

ne pourrions pas déduire directement de ces mesures de «meilleures» lois de la gravitation, mais nous pourrions commencer à tester les différentes théories qui permettent, dès aujourd'hui, d'envisager de telles variations, notamment les théories des cordes.

Les théories des cordes, dont le but est d'unifier les quatre interactions fondamentales – et de donner une description de la gravité à très haute énergie – sont des théories définies dans des espaces-temps à 10 ou 11 dimensions. Pour les théoriciens, si notre monde ne présente que quatre dimensions, c'est que les autres sont enroulées sur de très petites distances que la résolution de nos expériences ne peut pas encore révéler. Or, le volume de ces dimensions supplémentaires devrait influencer sur la valeur observée des constantes de couplage des interactions fondamentales.

En effet, le nombre de lignes de force issue de la source d'un champ et interceptées par une particule détermine l'intensité de la force portée par ce champ (voir la figure 5). Or certaines de ces lignes de champ pourraient s'échapper dans le volume des dimensions supplémentaires. Par conséquent, l'intensité d'une interaction fondamentale dépend du volume des dimensions supplémentaires et pourrait évoluer si ce volume variait.

Par ailleurs, en plus des quatre interactions fondamentales, les théories des cordes prédisent l'existence d'une cinquième interaction transmise par une particule nommée dilaton. Le dilaton interagit de diverses façons avec les particules matérielles et cause également une variation des constantes de couplage des autres interactions.

Le volume des dimensions supplémentaires et le dilaton sont des quantités dynamiques qui peuvent varier dans le temps et dans l'espace, par conséquent, les théories des cordes prédisent une variation des constantes de couplage des interactions fondamentales, parmi lesquelles la constante de structure fine. Soulignons que si ce mécanisme est à l'œuvre dans les phénomènes que J. Webb et ses collègues pensent avoir observés, il n'est pas envisageable que seule la constante de structure fine varie, les autres restant fixes.

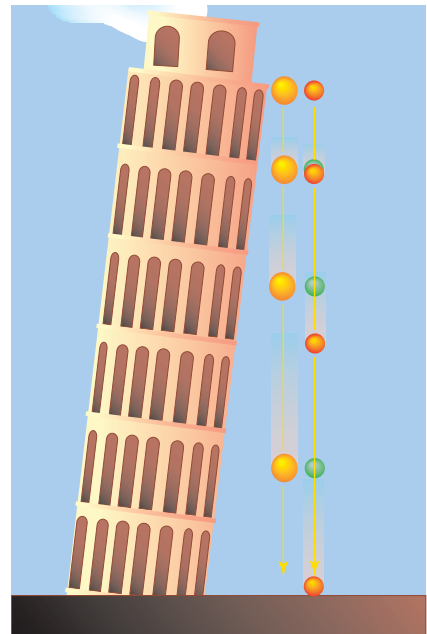
Si l'étude de la fixité des constantes constitue un test du principe d'équivalence, les mesures directes de l'universalité de la chute libre nous renseignent, à l'inverse, sur l'éventuelle variation des dites constantes. Aujourd'hui, on teste

le principe d'équivalence en laboratoire et dans l'espace avec une grande précision. L'expérience de télémétrie laser nommée *Lunar Laser Ranging* qui surveille la trajectoire de la Lune depuis plus de 30 ans avec une précision de un centimètre a permis de conclure que la Terre et la Lune tombent dans le champ de gravité du Soleil avec la même accélération (à 10^{-14} centimètre par seconde carrée près). De cette limite sur la violation du principe d'équivalence, on déduit une limite pour la variation spatiale de la constante de structure fine : sur une distance de l'ordre de l'orbite terrestre, elle ne peut varier de plus d'une partie pour 10^{32} par centimètre. En extrapolant grossièrement cette variation à la taille de l'Univers observable (environ 15 milliards d'années-lumière), on estime que, à cette échelle, la variation relative de la constante de structure fine ne peut dépasser une partie pour 10^4 , ce qui est juste un ordre de grandeur au-dessus des mesures effectuées par J. Webb et ses collègues. Cela signifie que cette mesure est compatible avec les tests du principe d'équivalence réalisés jusqu'ici dans le Système solaire.

Nouvelles expériences

Dans un proche avenir, deux laboratoires spatiaux, *Microscope* et STEP, qui seront lancés respectivement par l'Agence spatiale européenne et par la NASA, vont tester le principe d'équivalence avec une précision 100 à 100 000 fois supérieure à celle des expériences précédentes. Il est fort probable que, si la variation de la constante de structure fine est réelle, ces expériences détecteront une violation du principe d'équivalence.

D'un point de vue théorique, la détection d'une telle variation serait une preuve indiscutable de l'existence d'une nouvelle physique. Tout comme la théorie de la relativité générale a fait perdre sa structure rigide et immuable à l'espace-temps, les nouvelles théories des hautes énergies font perdre aux constantes leur fixité. Malheureusement, les théories des cordes ne nous fournissent pas, pour l'instant, le mécanisme de stabilisation des dimensions supplémentaires et du dilaton qui rendent compte de la quasi-fixité des constantes aujourd'hui. De plus, si l'on confirme la mesure d'une variation de la constante de structure fine, il faudra expliquer pourquoi la stabilisation de ces quantités fut à la fois si efficace et si tardive



6. SELON LE PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE, l'inertie d'un corps, sa masse inerte, est égale à sa sensibilité à la gravité, sa masse grave. Dès lors, on parle simplement de la masse d'un corps pour désigner ces deux propriétés. Une des conséquences de ce principe est l'universalité de la chute libre : tous les corps tombent dans le vide de la même façon (en vert). Si la constante de structure fine variait dans le temps et dans l'espace, l'énergie électromagnétique contenue dans un objet varierait d'un point à l'autre de sa trajectoire, et, en vertu de l'équation $E = mc^2$, sa masse varierait également. En conséquence, l'universalité de la chute libre devrait être mise en défaut.

dans l'histoire de l'Univers (assez, en tout cas, pour que nous l'observions 2 milliards d'années après le Big-bang). Ainsi, l'étude de la variation des constantes fondamentales a connu des ramifications étonnantes depuis qu'elle a été postulée par Dirac. Il ne reste presque rien, aujourd'hui, de son hypothèse des grands nombres, sauf peut-être ceci : nous pensons toujours que la variation des constantes a une relation intime avec le fait que l'Univers est en expansion et évolue... même si nous ne comprenons toujours pas laquelle.

Jean-Philippe UZAN mène ses recherches à l'Institut d'astrophysique de Paris et au Laboratoire de physique théorique d'Orsay.

G. COHEN-TANOUDJI, *Les constantes universelles*, Hachette, 1995.

J.-P. UZAN, *The fundamental constants and their variation*, hep-ph/0205340.

N. ARKANI-HAMED, S. DIMOPOULOS et G. DVALI, *Les dimensions cachées de l'Univers*, in *Pour la Science*, n° 276, octobre 2000.

Le voyage des globules rouges

JACQUES DUFAUX • PATRICK SNABRE • GÉRARD GUIFFANT

Pour faciliter l'écoulement du sang et réduire les frottements, les globules rouges se déforment et s'alignent dans les capillaires. Dans les vaisseaux de diamètre supérieur, ils forment des agrégats qui se font et se défont au fil du réseau. Des anomalies dans la formation de ces agrégats perturbent la circulation sanguine.

Le 23 octobre 2000, dans la salle d'attente de l'aéroport de Londres-Heathrow, une femme s'écroule, victime d'une embolie pulmonaire. Un caillot de sang s'est formé dans son artère pulmonaire et l'a obstruée. Elle vient de faire un voyage qui a duré 20 heures, durant lequel ses jambes ont été immobilisées, de sorte que les petites pompes qui aident le sang à circuler ont cessé de refouler efficacement le sang vers le cœur. Des gros agrégats de globules rouges se sont formés, épaississant le sang et aboutissant à la formation de caillots qui ont obstrué certains vaisseaux.

Chaque année, le « syndrome de la classe économique » tue environ 100 personnes de par le monde, démontrant combien la fluidité du sang représente un équilibre à la fois vital et fragile. La victime de Londres ne fumait pas, était en bonne condition physique et avait déjà effectué plusieurs longs voyages en avion. Les modifications de la fluidité du sang sont intervenues en raison d'une dérégulation des écoulements sanguins dans le réseau circulatoire.

Comment le sang circule-t-il ? Le cœur est-il secondé par quelques auxiliaires efficaces ? Comment les globules rouges se faufilent-ils dans les minuscules capillaires qui irriguent les recoins les plus retirés de l'organisme ? Les globules rouges, ou érythrocytes, qui délivrent l'oxygène à tous les tissus, sont parmi les principaux acteurs de cette ronde ininterrompue. Remarquablement souples, ils se faufilent dans tous

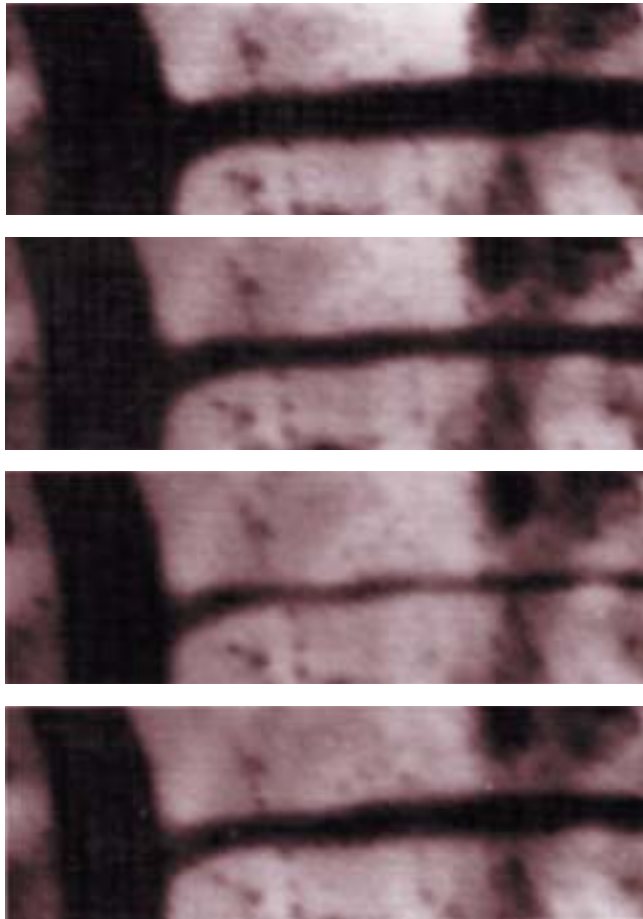
les vaisseaux sanguins (voir la figure 1). Leur forme d'outre partiellement remplie les autorise à se déformer en tout sens, et à gagner les plus petits capillaires pour y délivrer leur bouffée d'oxygène. Ils ont également la propriété de former des agrégats réversibles (ce qui est différent de la coagulation, phénomène irréversible). Ces agrégats facilitent l'écoulement du sang dans les vaisseaux, mais peuvent aussi les obstruer quand l'agrégation est excessive. Nous examinerons ces deux propriétés des globules rouges – leur déformabilité et leur faculté naturelle à s'agréger – ainsi que leur rôle dans la circulation du sang.

Un réseau extrêmement ramifié

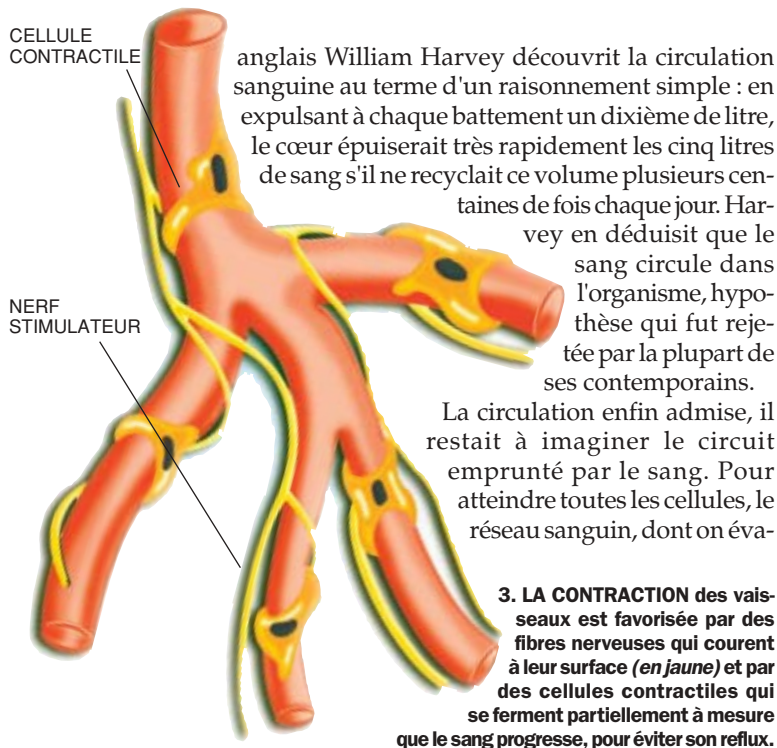
L'irrigation des tissus d'un organisme est une tâche ardue, la longueur totale des vaisseaux sanguins atteignant 90 000 kilomètres ! Pourtant, les puissances cumulées de 30 cœurs humains suffiraient tout juste à faire briller une lampe de chevet : le cœur est une pompe qui sacrifie plus à la longévité qu'à la puissance. Les ventricules expulsent, en 24 heures, quelque 10 000 litres de sang. Au XVII^e siècle, le médecin

1. LE RÉSEAU SANGUIN, très ramifié, est le siège de différents types d'écoulements. Dans les vaisseaux sanguins larges, telles les grosses artères, les globules rouges tournoient et se déforment au gré des tourbillons et des collisions incessantes. Dans les vaisseaux plus étroits, les écoulements lents favorisent l'association des globules sous la forme de « piles d'assiettes » ; cette agrégation est réversible. Devant une bifurcation, les empilements de globules se défont et chacun emprunte son propre chemin. Dans les plus petits capillaires, les globules rouges se déforment et adoptent une forme d'« aile de parachute ».





2. LES VEINULES ET LES ARTÉRIOLES sont entourées de cellules contractiles qui, commandées par l'influx nerveux, font varier leur diamètre. Ces contractions font avancer le sang dans les portions les plus étroites du réseau circulatoire. Sur cette série de photographies espacées de dix secondes, on observe une diminution progressive du diamètre de l'artériole horizontale, puis sur la dernière photographie, un relâchement de l'artériole avant un nouveau cycle de contraction.



lue la longueur à plus de deux fois la circonférence de la Terre, adopte une structure fractale : les plus gros vaisseaux, telle l'aorte, l'artère qui quitte le cœur, se divisent en vaisseaux de plus en plus petits jusqu'aux plus étroits des capillaires dont le diamètre est de l'ordre de trois millièmes de millimètre dans les portions les plus fines. C'est pourquoi, à l'exception du globe oculaire, tout endroit du corps piqué par une aiguille laisse jaillir du sang. Toutefois, cette médaille a un revers : l'extrême ramification du réseau engendre une résistance notable à l'écoulement. À ces deux premières contraintes s'en ajoute une troisième : le sang est un fluide visqueux. Les globules rouges, nécessaires aux échanges gazeux, constituent près de la moitié de la masse sanguine, contribuant eux aussi à augmenter la résistance hydraulique. Comment l'organisme gère-t-il cet ensemble de contraintes ? Il dispose de plusieurs « pompes d'appoint », qui aident le sang à circuler. Des messages nerveux stimulent des muscles qui déforment les artères, et amortissent les fluctuations de la pression dans les vaisseaux (voir les figures 2 et 3). De plus, les petites artères très élastiques absorbent les ondes de pression créées lors des battements cardiaques (si le réseau était rigide, le sang avancerait par à-coups, en reculant à chaque contraction du cœur).

Comme les artères et les artérioles, les veines et les veinules participent à la circulation du sang. Durant la marche, le réseau veineux richement irrigué de la plante des pieds est pressé à chaque pas telle une éponge (voir la figure 4). Cette pression contribue à faire remonter le sang, pour le propulser vers le cœur. Ainsi, des chaussures trop ajustées ou des talons trop hauts finissent par causer une fatigue cardiaque. Le relâchement et la contraction des muscles, lors de la marche, compriment les veines et chassent de même le sang vers le cœur. Un exercice régulier, telle la marche, améliore l'irrigation des muscles et évite la stase veineuse, ou stagnation du sang, alors que la position assise prolongée peut avoir des conséquences néfastes. Outre les aides mécaniques et les régulations nerveuses, les caractéristiques des globules rouges facilitent l'écoulement du sang.

L'érythrocyte, maître de la fluidité

Quand on observe un capillaire sanguin de quelques micromètres de diamètre, on constate que les globules rouges occupent toute la largeur du vaisseau et que, néanmoins, ils progressent sans difficulté, grâce à leur aptitude à la déformation. Imaginons une expérience simple, consistant à remplir une bassine avec des ballons de baudruche gonflés d'eau. Au fond de la cuve, on perce un trou dont le diamètre est légèrement supérieur à celui des ballons. En s'engageant dans le trou, les ballons se bousculent, bloquent parfois l'ouverture, et s'échappent difficilement. Au contraire, des ballons vidés d'un tiers de leur volume se déforment et parviennent à se faufiler : la cuve se vide alors en quelques secondes.

Les érythrocytes présentent justement la forme d'une baudruche partiellement dégonflée. Pour atteindre une telle forme, le globule rouge expulse son noyau lors des premières semaines de son existence. Privé de ce noyau, qui assure normalement la synthèse des protéines, l'érythrocyte est condamné à moyenne échéance, mais il acquiert la capacité de se déformer, indispensable à sa mission de convoyage de l'oxygène. Les érythrocytes ont une forme de disque biconcave de sept micromètres de diamètre, de deux micromètres d'épaisseur en périphérie et de un micromètre au centre. En outre, leur

volume (85 micromètres cubes) et leur surface (135 micromètres carrés) varient très peu d'un globule à l'autre ; aujourd'hui, personne ne sait obtenir une suspension de micro-particules déformables aussi bien calibrées.

Grâce à ce stratagème, les globules rouges se fauillent aisément à travers la plupart des vaisseaux, et assurent la respiration de toutes les cellules de l'organisme. Afin d'atteindre les recoins les plus inaccessibles du réseau sans frottement excessif contre les parois des vaisseaux, les globules rouges mettent en œuvre une autre stratégie.

Dans les artérioles et dans les veinules dont le diamètre est compris entre 20 et 300 micromètres, c'est-à-dire supérieur à la taille des globules rouges, les écoulements sont relativement lents et n'empêchent pas l'association des érythrocytes sous la forme de « piles d'assiettes ». Les empilements se regroupent au centre des vaisseaux, laissant la place à une couche lubrifiante de plasma, en contact avec la paroi : cette couche, dite plasmaticque, réduit la résistance à l'écoulement du sang.

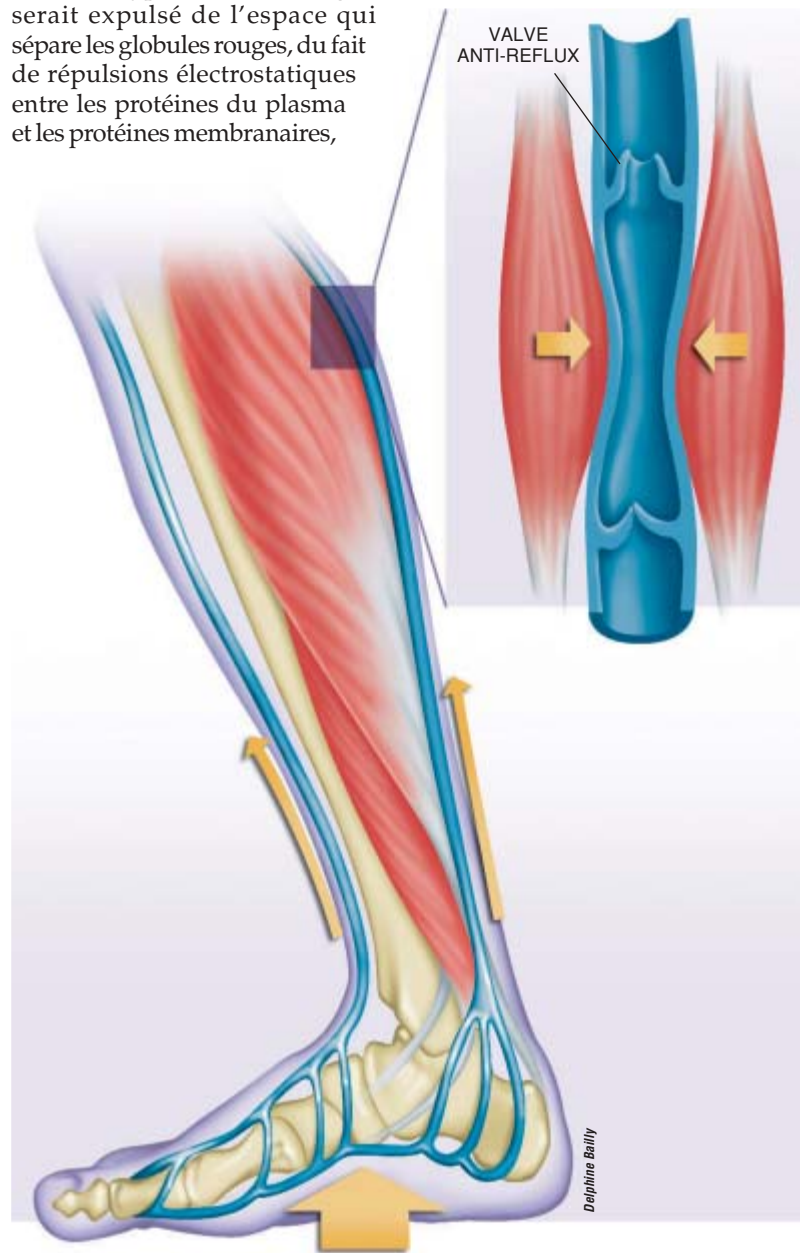
Des piles d'érythrocytes

Pour comprendre la formation de la couche plasmaticque, suivons un érythrocyte à son départ du cœur. Il circule d'abord dans une grosse artère, au milieu de ses semblables dans un désordre complet. Ses congénères se déplacent lentement près des parois du vaisseau et plus vite au centre de l'artère, avec une vitesse proportionnelle au carré de la distance à la paroi vasculaire (selon la loi de Poiseuille). La vitesse du fluide s'annule sur les parois, en raison des frottements, et augmente au centre. Ainsi, dans une grosse artère, le bord d'un globule rouge proche du centre est davantage entraîné que le bord proche de la paroi. De ce fait, les globules rouges, soumis à un courant rapide au centre et à un courant plus lent en périphérie, subissent une force dite de cisaillement et tournent sur eux-mêmes. De surcroît, les collisions, plus nombreuses près des parois, repoussent les globules rouges vers le centre des vaisseaux. Lorsqu'ils atteignent les territoires plus calmes des artérioles, puis des veinules, la vitesse est plus homogène, et les globules rouges cessent de tourner sur eux-mêmes : ils forment des agrégats, s'ordonnent et serpentent en bloc dans la partie centrale des vaisseaux.

L'espace libéré entre un agrégat et la paroi se remplit de plasma ; cette couche plasmaticque joue le rôle d'un lubrifiant qui diminue les frottements des globules rouges contre les parois, facilitant la circulation du sang. Dans les veinules, la couche plasmaticque peut atteindre une dizaine de micromètres d'épaisseur, le faible débit sanguin favorisant l'agrégation des globules rouges et les écoulements, à condition que les agrégats ne grossissent pas au point d'obstruer les vaisseaux. Dans les capillaires de diamètre inférieur à celui des globules rouges, la couche plasmaticque est réduite à l'extrême. Les globules doivent cependant franchir ce cap pour atteindre les tissus les plus reculés de l'organisme. Dans les microvaisseaux, les érythrocytes se déforment et adoptent une forme de corolle, évoquant la voile gonflée d'un parachute (voir la figure 5). Une minuscule couche de plasma subsiste alors entre la membrane des érythrocytes et la paroi des capillaires, laquelle suffit à permettre aux globules déformés de glisser sans difficulté dans les capillaires. Le temps de passage des érythrocytes dans un capillaire dépend de la capa-

cité de la membrane à se déformer et de la viscosité du contenu des globules.

Pourquoi les globules rouges forment-ils ces agrégats facilitant la circulation sanguine ? On a longtemps pensé que les protéines du plasma, notamment le fibrinogène, étaient responsables des interactions réversibles entre les érythrocytes : les molécules de fibrinogène se fixeraient sur certaines protéines membranaires des globules rouges, provoquant leur agrégation par « pontage ». Toutefois, la fixation du fibrinogène sur les glycophorines portées par les globules rouges perturberait la reconnaissance des agents infectieux éventuellement en circulation dans le sang. Selon une autre hypothèse, le fibrinogène serait expulsé de l'espace qui sépare les globules rouges, du fait de répulsions électrostatiques entre les protéines du plasma et les protéines membranaires,



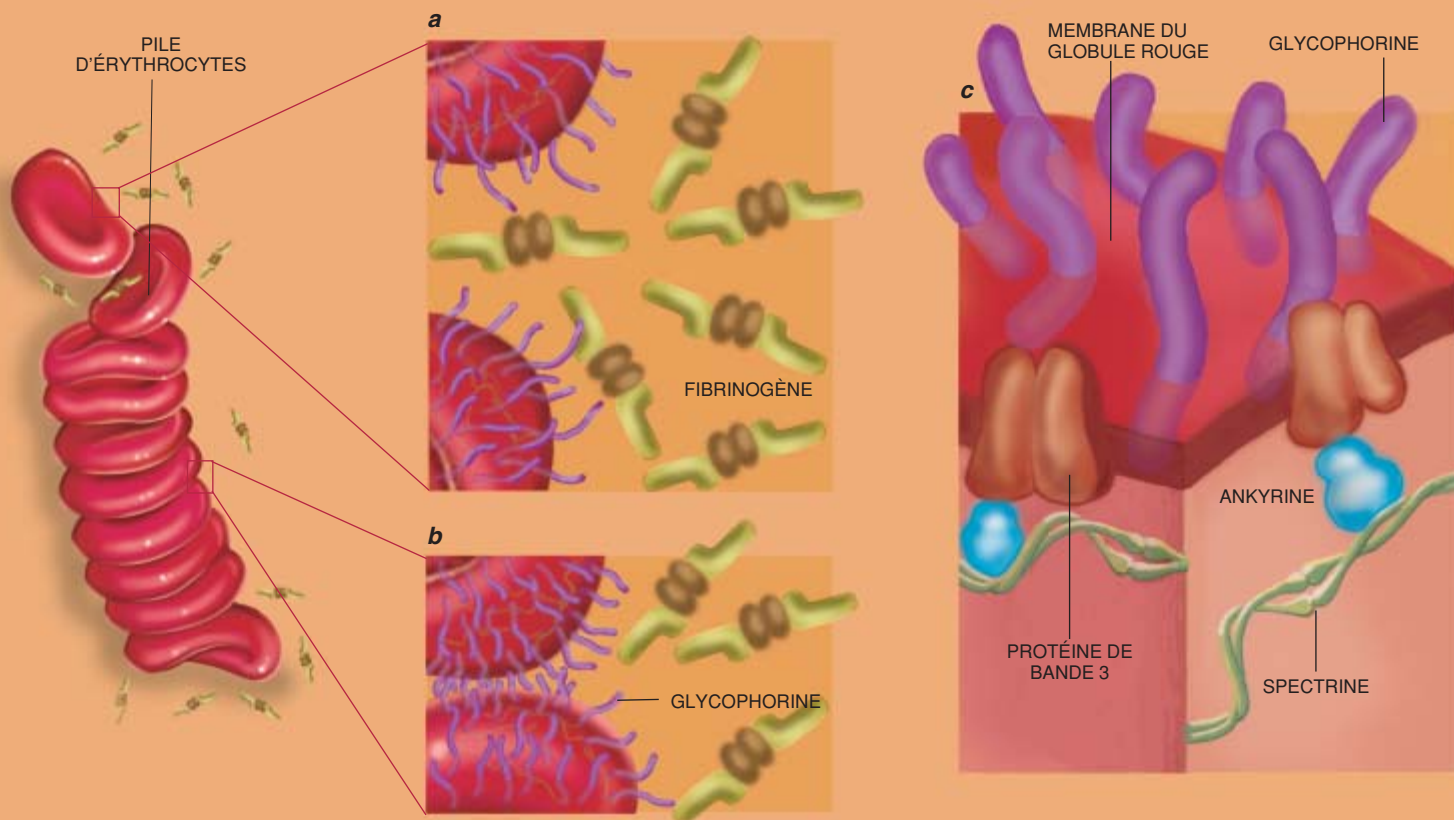
4. AU COURS DE LA MARCHÉ, la pompe du mollet et l'écrasement de la voûte plantaire aident au retour du sang vers le cœur. Avant que le pied se pose, les artères et les veines sont relâchées et le sang s'accumule dans la plante des pieds. Quand le talon touche le sol, le réseau de la plante des pieds est comprimé et le sang est refoulé vers le haut, telle l'eau que l'on expulse d'une éponge imbibée en la pressant. Lorsque le mollet est contracté, il écrase les veines, ce qui propulse le sang vers le haut, le retour du sang vers le bas étant évité par la présence de valves anti-reflux.



5. AUX BIFURCATIONS, les agrégats de globules rouges se défont. Quand les érythrocytes pénètrent dans des vaisseaux dont le diamètre est inférieur à leur propre dimension, ils se déforment et prennent une forme en aile de parachute (flèche).

toutes porteuses de charges négatives. Lors du rapprochement de deux globules, le fibrinogène refoulé exerce alors une pression sur les faces externes des globules rouges (voir la figure 6). Toutefois, de tels agrégats peuvent se dissocier dans un écoulement rapide, ce qui est important lorsque les « piles d'érythrocytes » doivent se défaire pour s'engager dans de nouvelles ramifications du réseau (voir la figure 5). Les globules rouges s'agrègent ou se désagrègent selon les forces hydrodynamiques produites par l'écoulement. La force de cisaillement dissocie les agrégats lorsqu'elle devient supérieure à la force d'agrégation. Ainsi, la présence des agrégats dépend en grande partie des conditions d'écoulement et de la composition protéique du plasma. Dans les grosses artères, aucun agrégat ne peut subsister en raison des importantes forces de cisaillement. Au contraire, les agrégats apparaissent dans les petits vaisseaux, comme les artérioles et les veinules, facilitant la progression du sang.

Les piles d'érythrocytes présentent d'autres avantages. En occupant le centre des vaisseaux, les agrégats repoussent contre les parois les autres éléments du sang, par exemple les plaquettes sanguines nécessaires à la coagulation. Ces dernières doivent en effet circuler à proximité des parois pour s'accrocher aux lésions et participer à la cicatrisation. De même, les globules blancs détectent mieux les messages signalant la présence d'un agent infectieux, s'ils circulent en périphérie ; face à une telle alerte, ils adhèrent à la paroi du vaisseau où ils patrouillaient, et la traversent pour aller combattre l'infection *in situ*.



6. DES PILES D'ÉRYTHROCYTES se forment par interaction du fibrinogène avec les glycoporphines, présentes à la surface des globules. Quand les globules sont éloignés (a), le fibrinogène emplit aussi bien l'espace qui sépare les globules que celui qui les entoure. Quand les globules se rapprochent les uns des autres (b), le fibrinogène est expulsé de la

zone de contact entre les globules (ses charges électriques et celles de la glycoporphine se repoussent). Il en résulte une force de pression sur les faces externes des globules rouges, qui entraîne leur empiement. Outre la glycoporphine, la spectrine est un autre constituant des érythrocytes : elle leur confère leur élasticité (c).

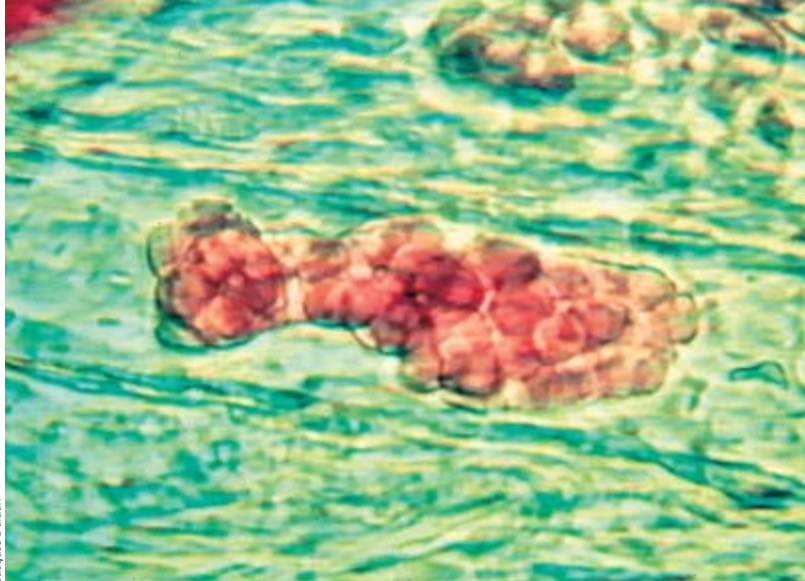
Les pathologies de la circulation

Quand surviennent des anomalies de l'agrégation ou de la déformabilité des globules, diverses pathologies apparaissent. Dans certains cas, notamment dans l'anémie falciforme, les globules sont moins déformables : une mutation sur le gène de l'hémoglobine entraîne la formation de cristaux d'hémoglobine dans les érythrocytes, et les globules prennent une forme de croissants rigides. La circulation sanguine peut être temporairement interrompue dans le réseau des capillaires de certains organes. En raison de l'abondance des capillaires, la situation n'est pas trop grave tant que le nombre de vaisseaux obstrués ne nuit pas à la bonne irrigation de l'organe affecté. Toutefois, la résistance hydraulique du réseau capillaire augmente et impose au cœur une surcharge de travail.

Dans d'autres situations pathologiques, une forte agrégation des globules rouges perturbe l'écoulement du sang. Excès de fibrinogène, hypertension, diabète, présence du virus VIH, mutations des gènes codant certaines protéines membranaires, concentration trop élevée en calcium dans les globules ou sang trop acide, sont autant de facteurs influant sur les interactions des érythrocytes et donnant lieu à une agrégation excessive. Face à ces perturbations qui peuvent menacer l'individu de troubles de la circulation et d'infections, des mécanismes de régulation se mettent en place. Aujourd'hui, l'agrégation est considérée comme un indicateur de l'état de santé de l'organisme, tout comme la température. Diverses « agressions » contre l'organisme peuvent nuire à la capacité naturelle d'agrégation des globules rouges. Ainsi, le tabac et une alimentation déséquilibrée augmentent les risques d'un excès d'agrégation érythrocytaire, pouvant occasionner un arrêt temporaire ou définitif de la circulation (voir la figure 7). Quand le sang ralentit, des lipides se déposent sur la paroi (voire dans la paroi) des vaisseaux sanguins et en rétrécissent le diamètre. Par leur action désagrégante, certains médicaments, telle l'aspirine, facilitent la circulation sanguine. Les vins riches en tanin et les produits alimentaires contenant de la vitamine E améliorent aussi la microcirculation, prescription plus agréable que la saignée qui fut longtemps l'unique remède !

Pour détecter une agrégation anormale des globules rouges, un examen de routine réalisé en laboratoire consiste à suivre la sédimentation du sang. La mesure de cette vitesse (définie comme la distance parcourue en une heure par les agrégats dans le plasma auquel on a ajouté un anticoagulant) est prise en compte dans le diagnostic des anémies et de nombreuses maladies infectieuses ou inflammatoires. Elle est considérée comme pathologique au-delà de 40 millimètres par heure. En cours de grossesse, la vitesse de sédimentation du sang peut atteindre 40 à 50 millimètres par heure, en raison d'une augmentation de la concentration en fibrinogène, qui serait nécessaire pour répondre aux nouvelles conditions d'écoulement dans les territoires très irrigués de la matrice utérine et du placenta.

Une deuxième méthode de mesure consiste à analyser la réflexion de la lumière par une suspension de globules rouges en écoulement. L'agrégation des globules rouges provoque une baisse de la « luminosité » du sang. Les méthodes optiques permettent ainsi de mesurer un seuil de désagrégation ou un temps de réagrégation des globules rouges, données plus fiables et plus précises que la mesure de la vitesse de sédimentation du sang. Dans un



7. UN GROS AGRÉGAT GLOBULAIRE peut se former dans une situation pathologique, tels le diabète ou le tabagisme. Un tel agrégat résiste aux écoulements et risque d'obstruer un vaisseau, entraînant une moindre oxygénation, voire la nécrose de certains tissus.

avenir proche, les techniques ultrasonores permettront sans doute d'établir un diagnostic du degré d'agrégation des globules rouges dans les vaisseaux d'un malade, car les agrégats réfléchissent davantage les ultrasons que les globules dissociés.

Aujourd'hui, personne n'a réussi à observer *in vivo*, les piles d'érythrocytes souvent synonymes de meilleur écoulement dans les artérioles ou dans les veinules. Le globe oculaire est le seul endroit de l'organisme où l'on peut observer le réseau microcirculatoire. Pour visualiser les piles d'érythrocytes, on espère pouvoir approcher un microscope tout près de l'œil, et observer des érythrocytes dans un des petits capillaires affleurant à la surface du globe oculaire. Les microscopes actuels doivent s'approcher trop près de l'œil pour rendre l'observation possible. La mise au point de microscopes à fort grossissement et à longue distance de travail devrait permettre de visualiser les agrégats de globules rouges dans des capillaires humains, rendant ainsi possible une visualisation directe de l'écoulement du sang dans les vaisseaux. Cette méthode deviendra-t-elle un examen de routine pour les patients présentant des risques cardio-vasculaires ?

Jacques DUFAUX et Gérard GUIFFANT sont professeurs à l'Université Paris 7 Denis Diderot, unité mixte de recherche CNRS 7057. Patrick SNABRE est directeur de recherches au CNRS, à l'Institut de science et génie des matériaux et procédés, UMR 8521, à Odeillo.

Patrick SNABRE, Michel BITOL et Pierre MILLS, *Cell disaggregation behavior in shear flow*, in *Biophysical Journal*, vol. 5, pp. 795-807, mai 1987.

L. HAIDER, P. SNABRE, et M. BOYNARD, *Rheo-acoustical study of the shear disruption of reversible aggregates. Ultrasound scattering from concentrated suspensions of red cell aggregates*, in *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 107, n° 3, pp. 1715-1726, mars 2000.

Jacques DUFAUX, P. FLAUD, D. QUEMADA et Gérard GUIFFANT, *Comprendre la rhéologie : de la circulation du sang à la prise du béton*, EDP Science, GFR, 2002.

Marcos INTAGLIETTA, *Vasomotion et modulation du flux dans la microcirculation*, Karger, 1984.

La traque du plasma

YVES SCHUTZ • HUGUES DELAGRANGE

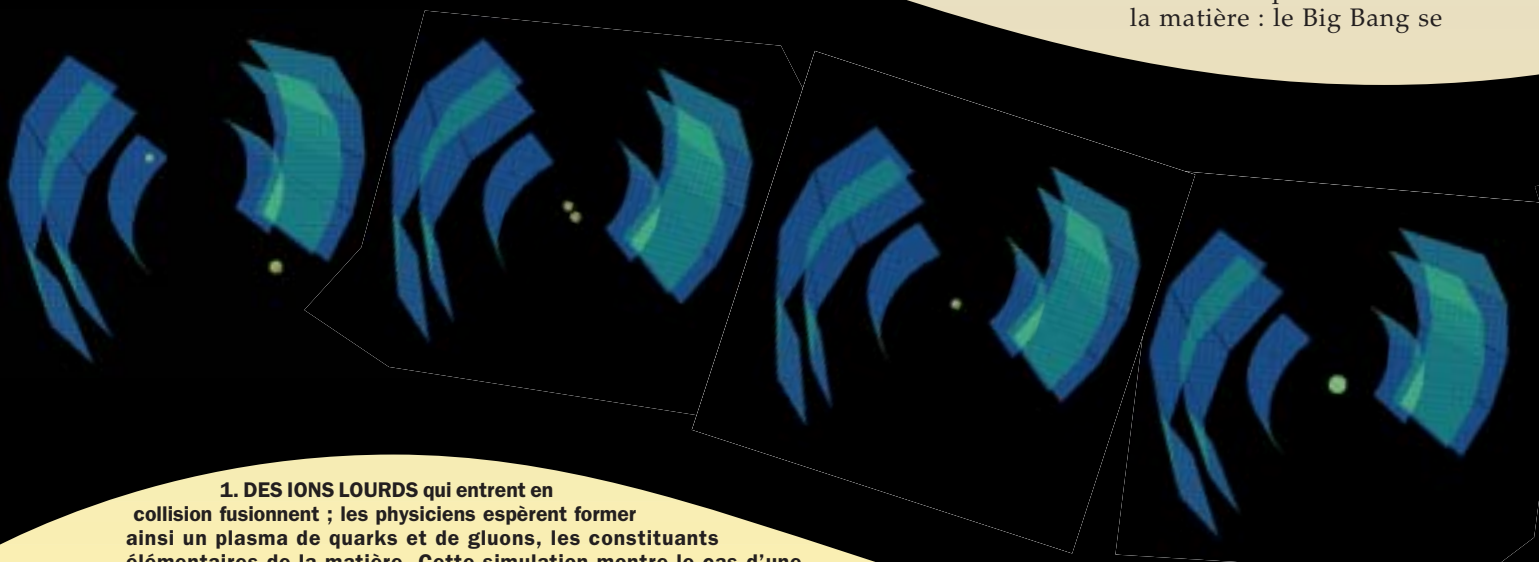
Les constituants des noyaux se désagrègent-ils à très haute température? Après en avoir obtenu des indices à l'accélérateur de Genève, les physiciens ont commencé de nouvelles expériences sur l'accélérateur de particules de Brookhaven pour prouver la réalité de ce phénomène, dit de déconfinement.

Au mois de juillet 1999, la presse annonçait qu'une machine allait reproduire le Big Bang... au risque de détruire la Terre. Les physiciens du Laboratoire de Brookhaven, près de New York, jouaient-ils aux apprentis sorciers? Avec un accélérateur où des noyaux atomiques devaient se heurter avec des énergies considérables, allait-on recréer les conditions infernales qui régnaient à la naissance de l'Univers? Ne risquait-on pas de déclencher une «explosion» aussi gigantesque que celle qui fut à l'origine de l'Univers, il y a 15 milliards d'années? Tout comme Enrico Fermi dut s'employer à démontrer que l'explosion d'une bombe atomique ne risquait pas d'enflammer l'atmosphère, les physiciens réfutèrent les arguments catastrophistes. Ils avancèrent, notamment, que certaines particules cosmiques sont

beaucoup plus énergétiques que celles qui circulent au sein du collisionneur de Brookhaven. Or, elles n'ont jamais déclenché de catastrophes cosmiques. Les premières expériences confirmèrent bientôt que ces collisions de noyaux atomiques se déroulent sans perturber le cours de l'histoire universelle.

Un phénomène violent et éphémère

Les physiciens veulent prouver l'existence du «plasma de quarks et de gluons» ou encore de la «matière de quarks». C'est ainsi qu'ils désignent le plasma qu'ils pensent créer en libérant les quarks et les gluons, les constituants des nucléons (protons et neutrons). Pour ce faire, ils «chauffent» et «compriment» les constituants des noyaux à la faveur de collisions. Ils espèrent ainsi changer l'état de la matière ordinaire, tout comme l'eau se transforme en vapeur quand on la chauffe à 100 °C. Ce nouvel état serait la forme primordiale de la matière : le Big Bang se



1. DES IONS LOURDS qui entrent en collision fusionnent ; les physiciens espèrent former ainsi un plasma de quarks et de gluons, les constituants élémentaires de la matière. Cette simulation montre le cas d'une collision entre deux noyaux d'or dans le détecteur PHENIX.