

TD info - le système ostéo-musculaire

Introduction

Au cours de cette séance, vous travaillerez en *binôme* pour faire une *recherche sur internet* afin de répondre à la question :

"Quelle physique est en jeu dans le fonctionnement du système ostéo-musculaire ?"

Concrètement, cela implique :

- d'identifier le ou les *domaines de la physique* vers lesquels il faut se tourner pour comprendre le fonctionnement de ce système
- d'identifier les *lois physiques impliquées* ainsi que les mécanismes dans lesquels elles interviennent
- de se faire une idée des *problèmes* qui peuvent être abordés avec ces outils : comment *formuler* ces problèmes, comment les résoudre, quelles en sont *les variables physiques*, quels en sont *les ordres de grandeurs*.

En plus des notes de cours, vous avez comme support quatre documents qui peuvent vous donner des mots-clés et des idées. Vous n'êtes bien entendu pas obligé de tous les exploiter !

Déroulement de la séance

1. *Pendant 3/4 d'heure*, vous lisez les documents joints, essayez de trouver des mots clé (à partir de ces documents et du cours) puis vous cherchez librement, en essayant de trouver des pistes, des lois, des principes.
2. *Au bout de 3/4 d'heure, on fait le point* : une discussion où chacun dira ce qu'il trouve et nous verrons ensemble quelles pistes poursuivre, en partageant éventuellement le travail.
3. *Pendant l'heure qui suit*, chaque binôme cherche à *approfondir* la piste qu'il a choisie, en essayant d'être le plus *quantitatif* possible : ce principe physique est-il vraiment pertinent ? si oui, son effet est-il non négligeable ? Peut-on le prouver par le calcul ?
4. *Au bout des deux heures*, vous rendez *par binôme un compte rendu* avec vos conclusions. N'oubliez pas de mettre toutes vos *références* (éventuellement dans une fiche joint : utilisez l'éditeur de texte pour faire des copier-coller de textes, d'images, de lien internet...).

But de l'activité

Vous ne parviendrez sans doute pas à répondre à toutes ces questions ni à toutes les questions possibles liées au système étudié. Vous pourrez néanmoins :

- vous familiariser avec ce type de questions, apprendre à rechercher par vous même comment comprendre les mécanismes sous-jacents à un système biologique donné,
- commencer à étudier les aspects que l'on développera ensuite en cours-TD et en TP,
- identifier d'autres aspects du problème que vous pourrez choisir comme sujet de projet.

L'os est un chef d'œuvre de résistance élastique à la traction

Les os peuvent supporter une pression incroyable. " Ils sont construits exactement de la même manière que le béton armé, affirme l'Institut américain de recherche biomédicale et spatiale. L'acier contenu dans le béton armé le rend résistant à la traction, tandis que le ciment, le sable et les graviers le rendent résistant à la compression. Cependant, la résistance à la compression de l'os est supérieure à celle du béton armé le plus solide qui soit. " " Si seulement nous pouvions la reproduire ! " a déclaré Robert Ritchie, professeur de sciences des matériaux à l'université de Berkeley (Californie).

Marcher comme un athlète

Pour se déplacer sans véhicule, l'homme a deux possibilités : la marche et la course. La première n'est pas forcément plus lente que la seconde.

Pour le néophyte, l'allure des marcheurs de compétition est singulière. Plus étonnante encore est son efficacité. Ainsi, le record de France sur 50 kilomètres, détenu par le champion Yohann Diniz, est de 3 heures 41 minutes et 39 secondes, soit une moyenne de 13,5 kilomètres par heure, alors que nous nous mettons spontanément à courir dès que notre vitesse dépasse les six à huit kilomètres par heure. Les raisons qui nous font passer de la marche à la course nous feront comprendre pourquoi cette discipline sportive est si codifiée et comment de telles performances sont possibles.

Marcher ou courir : les différences

Première différence entre la marche et la course : lorsque nous marchons, nous avons toujours au moins un pied en contact avec le sol ; de plus, entre deux foulées, nos deux pieds touchent terre simultanément. En revanche, la course se caractérise par une phase de suspension en l'air, sans appui. La première règle de la marche athlétique est donc évidente : le marcheur doit constamment avoir un appui au sol.

Une deuxième caractéristique de la marche est que la jambe d'appui est tendue. En gros, cette jambe se comporte comme un pendule inversé, c'est-à-dire comme une

barre rigide dirigée vers le haut effectuant sous l'effet de la gravité une rotation autour de son extrémité en contact avec le sol (voir la figure 1).

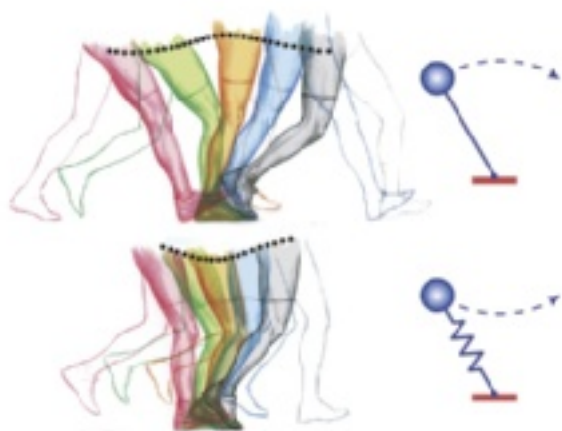
Afin d'amorcer le mouvement, nous nous déséquilibrons vers l'avant. Quand le pied est en appui, la jambe pivote autour de la cheville et, au moment où elle bascule, nous avançons notre seconde jambe, qui prend le relais, et ainsi de suite. Notons que, pendant que la jambe se redresse, la vitesse du déplacement diminue et le centre de gravité du corps s'élève ; ce centre de gravité atteint sa hauteur maximale lorsque la jambe est verticale.

La course, elle, met en jeu une flexion de la jambe d'appui. Cette jambe se comporte comme un ressort qui se comprime lors des phases d'appui : le centre de gravité du corps est donc au plus haut durant la phase de suspension et au plus bas lorsqu'il passe au-dessus du pied, quand la jambe est fléchie au maximum. Un critère précis permet donc de distinguer marche et course : la position du centre de gravité lorsqu'il est à la verticale du point d'appui. S'il est à sa hauteur maximale, c'est de la marche ; dans le cas contraire, il s'agit de course.

On saisit donc la raison d'une deuxième règle de la marche sportive : le marcheur doit bien tendre sa jambe à partir du moment où le talon touche le sol et jusqu'à ce que le centre de gravité passe au-dessus du pied. Avec cette règle, on évite la fameuse « course en marchant » de Groucho Marx (voir la figure 2). En gardant les jambes très fléchies, il est en effet possible de courir, c'est-à-dire de profiter de l'élasticité des jambes, en conservant ses appuis au sol. Cette marche cinématographiquement inoubliable n'a pas cours dans les stades, mais a le mérite de rendre compte du mode de locomotion rapide des éléphants : ils courent, bien qu'ils ne décollent pas du sol !

Pourquoi, passée une certaine vitesse, préférons-nous courir ? De même, pourquoi un quadrupède comme le cheval passe-t-il du pas au trot, puis au galop (voir la figure 3) ? Le premier avantage de la transition est énergétique. En principe, l'énergie nécessaire pour se déplacer sur un sol horizontal est très faible puisqu'il s'agit surtout de vaincre les frottements avec l'air. Les cyclistes qui se mettent en roue libre le savent bien. Mais en pratique, nous n'avons pas de roue et nous avançons en effectuant de subtils transferts entre différentes formes d'énergie.

Pour la marche, lorsque notre centre de gravité passe au-dessus du pied, la vitesse et l'énergie cinétique du corps



1. Lorsqu'on marche (*en haut*), la hauteur du centre de gravité du corps est maximale quand la jambe est verticale ; le mouvement de la jambe ressemble à celui d'un pendule inversé (*en haut à droite*). Au contraire, lorsqu'on court (*en bas*), le centre de gravité est au plus bas quand la jambe est à peu près verticale ; le mouvement ressemble à celui d'un pendule inversé avec une tige élastique (à ressort).



2. Un marcheur sportif doit maintenir sa jambe tendue à partir du moment où son talon touche le sol et jusqu'à ce que le centre de gravité du corps passe au-dessus du pied. Il ne peut profiter de l'élasticité des muscles, comme le faisait au cinéma Groucho Marx en marchant à vive allure les jambes fléchies – une sorte de marche-course qui a son analogue chez les éléphants.

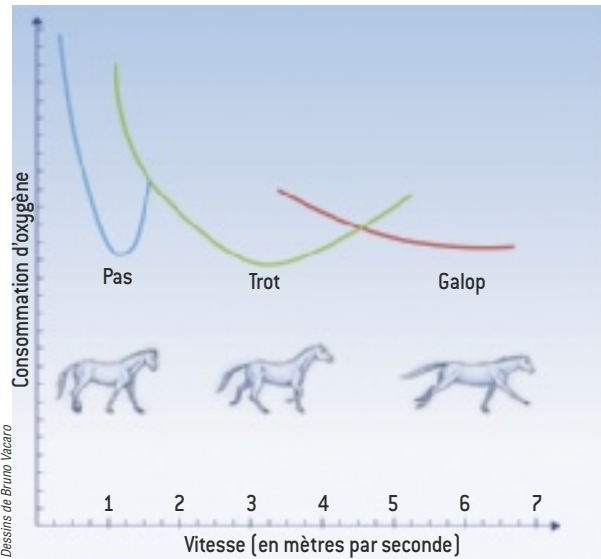
sont minimales et l'énergie est stockée sous forme d'énergie potentielle de gravitation. Pour la course, nous profitons de l'énergie élastique des tendons et des muscles. La restitution et la dépense d'énergie sont cependant loin d'être idéales : outre les aspects physiologiques, la pose du pied au sol freine la jambe et dissipe son énergie cinétique, et il faut à chaque foulée ramener la seconde jambe vers l'avant.

Les mesures montrent que, pour parcourir une distance donnée, la marche est énergétiquement plus économique que la course aux petites vitesses, et que c'est l'inverse aux vitesses supérieures. En outre, pour chacune de ces allures, il existe une vitesse optimale, avec une dépense énergétique minimale. Et plutôt que de se déplacer toujours à la même vitesse, il est préférable d'alterner marches et courses, comme les fantassins du Moyen Âge qui accompagnaient leurs seigneurs à cheval : ils ajustaient leur vitesse moyenne en jouant sur les durées respectives de ces deux allures.

Passer de la marche à la course

Ce résultat permet de comprendre nos choix sur une longue distance, mais, pour élucider la transition marche-course, il faut étudier les forces. Le mouvement de la jambe d'appui en pendule inversé est une rotation, au cours de laquelle notre corps subit une force centrifuge dirigée le long de la jambe. Cette force est d'autant plus grande que la vitesse augmente, et elle s'oppose au poids lorsque la jambe est verticale. Aussi, quand ces deux forces sont égales, il n'y a plus d'appui possible au sol – donc plus de marche.

Le rapport entre la force centrifuge et le poids, nommé nombre de Froude, est égal au carré de la vitesse divisé par le produit de la longueur des jambes et de l'accélération de la pesanteur. L'égalité des forces est obtenue lorsque ce nombre est égal à un. Pour un adulte dont les jambes mesu-



3. À une vitesse de déplacement donnée correspond en général un mode de locomotion optimal du point de vue énergétique, comme le montrent les trois courbes de consommation d'oxygène (par unité de distance parcourue) relatives au pas, au trot et au galop d'un cheval. De même, l'homme a intérêt à marcher aux petites vitesses, mais à courir dès que la vitesse doit dépasser environ six kilomètres par heure.

rent un mètre, cela correspond à une vitesse de l'ordre de trois mètres par seconde, c'est-à-dire dix kilomètres par heure.

En réalité, la transition marche-course a lieu pour des nombres de Froude inférieurs, de l'ordre de 0,5 (environ deux mètres par seconde). Pourquoi ? À mesure que la vitesse croît, la composante verticale de la force d'appui subit des variations de plus en plus importantes, la force centrifuge étant augmentée en milieu de foulée. L'élasticité des muscles et des tendons de la jambe est alors de plus en plus sollicitée. Au-delà d'une certaine contrainte, il devient plus confortable de passer d'un mode rigide à un mode élastique et notre corps passe spontanément de la marche à la course.

La marche athlétique permet pourtant d'atteindre, sur de courtes distances, des vitesses de 17 kilomètres par heure, soit des nombres de Froude bien au-delà de un ! Ici, l'effet de la force centrifuge est diminué grâce au mouvement des bras du marcheur ; on limite ainsi l'amplitude des oscillations du centre de gravité afin de ne pas décoller. Ce sont ensuite les articulations qui sont mises à profit pour amortir les chocs ; une fois le pied posé, la pointe du pied relevée, on déroule la cheville. Enfin, des mouvements de rotation du bassin, caractéristiques, permettent d'allonger la foulée. Toute cette impressionnante technique ne doit cependant pas faire oublier au marcheur la règle d'or : c'est la gravité qui assure la propulsion et sa chute continue qui le fait avancer.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris.

H. GEYER et al., *Compliant leg behaviour explains basic dynamics of walking and running*, in *Proc. R. Soc. B*, vol. 273, pp. 2861-2867, 2006.

A. J. RAYNOR et al., *Are transitions in human gait determined by mechanical, kinetic or energetic factors ?*, in *Human Movement Science*, vol. 21, pp. 785-805, 2002.

Aussi vite, aussi haut, aussi fort

La diversité des records d'athlétisme n'est qu'apparente. Nombre d'entre eux résultent de la puissance bien convertie d'un seul muscle : le quadriceps, ce que confirment les valeurs des records.

Dix secondes aux 100 mètres, six mètres au saut à la perche, neuf mètres au saut en longueur, etc. : les athlètes du sprint et des sauts nous stupéfient. Et les haltérophiles donc qui soulèvent plus de deux fois leur poids ! Pourtant, sous la diversité des chiffres et des disciplines sportives se cache un dénominateur commun : le quadriceps. Ce muscle du dessus de notre cuisse est le plus puissant de notre organisme et détermine nos performances optimales lors des efforts brefs et intenses.

Comment évaluer l'énergie que nos quadriceps sont capables de délivrer ? Pour ce faire, détournons-nous des sports qui sollicitent une grande variété de muscles à la fois et examinons l'haltérophilie. L'un des deux mouvements de cette discipline est l'arraché où l'athlète est initialement accroupi et les bras toujours tendus, se redresse, puis s'abaisse, avant de se relever ensuite.

Dans cet effort, seuls les muscles des cuisses agissent vraiment, le reste du corps ne faisant que suivre. Lors de la première étape, avant de se relever (voir la figure 1), l'haltérophile a contracté ses quadriceps une seule fois. Il a soulevé la barre et ses poids d'une hauteur équivalente au déploiement de la jambe accroupie et lui a donné assez de vitesse pour qu'elle s'élève d'un peu plus d'un mètre. Avec

des haltères de 173 kilogrammes (record du monde dans la catégorie des moins de 77 kilogrammes), il aura fourni une énergie d'environ 1 700 joules, soit 850 joules par quadriceps.

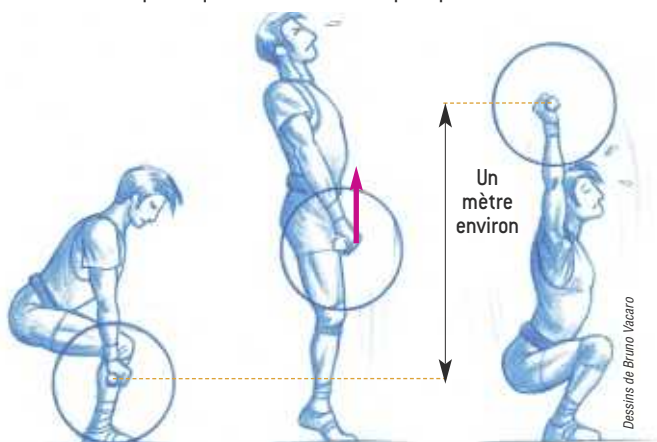
Cette estimation est-elle raisonnable ? Pour le savoir, effectuons une détente verticale, c'est-à-dire un saut vers le haut sans course d'élan. Si toute cette énergie était convertie en énergie potentielle de gravité, un homme de 80 kilogrammes sauterait à une hauteur de près de deux mètres. Cela paraît beaucoup. Pourtant, en sautant pieds joints, sans course d'élan, un basketteur entraîné s'élève de plus de 80 centimètres. Si l'on tient compte d'une flexion d'appel de 40 centimètres, le centre de gravité de l'athlète se sera élevé de près de 1,2 mètre, soit une énergie de 960 joules, ou 480 joules par quadriceps, le muscle opérant.

La différence par rapport aux 850 joules évoqués plus haut s'explique par la nature différente de l'effort du muscle, bref pour le saut, plus long lors du soulèvement d'un poids : comme il n'y a pas de charge, le sauteur n'exerce pas une force maximale tout au long de son mouvement. Aussi, dans la suite, nous adopterons la valeur de 500 joules par quadriceps pour estimer les performances des sprinteurs et des sauteurs, et nous considérerons que les athlètes dépensent cette énergie à chaque foulée d'un sprint ou d'une course d'élan.

Environ 500 joules par foulée...

On objectera que notre estimation de 500 joules correspond à un effort unique. Un sportif peut-il délivrer une telle énergie à chaque impulsion ? La réponse est positive dans le cas d'efforts brefs. L'énergie de la contraction des fibres musculaires est fournie par la transformation des molécules d'ATP (adénosine triphosphate) en ADP (adénosine diphosphate). Nos muscles brûlent les réserves initiales d'ATP en une à deux secondes, courte durée qu'étend à environ dix secondes la régénérescence d'ADP en ATP grâce à la phosphocréatine. Ce fonctionnement du muscle, dit anaérobie (sans besoin d'oxygène) et alactique (sans production d'acide lactique), est capable de fournir 20 à 50 kilojoules, de quoi assurer plusieurs dizaines de foulées.

Le mécanisme anaérobie alactique intervient pour les soulèvements, les sprints et les sauts, car il permet de développer instantanément une puissance maximale. Ensuite, pour des efforts plus longs, d'autres mécanismes énergé-



1. En haltérophilie, dans l'arraché, les muscles des cuisses font presque « tout le travail » : l'athlète soulève le poids en se redressant d'un coup et lui communique ce faisant assez de vitesse (flèche rouge) pour que le poids s'élève encore pendant qu'il s'abaisse et se place en dessous de la barre.

tiques prennent le relais, car l'athlète doit puiser dans les réserves en sucre de l'organisme et utiliser l'oxygène de l'air.

Lors d'une course brève, les 500 joules par foulée sont convertis en énergie cinétique. Comme chacun

l'a constaté, l'énergie accumulée et la vitesse atteinte ont des limites. Pourquoi ?

Les frottements de l'air sont hors de cause car, à une vitesse de dix mètres par seconde, la puissance dissipée par frottement est cinq à six fois inférieure à la puissance musculaire disponible.

La véritable limite provient du mécanisme même de la course : les jambes de l'athlète n'ont pas une vitesse constante, puisque chaque pied passe alternativement de l'immobilité (lorsqu'il est à terre) à une vitesse double de celle du coureur.

... pour atteindre une dizaine de mètres par seconde...

Le coureur renouvelle à chaque foulée l'énergie cinétique de sa jambe. Par rapport au tronc du coureur, le mouvement de la jambe, à peu près rigide, est assimilable à un mouvement de rotation autour des hanches. Lorsqu'elle passe à la verticale du bassin, chaque jambe a alors une énergie cinétique égale au sixième du produit de sa masse par le carré de la vitesse du coureur (un sixième et non la moitié, car la vitesse d'un point de la jambe décroît en remontant du pied au haut de la cuisse).

Estimons le maximum de la vitesse du coureur. La masse totale d'une jambe (avec le pied) représente environ 20 pour cent de la masse corporelle. Pour un coureur de 80 kilogrammes, cela fait 16 kilogrammes. Une énergie cinétique de 500 joules, acquise toujours grâce au quadriceps, correspond alors à une vitesse du pied d'environ 13,5 mètres par seconde. Cette valeur est très proche des quelque 12 mètres par seconde atteints par les meilleurs sprinteurs. Adoptons la valeur de dix mètres par seconde, plus réaliste lorsqu'il s'agit d'autres athlètes.

Après le sprint, sautons en longueur. L'énergie cinétique acquise lors de la course, 4 000 joules pour une vitesse de dix mètres par seconde, est destinée à propulser l'athlète le plus loin possible selon l'horizontale. Un résultat de la balistique est que l'optimum s'obtient avec un angle de saut à 45 degrés. La distance franchie est alors égale au carré de la vitesse divisé par l'accélération de la pesanteur, soit, dans notre cas, dix mètres. Le record du monde – 8,95 mètres – n'est pas très différent !

En fait, les sauteurs bénéficient de l'abaissement de leur centre de gravité entre l'appel et la réception, ce qui leur fait



2. Chez un coureur, la jambe qui le propulse lors d'une foulée est celle qui touche le sol. Par rapport au corps de l'athlète, le mouvement de cette jambe correspond à peu près à celui d'une tige rigide qui pivote (*flèche bleue*) autour de la hanche. La vitesse du pied (*flèche rouge*) est maximale au moment où la jambe passe à la verticale du bassin.

gagner de la longueur. La difficulté, de nature morphologique, est de transformer une vitesse initiale horizontale en une vitesse inclinée par rapport au sol. Cela se traduit par une grosse perte d'énergie dans les articulations et les muscles.

Preuve en est dans le saut en hauteur, où une vitesse de dix mètres par seconde devrait permettre au sauteur de s'élever de cinq mètres, soit quelque six mètres en tenant compte de l'élévation de son centre de gravité. Le record actuel n'est que de 2,45 mètres.

... et pour s'élever de six mètres

En revanche, il est de 6,14 mètres à la perche. Est-ce un hasard ? Non. La perche permet au sauteur d'utiliser efficacement son énergie cinétique initiale. Au moment où le sauteur bloque sa perche, son impulsion est dirigée presque toute vers l'avant.

La perche se tord et stocke temporairement l'énergie fournie par l'athlète sous forme d'énergie élastique de flexion ; cette énergie est progressivement restituée quand la perche se détend jusqu'à la verticale, ce qui permet au sauteur de s'élever. Dans ce cas, l'optimum est presque atteint. Ainsi, malgré leurs différences morphologiques, les recordmen du monde, Asafa Powell (100 mètres), Javier Sotomayor (hauteur), Mike Powell (longueur), Sergeï Bubka (perche), Rezazadeh Hossein ont des performances équivalentes : le quadriceps vous dis-je !

3. La perche permet au sauteur de transformer son énergie cinétique, acquise par une course d'élan, en énergie élastique. En se redressant, la perche restitue cette énergie cinétique, qui est utilisée par l'athlète pour gagner de la hauteur et franchir la barre. C'est un outil très efficace pour transformer une vitesse de direction horizontale en une vitesse verticale. Le record de hauteur ainsi atteint est proche de la valeur théorique calculée sur la base d'une vitesse horizontale de dix mètres par seconde.



A. ARMENTI (sous la direction de), *The physics of sports*, American Institute of Physics, 1992.

Blog des auteurs : <http://fausstroll.free.fr/blog/>

Craquements de doigts

Pourquoi entend-on un « crac ! » lorsqu'on tire sur une articulation ?

À peu près pour la même raison que l'ouverture d'une canette de soda s'accompagne d'un « pschitt ».

Vous l'avez tous fait un jour : tirez sur les doigts, et vous entendez des craquements. Quelle est la cause de ces bruits intrigants ? Des études récentes, appuyées par des radiographies, ont confirmé ce que certains ont avancé dès les années 1970 : les craquements sonores sont dus à la formation de bulles au niveau des articulations. Des bulles ? Quelles bulles ? Et pourquoi des bulles se forment-elles donc ?

Des bulles dans l'articulation...

Revenons tout d'abord sur la morphologie de nos articulations. Afin de faciliter le mouvement entre les os, leur contact est assuré par plusieurs intermédiaires. L'extrémité des os est protégée par du cartilage, matériau solide et élastique qui résiste aussi bien à la compression qu'à la traction. La lubrification est assurée par une mince couche d'un liquide physiologique, la synovie, que la poche synoviale maintient en place entre les cartilages.

Si l'on force l'articulation à se distendre en tirant sur les os, la pression chute considérablement dans la synovie et

atteint même des valeurs négatives de -2 atmosphères ! Il se produit alors de la cavitation, c'est-à-dire l'apparition de bulles de gaz. C'est l'expansion rapide de ces bulles – dont le diamètre peut atteindre $0,5$ millimètre – qui est responsable du bruit entendu.

D'où proviennent ces bulles ? Pour le comprendre, observons ce qui se passe lorsqu'on ouvre une bouteille de boisson gazeuse. On entend un « pschitt », signe que de l'air s'échappe. À l'intérieur de la bouteille, la pression chute pour revenir à la pression atmosphérique. Simultanément, des bulles apparaissent dans la boisson. La nature de ces bulles est bien connue : il s'agit de dioxyde de carbone (gaz carbonique), auparavant dissous. Comme l'a découvert le physicien britannique Williams Henry en 1803, la quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression exercée par ce gaz sur le liquide.

On comprend facilement cette loi en termes microscopiques. La pression qu'exerce un gaz sur une surface est la traduction des innombrables collisions des molécules du gaz avec cette dernière. Lorsqu'il s'agit de la surface d'un liquide, la plupart des molécules rebondissent, mais une fraction d'entre elles se lie à l'interface et passent éventuellement en solution. Réciproquement, parmi les molécules de gaz dissous qui



Dessins de Bruno Vacaro

1. À l'ouverture d'une bouteille de soda, la pression sur le liquide diminue et de nombreuses bulles de dioxyde de carbone naissent, d'où le « pschitt ». Si l'on rebouche ensuite le récipient en y augmentant la pression avec une pompe, on empêche les bulles de se former. Mais la pression partielle de dioxyde de carbone dans l'air au-dessus du liquide étant bien plus faible qu'avant l'ouverture, le gaz continue à s'échapper du liquide par diffusion. Le procédé ne fait que ralentir le dégazage.



2. Lorsqu'on tire sur un doigt, le volume de l'articulation augmente de quelque 20 pour cent. En conséquence, la pression au sein de la synovie, contenue dans la poche synoviale, diminue beaucoup ; elle atteint même des valeurs négatives. Les gaz dissous dans ce liquide lubrificateur forment alors des bulles dont le diamètre peut atteindre $0,5$ millimètre de diamètre. Le craquement que l'on entend est dû à l'expansion rapide de ces bulles et aux vibrations que cela provoque.

s'approchent de l'interface, certaines, au hasard de collisions favorables, acquièrent assez d'énergie pour s'échapper et retrouver l'état gazeux. Le taux d'échappement est proportionnel à la concentration du gaz dissous, tandis que le passage en solution est proportionnel à la densité de molécules dans la phase gazeuse, donc à la pression du gaz. Il s'ensuit qu'à l'équilibre, la concentration du gaz en solution est proportionnelle à la pression partielle du gaz (la part de pression due au seul gaz considéré, puisque l'air est un mélange de gaz).

...et dans la bouteille

Nous faisons l'expérience quotidienne de cette loi grâce aux bouteilles d'eaux minérales et de soda, et plus rarement (hélas!) de champagne. La pression du dioxyde de carbone dans l'atmosphère est d'environ 360 microatmosphères. Ce gaz soluble se retrouve dans toutes les eaux en contact avec l'atmosphère à raison de 0,5 milligramme par litre, à 20 °C. Si sa concentration atteint cinq à huit grammes par litre dans la plupart des sodas, c'est que ces boissons sont préparées sous une pression équivalente à quatre atmosphères de dioxyde de carbone pur. Aussi, lorsqu'on ouvre une bouteille de soda, elle perd peu à peu tout son gaz ; une boisson de 33 centilitres libère ainsi environ un litre de dioxyde de carbone.

Comment éviter que la boisson ne perde sa pétillance ? Une seule solution : reboucher hermétiquement la bouteille afin que la pression du dioxyde de carbone situé au-dessus du fluide augmente. Des inventeurs ont même cru trouver mieux : un bouchon hermétique muni d'une petite pompe, qui permet de mettre rapidement sous pression le contenu de la bouteille. Malheureusement, ce qui compte n'est pas la pression totale dans le récipient, mais seulement la pression due au dioxyde de carbone. L'apport du dioxyde de carbone atmosphérique étant très faible, cela ne change pas la quantité de dioxyde de carbone qui quittera la boisson. Le seul effet probant est de ralentir la formation des bulles, et le résultat final est le même qu'avec un simple bouchon hermétique.

Nous pouvons maintenant comprendre ce qui se passe dans nos articulations. La synovie contient une part importante de gaz dissous, les quatre cinquièmes étant du dioxyde de carbone. Lorsqu'on réduit la pression, ce gaz ne peut rester en solution et revient à l'état gazeux. Pour créer des bulles au sein du fluide, il faut que la pression soit très faible. Toutefois, une fois que quelques bulles sont créées, elles grossissent très rapidement. Cela produit dans le fluide des vibrations, responsables du craquement que nous entendons.

Le gaz libéré accroît le volume de l'articulation de près de 20 pour cent, ce qui diminue les contraintes mécaniques exercées. Une fois les bulles formées et le doigt relâché, il n'est pas possible de refaire craquer l'articulation immédiatement : il faut attendre que le gaz se dissolve de nouveau.



3. L'extraction des gaz dissous dans l'eau à l'aide d'un cylindre où l'eau est en rotation rapide permettrait-elle aux plongeurs de respirer ? Le long de l'axe du cylindre, où la vitesse de rotation est nulle, la pression de l'eau est abaissée, ce qui permet aux gaz dissous de former des bulles. Un plongeur qui récupérerait ce gaz pourrait respirer – à condition de traiter environ 300 litres d'eau de mer par minute, ce qui est considérable.

Est-il déconseillé de faire craquer les doigts ? L'énergie libérée à chaque craquement est de l'ordre de 0,1 millijoule par millimètre cube, soit dix fois moins que les valeurs susceptibles d'endommager le cartilage. Il semble donc que faire craquer les doigts n'ait pas de conséquences à terme sur les articulations. Le consensus n'est pas complet, mais, d'après des études médicales portant sur un grand nombre de personnes, il n'y aurait pas de lien entre craquement des doigts et apparition de rhumatismes.

Le moyen de respirer dans l'eau ?

Créer des bulles en réduisant la pression pourrait avoir d'intéressantes applications. Alon Bodner, un inventeur israélien, a récemment conçu un procédé pour respirer sous l'eau en utilisant l'oxygène dissous dans l'eau de mer. À la pression atmosphérique, un litre d'eau de mer contient huit milligrammes d'oxygène. Sachant qu'un nageur a besoin de l'ordre de deux litres d'oxygène par minute, soit 2,6 grammes, il faut traiter environ 300 litres d'eau de mer par minute. L'idée d'A. Bodner est de simplement centrifuger l'eau dans un cylindre. Il apparaît alors des basses pressions au niveau de l'axe : les gaz dissous y sont libérés puis récupérés. Avec un cylindre de dix centimètres de rayon, des vitesses de rotation de 1 500 tours par minute suffisent pour abaisser la pression de une atmosphère. Cette technique semble insuffisante pour approvisionner des plongeurs individuels. Mais elle pourrait convenir à des installations sous-marines.

D. R. KIMBROUGH, *Henry's law and noisy knuckles*, in *Journal of Chemical Education*, vol. 76, n° 11, p. 1509, 1999.

R. BRODEUR, *The audible release associated with joint manipulation*, in *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, vol. 18(3), pp. 155-164, 1995.

Site Web d'Alon Bodner : www.likeafish.biz