

Le laçage élucidé

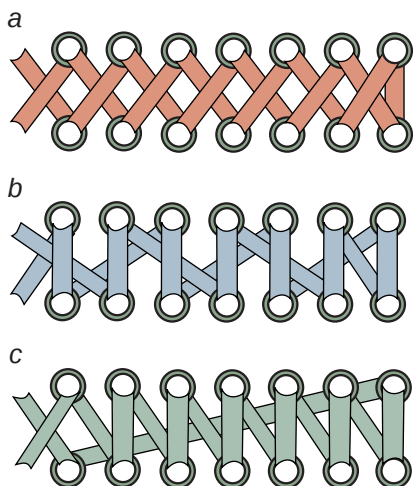
Le laçage en zigzag est le plus court.

Avant que les mathématiciens n'étudient le problème, le choix de la technique de laçage relevait des discussions de type gullivérien où les grosboutistes s'opposent aux petits-boutiens pour la manière de manger les œufs à la coque. Fallait-il utiliser la technique en zigzag (a), le laçage tous les deux trous (b) ou la technique rapide (c)?

Le problème était-il bien posé? Comment comparer les laçages? Le mathématicien John Halton, de l'Université de Californie à Berkeley, a examiné la question du point de vue de la longueur de lacet utilisée (*Mathematical Intelligencer*, automne 1995). Existait-il une réponse universelle quel que soit l'écartement des œillets et leurs nombres? Oui, répond John Halton avec force en s'appuyant résolument sur des graphiques et l'inégalité triangulaire, selon laquelle la somme des longueurs de deux cotés d'un triangle est supérieure à la longueur d'un côté.

Le laçage le plus économique quant à la longueur est le laçage en zigzag (a). Le plus mauvais le laçage rapide utilisé dans les magasins de chaussures (c). Et le problème est totalement résolu : il est prouvé que le laçage en zigzag est le moins long possible des laçages imaginables, et le seul à posséder cette propriété...

Qui a affirmé que les mathématiciens ne s'intéressaient pas au concret?



Les différents types de laçage, en zigzag (a), laçage tous les deux trous (b) et laçage rapide (c). Le laçage a est le plus court.

Un problème de cou

Le cou des sauropodes n'était ni souple ni mobile.

L'allure des dinosaures sauropodes nous est familière : ces herbivores quadrupèdes au long cou et à la longue queue, qui répondent aux doux noms de *Diplodocus* ou de *Brachiosaurus*, ont envahi les livres pour enfants. Le cou allongé de ces animaux fait toutefois l'objet de représentations fantaisistes, montrant deux sauropodes tendrement enlacés par le cou, tels les serpents d'un caducée, ou, pour répondre à une contrainte de mise en page, l'ensemble du corps inscrit dans un S esthétique. Des squelettes mal montés de ces animaux sont aussi présentés dans des expositions : les vertèbres de certains dinosaures sont désarticulées pour suivre la courbe élégante en col de cygne imposée par une armature métallique. Selon l'étude anatomique et biomécanique, les sauropodes étaient plutôt des animaux lents dont le cou, à l'horizontale, leur permettait de brouter la végétation à des hauteurs intermédiaires. Ils avaient développé des systèmes originaux de circulation sanguine et de respiration.

Avec John Martin, du Muséum de Leicester, et Dino Frey, du Muséum de Karlsruhe, nous avons étudié l'anatomie des vertèbres cervicales des sauropodes et les propriétés biomécaniques des muscles et des ligaments du cou. Les

côtes cervicales allongées, des baguettes osseuses qui naissent à la face ventrale des vertèbres cervicales et longent le cou, en assuraient la rigidité. Dans certains cas, ces côtes se prolongent sur les deux ou trois vertèbres suivantes et se superposent à celles de ces vertèbres. Chez les genres de sauropodes à cou très long, tel *Mamenchisaurus*, où le cou mesure 11 mètres de long pour une longueur totale de 22 mètres, la mobilité devait être très réduite et le cou relativement rigide. Chez les genres au cou moins allongé, la mobilité était peut-être plus grande.

Le cou était soutenu par un système ventral faisant intervenir les côtes cervicales et le puissant réseau de ligaments qui les relie. Un tel système maintient l'ensemble du cou du crocodile actuel. Le cou des sauropodes se comportait comme une poutrelle. La structure osseuse des vertèbres cervicales allie légèreté et résistance : l'économie de matériaux permet l'allègement de la structure.

La plupart des sauropodes auraient porté le cou horizontalement ; ils accédaient à la végétation comprise entre le niveau du sol et cinq mètres de haut environ. Toutefois, *Brachiosaurus* et les autres brachiosauridés, dont les longs membres antérieurs imposent à la colonne verté-

brale une courbure proche de celle que l'on observe chez la girafe, auraient eu un port plus redressé.

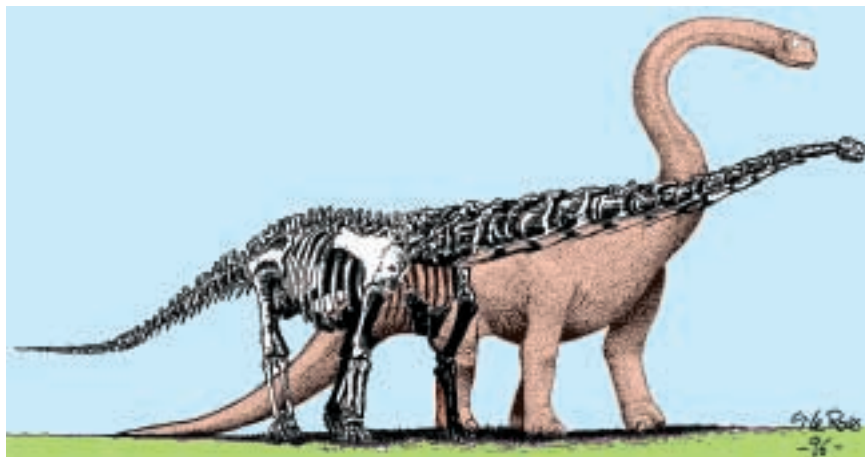
UNE AGILITÉ LIMITÉE

Nous avons évalué la locomotion des sauropodes à partir de celle de grands animaux actuels. L'observation du déplacement des éléphants donne une limite supérieure de la vitesse de cours : les sauropodes auraient marché, ou couru lentement. Étaient-ils agiles, capables de se tenir sur leurs membres postérieurs pour atteindre une végétation élevée ? La vision séduisante d'un animal d'une vingtaine de mètres de long dressé sur ses pattes postérieures est contredite par la résistance des membres : ils seraient soumis à des contraintes trop fortes. Hormis dans les cirques, les éléphants adoptent rarement une position bipède ; la bipédie ne nous semble pas non plus un comportement fréquent des sauropodes, même si elle pouvait se produire, lors de l'accouplement par exemple.

Quels systèmes circulatoire et respiratoire permettaient aux sauropodes de vivre avec un cou aussi long ? Comment le sang arrivait-il au cerveau et comment la pression sanguine était-elle adaptée aux changements de position ? Chez la girafe, une importante hypertension assure l'apport sanguin au niveau cérébral. Dans le cas des sauropodes, une telle solution aurait nécessité un système cardiaque très volumineux pour pomper un flot continu de sang. Des vaisseaux contractiles, propulsant le sang de proche en proche tout le long du cou, sont plus probables. La membrane alaire des chauves-souris contient de tels vaisseaux contractiles.

Le type de respiration que l'on rencontre chez les mammifères présenterait, pour un cou très long, un phénomène d'espace mort. Ce phénomène empêche de plonger avec un tuba de plusieurs mètres de long : l'air expiré, qui contient surtout du dioxyde de carbone, ne sort pas du tuba et est réinspiré par le plongeur qui s'asphyxie progressivement. Le système respiratoire des oiseaux, en revanche, ne subit pas l'effet d'espace mort : l'air inspiré est stocké dans des sacs aériens, d'où un flux d'air constant alimente le poumon. Une partie des sacs aériens est contenue dans les os, à structure alvéolaire. Comme de nombreux os des sauropodes ont une structure alvéolaire, leur système respiratoire ressemblait probablement à celui des oiseaux.

Valérie MARTIN-ROLLAND
Musée des dinosaures, Espéraza



Le cou des sauropodes était rendu rigide par les côtes cervicales allongées, des baguettes osseuses qui naissent sur la face ventrale des vertèbres cervicales. Les reconstitutions qui montrent de tels animaux avec un cou en col de cygne (en rose) sont purement fantaisistes.

La porte de l'antimonde

Pour la première fois, des physiciens créent des atomes d'antimatière.

Depuis les années 1950, on sait que chaque particule possède une antiparticule, son équivalent d'antimatière. Mises en présence, particule et antiparticule s'annihilent en libérant de l'énergie. Dans la théorie du Big Bang, l'Univers primordial contenait plus de matière que d'antimatière. Ce surplus n'ayant pas trouvé d'antimatière pour s'annihiler, il a subsisté et constitue la matière ordinaire de l'Univers actuel. Quelle est l'origine de cette dissymétrie primordiale ? L'antimatière a-t-elle un comportement similaire à celui de la matière ? Toutes ces questions sont encore sans réponse, mais, en synthétisant, au CERN, neuf atomes d'antihydrogène, une équipe de physiciens allemands, italiens et suisses vient d'entamer l'exploration de la Classification périodique des «anti-éléments».

Imaginons un miroir qui inverserait la charge des particules. Le positon, découvert dans le rayonnement cosmique en 1932, est l'image dans ce miroir de l'électron : il possède exactement la même masse, mais sa charge est positive et sa parité est inversée (le miroir inverse la gauche et la droite). Découvert dans

un accélérateur de particules en 1955, l'antiproton possède une charge négative et a une parité opposée à celle du proton. De même que les particules forment des atomes de matière, on pensait que les antiparticules formeraient des atomes d'antimatière. Pour l'atome le plus simple, l'hydrogène, un unique électron gravite autour d'un seul proton tandis que pour l'atome d'antimatière le plus simple, l'antihydrogène, un positon graviterait autour d'un antiproton. Alors que l'on a déjà créé ou observé les antiparticules de nombreuses particules connues, aucun atome d'antimatière n'avait été observé.

Aujourd'hui, non seulement on sait produire des antiprotons en quantité, mais, on sait également les stocker. Au CERN des antiprotons sont produits par collision de protons sur des fils métalliques. Ils sont stockés dans un anneau, le LEAR (l'acronyme de *low energy antiproton ring* soit «anneau d'antiproton de basse énergie»). Dans cet anneau carré de 20 mètres de côté, aux angles arrondis, un paquet contenant 10 milliards d'antiprotons est stocké durant plusieurs heures. En octobre 1995, les

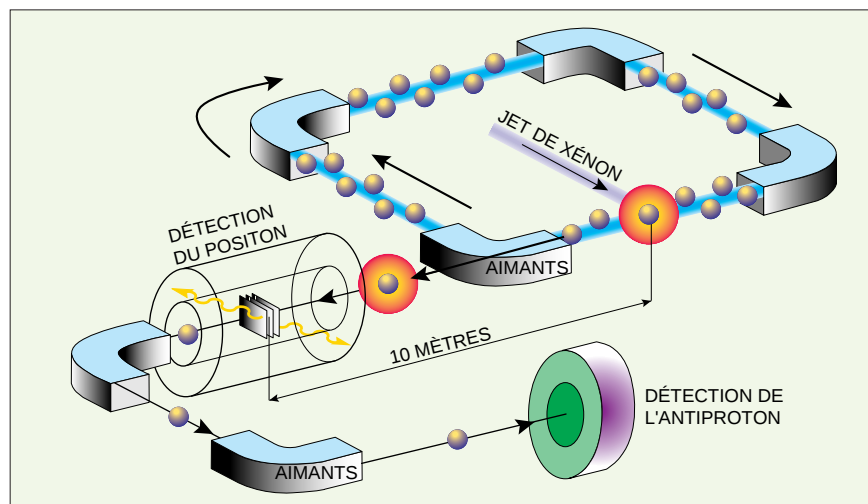
physiciens des particules ont émis un jet de xénon à travers le faisceau d'antiprotons du LEAR. À proximité du champ électrique des noyaux de xénon, les antiprotons peuvent convertir une partie de leur énergie en une paire électron-positon. C'est un processus dont la section efficace (la probabilité d'interaction) est proportionnelle à la quantité de mouvement des antiprotons. Pour rendre cette quantité maximale, on utilise des antiprotons qui possèdent une vitesse égale aux 9/10 de la vitesse de la lumière.

Il est arrivé, lorsque la vitesse d'un positon était suffisamment proche de celle d'un antiproton incident, que les deux antiparticules s'unissent et forment ainsi un atome d'antihydrogène. La probabilité, pour un antiproton traversant le jet de gaz, de former un atome d'antihydrogène est de 10^{-20} .

Durant les 15 heures qu'a duré l'expérience, seuls 11 événements ont été enregistrés comme étant produits par des atomes d'antihydrogène. Les atomes synthétisés de cette manière étant neutres, ils n'étaient pas courbés par le champ magnétique des aimants du LEAR et ont subsisté durant 40 milliardièmes de seconde avant de percuter le détecteur, situé dix mètres plus loin. Dans ce dernier, les atomes d'antihydrogène se cassaient. D'une part, chaque positon s'annihilait avec un électron du silicium formant deux photons d'énergie égale à 0,511 million d'électronvolts émis dans des directions opposées et détectés en coïncidence ; d'autre part, comme le proton détecté possède bien l'énergie maximale du faisceau, on discriminait entre la formation d'antihydrogène et l'annihilation d'un antineutron, une autre antiparticule créée par ce mécanisme. Le bruit résiduel était de deux événements.

Isolés de la matière, les atomes d'antihydrogène devraient être aussi stables que l'hydrogène ordinaire. Malheureusement, leur brève durée de vie rend irréalisable toute expérience sur les propriétés de ces atomes d'antimatière : on ne sait pas les ralentir sans les casser.

En revanche, d'autres méthodes de création sont envisagées. En particulier, des physiciens espèrent ralentir suffisamment des antiprotons en tirant le faisceau à travers une série de feuilles métalliques. Ainsi, on pourrait les confiner dans des pièges électromagnétiques et les combiner avec des positons piégés de la même manière. Si les propriétés des atomes d'antimatière venaient à différer de celle de la matière et, en particulier, si leur spectre n'était pas identique (ce qui pourra se vérifier avec une précision extrême), le Modèle standard, qui est la théorie de physique des particules la plus aboutie aujourd'hui, devrait être révisé. □



On tire un jet de xénon sur des milliards d'antiprotons qui tournent dans le LEAR. La collision entre les antiprotons et le xénon peut créer un positon qui possède la vitesse adéquate pour se mettre en orbite autour de l'antiproton. Un atome d'antihydrogène est ainsi créé qui va sortir de l'anneau et être cassé dix mètres plus loin, en rencontrant une cible de silicium. Dans cette dernière, le positon émet deux photons dans des directions opposées, tandis que l'antiproton poursuit et est détecté dans une chambre à fils.