrestre, soit environ 9,8 mètres par seconde au carré). C'est une bonne nouvelle pour les amateurs, car un peu d'application peut leur valoir des découvertes originales.

Je vous propose d'utiliser une roue de bicyclette comme plate-forme rotative du dispositif. En choisissant bien la



UNE ROUE DE BICYCLETTE qui tourne transversalement et autour de son moyeu permet à des graines, contenues dans des poches fixées aux rayons, de germer comme à bord d'un vaisseau spatial.

En construisant l'alimentation électrique du moteur rapide, assurez-vous que le condensateur de 4 700 microfarads est situé à plus de cinq centimètres du circuit intégré de type 7812.