

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.

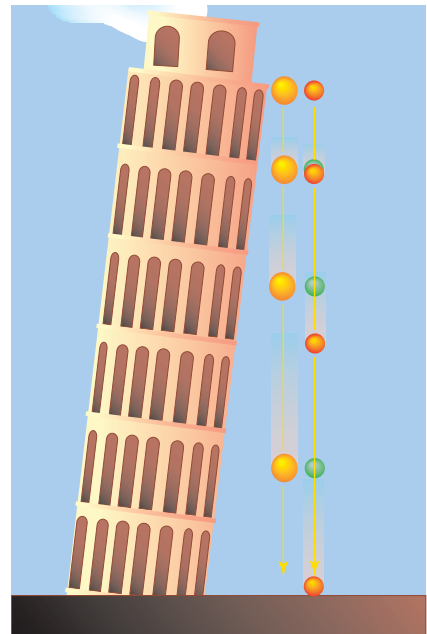
Si l'étude de la fixité des constantes constitue un test du principe d'équivalence, les mesures directes de l'universalité de la chute libre nous renseignent, à l'inverse, sur l'éventuelle variation des dites constantes. Aujourd'hui, on teste

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.

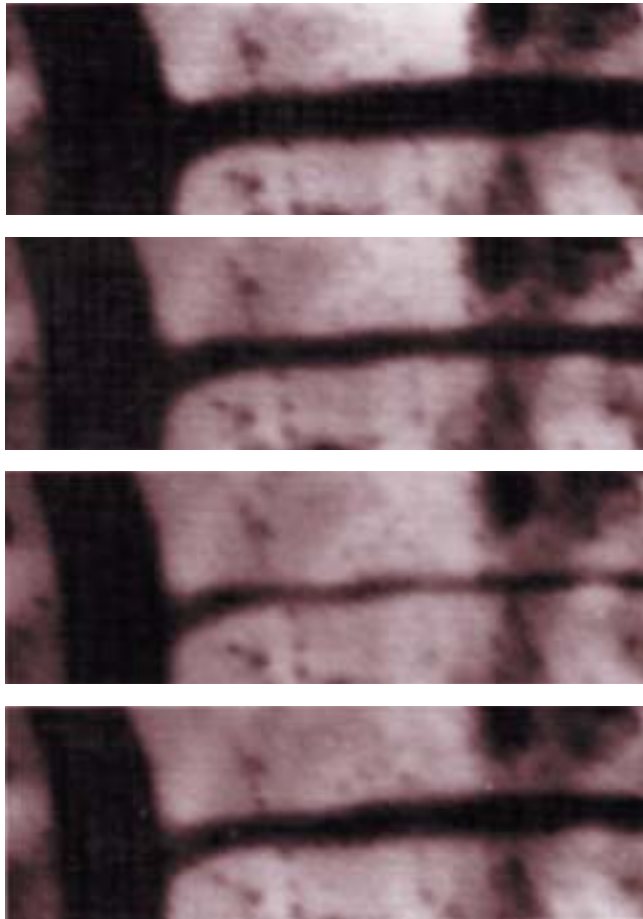
Un réseau extrêmement ramifié

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

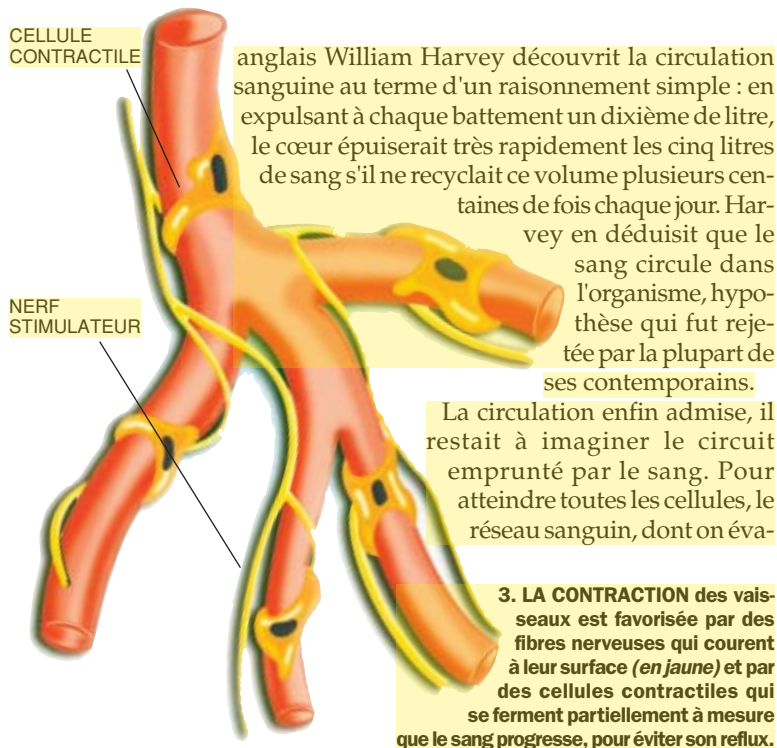
XVII^e siècle, le médecin

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 microparticules 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.

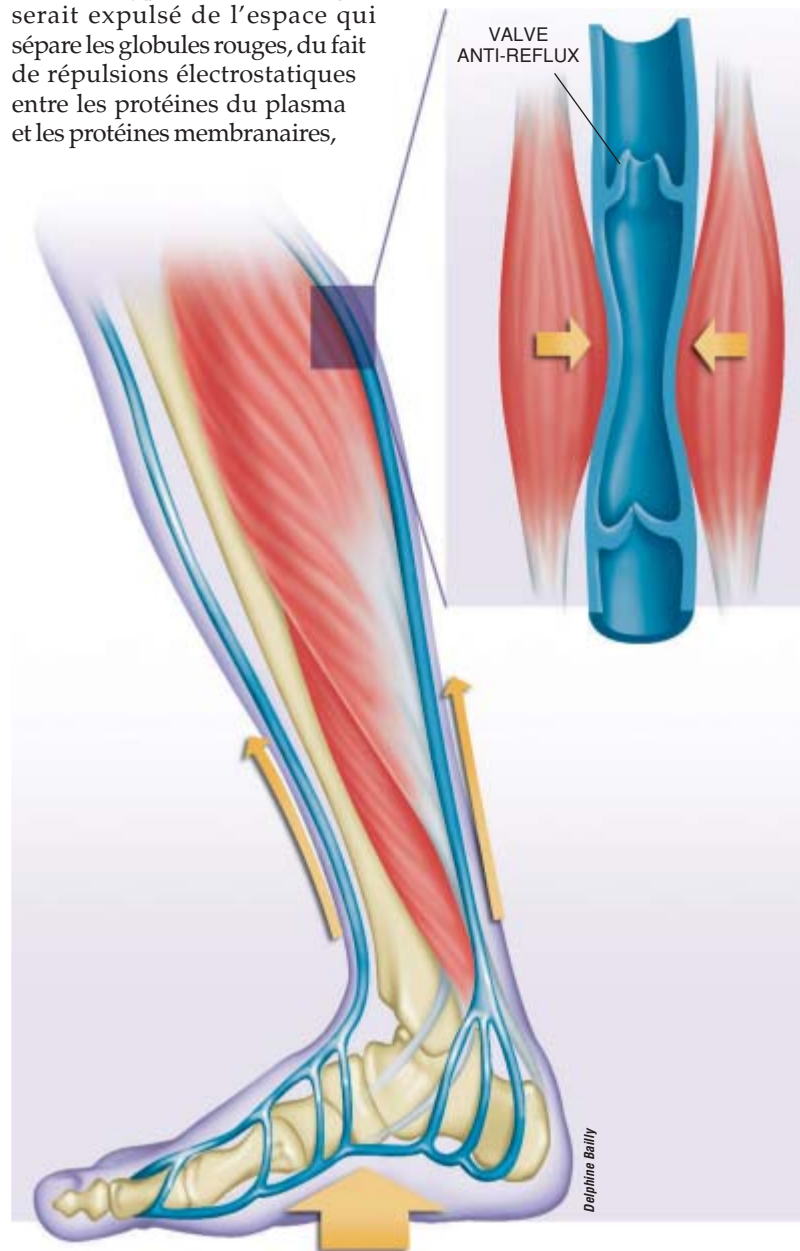
Des piles d'érythrocytes

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 tournoient 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 tournoyer 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.