Effort et cœur

Frédéric Élie

27/9/2003

Copyright France.com

La reproduction des articles, images ou graphiques de ce site, pour usage collectif, y compris dans le cadre des études scolaires et supérieures, est INTERDITE. Seuls sont autorisés les extraits, pour exemple ou illustration, à la seule condition de mentionner clairement l'auteur et la référence de l'article.

« Si vous de dites rien à votre brouillon, votre brouillon ne vous dira rien ! »
Jacques Breuneval, mathématicien, professeur à l'université Aix-Marseille I, 1980

Abstract : Pour tester la résistance du cœur à l'effort on peut procéder au test de Ruffier. Après l'avoir proposé sous forme d'une petite expérience simple, je ferai remarquer que l'indice obtenu porte sur la puissance du coeur. Pourtant, la recherche d'une pression optimale (la tension artérielle) fait partie des investigations sur l'aptitude du cœur. Qu'en est-il, alors? L'organisme doit-il réguler la pression ou bien la puissance de la "pompe" qu'est le cœur? Sans trancher cette question difficile, on va voir par la suite une possibilité qui a été explorée et qui repose sur une modélisation mathématique de la question...

SOMMAIRE

1 - Deux mots sur la circulation sanguine
2 - Expérience: évaluez votre indice de résistance de Ruffier
3 - Un modèle sur ce qui doit être contrôlé dans la circulation sanguine
Bibliographie

1 - Deux mots sur la circulation sanguine

Je ne vais pas faire de cours sur la circulation sanguine, j'en serais fort incapable et ce serait contraire à l'esprit du site. Pour introduire la suite, contentons-nous de quelques petits rappels fondamentaux sur la réponse du cœur à l'effort.

Il a fallu attendre André Vésale (1514 - 1564) puis William Harvey (1578 - 1657) pour comprendre expérimentalement que le sang n'était pas le produit d'une sécrétion continue siégeant dans le foie puis relayée par le cœur ("théorie" de Galien), mais que la circulation du sang s'effectue en circuit fermé sous l'impulsion du cœur qui agit comme une pompe aspirante-foulante. Harvey démontra même que le volume de sang entraîné à travers le cœur à chaque battement (ou volume systolique) représentait au bout d'une heure une masse égale à 3 fois celle de l'individu (ou débit massique horaire) ! résultat toujours avéré aujourd'hui.

Comme l'a montré Walter Cannon (1871 - 1945), lorsque l'organisme doit se préparer à l'effort,

le système endocrinien (notamment via l'adrénaline) modifie les paramètres physiologiques (débit sanguin, débit respiratoire, etc.) afin de préserver la constance de l'équilibre biochimique de l'organisme (homéostasie) et ceci, bien sûr, dans les limites compatibles avec les seuils tolérés par l'organisme. Comme le rôle principal du sang est de véhiculer non seulement l'oxygène mais aussi les substances nutritives et énergétiques (sucres, etc.), les substances informatives (hormones), défensives (anticorps), les déchets, etc., on comprend immédiatement que l'équilibre du milieu biologique intérieur dépend de la vitesse de ce transfert. A la limite, le "stress" (Hans Selye) est la faculté qu'a l'organisme à apporter une réponse adaptée à toute sollicitation qui menace cet équilibre: outil de survie (fuite, anticipation, contre-attaque...), il est donc nécessaire dans ce rôle primordial; toutefois, trop répété, il contribue à placer l'organisme dans un niveau énergétique surdimensionné par rapport à ses réels besoins, provoquant à terme son usure prématurée, avec en outre l'habitude prise par l'organisme de répondre de manière inappropriée à des sollicitations de moindre importance.

Pour assurer le transfert de la juste quantité des nutriments et des déchets, au juste moment et au juste endroit, la circulation du sang est régulée via la réponse du cœur (sous l'action des hormones et du système nerveux). Mais qu'est-ce qui est régulé exactement: la pression du sang dans les artères, les veines et les capillaires, ou bien la puissance ou le débit? De manière quantitative, la question est: quelle est la relation entre l'énergie consommée aux divers étages du métabolisme et les valeurs de la pression et/ou du débit ? Il existe bien sûr un lien étroit entre la puissance, le débit et la pression, comme on le sait en mécanique des fluides. Mais lequel de ces trois paramètres fait l'objet d'un contrôle primordial, qui aboutit ensuite à celui des deux autres ?

Avant d'entrer dans les détails techniques d'une modélisation de la circulation du sang, voyons déjà de manière qualitative ce qui pourrait être contrôlé en premier. En admettant comme un principe de la nature que la stabilité des systèmes est favorisée lorsque leur énergie est rendue minimale (changer d'état en dépensant le moins possible), on peut espérer que l'énergie, ou mieux, la puissance de la circulation du sang cherche à être toujours un minimum local dans sa réponse à un stimulus extérieur. Le principe énoncé, dont la discussion détaillée doit tenir compte de la complexité du système et de ses interactions avec son environnement (considérations qui nous mèneraient trop loin ici) marche assez bien en sciences physiques, pourquoi pas en médecine? Si, de plus, on admet que la stabilité se traduit par la faculté qu'a l'organisme de retrouver rapidement un régime normal de circulation sanguine ("normal" signifie ici "une fois retourné à l'état de repos"), alors, conjointement au principe précédent, on peut imaginer que le test d'adaptation à l'effort basé sur l'évaluation de la puissance résiduelle de la circulation sanguine est significatif. Un test de cette nature est celui de ***l'indice de résistance de Ruffier***, présenté ci-après.

2 - Expérience: évaluez votre indice de résistance de Ruffier

Cet indice permet d'évaluer la faculté du cœur à revenir au repos après un effort significatif, en prenant le pouls avant, juste après, et après l'effort, le pouls étant un bon indicateur de la puissance du cœur. Voici comment procéder:

- s'asseoir, attendre quelques minutes ainsi au repos, prendre son pouls: sa valeur est n pulsations par minute (pour prendre correctement le pouls, tendre la main au-dessus de sa tête et palper la gouttière radiale avec l'index et le majeur de l'autre main: compter le nombre de pulsations pendant 15 s et les multiplier par 4 pour avoir la valeur par minute);

- puis se dresser et effectuer 30 flexions sur ses jambes, tête droite, le plus rapidement possible (moins d'une minute);

- prendre immédiatement après le pouls: n' pulsations par minute, puis s'asseoir;
- attendre 1 mn en position assise et reprendre le pouls: n" pulsations par minute;
- calculer l'indice de résistance de Ruffier par la formule:

$$IR = (n + n' + n")/10 - 20$$

interpréter à l'aide du tableau suivant:

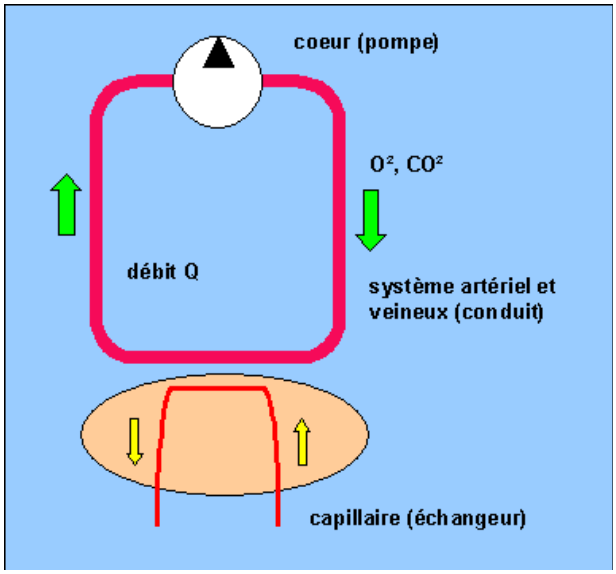
IR	forme	commentaires
0	excellente	n' a peu augmenté après l'effort, ou n" a diminué rapidement (récupération rapide): l'organisme peut fournir des efforts importants à l'aide d'une puissance minimale, il s'économise tout en étant résistant
0 < IR < 5	très bonne	idem, dans une moindre mesure
5 < IR < 10	bonne	idem, dans une moindre mesure
10 < IR < 15	moyenne	soit n est déjà initialement élevé, soit n' monte facilement à l'effort, soit n" tarde à retrouver le repos: l'organisme offre une moindre résistance
15 < IR < 20	médiocre	même au repos le coeur débite trop "pour rien", l'effort nécessite une puissance surdimensionnée, le coeur récupère très mal: danger, il y a risque d'épuisement prématuré

Non seulement il faut savoir doser ses efforts pour obtenir un résultat efficace, mais encore, pour que l'organisme puisse l'apprendre à le faire à notre insu, il faut l'habituer à faire des efforts *raisonnables* afin qu'il trouve par lui-même la juste énergie pour le juste geste: c'est l'un des buts de l'activité physique, bien régulée par une *respiration adaptée*. Car notre organisme peut plus que ce que nous en savons consciemment, pourvu que nous lui redonnions les moyens de s'entraîner à retrouver sa juste voie...

3 - Un modèle sur ce qui doit être contrôlé dans la circulation sanguine

Essayons de comprendre, par un modèle simplifié des phénomènes de transport physique et chimique de la circulation sanguine, ce qui pourrait faire l'objet d'un contrôle visant à optimiser l'énergie cardiaque: débit, pression ou puissance? (voir références)

Le modèle proposé est évidemment extrêmement éloigné de la complexité physiologique du système circulatoire: toutes choses égales ou négligées par ailleurs, il consiste à assimiler le système à une pompe (le cœur) aspirant et refoulant dans le même circuit fermé supposé constitué d'une boucle principale (circuit artériel et veineux) capable d'échanger avec les tissus des substances chimiques au moyen du circuit capillaire (voir figure).



On suppose (pour simplifier) que le sang transporte et échange avec les tissus, au niveau des capillaires, uniquement l'oxygène O_2 et le dioxyde de carbone CO_2, lequel doit être éliminé: la grandeur pertinente dans le transfert réalisé par la circulation sanguine est donc la quantité d'oxygène présente dans les tissus, le cœur devant assurer sa délivrance de manière adaptée, et ceci grâce au contrôle destiné à minimiser la puissance cardiaque. On doit donc considérer les bilans résultants des échanges de ces deux espèces chimiques, O_2 et CO_2, au niveau des capillaires et les relier aux paramètres hydrodynamiques de la circulation: pression, débit, puissance.

Les échanges se font sous forme gazeuse et suivent la ***loi de Fick***: le volume élémentaire de l'espèce échangée est proportionnel à la surface élémentaire d'échange (celle du tube capillaire) et au gradient des pressions partielles de cette substance de part et d'autre de la surface d'échange. Désignant par p la pression partielle de O_2 dans le capillaire et par P celle dans les tissus, par r le rayon du capillaire (supposé cylindrique), dx sa longueur élémentaire, e l'épaisseur de la surface d'échange, on a pour le volume de O_2 échangé par unité de temps:

$$dV = -2\pi\, r dx\, D\, (p - P)/e \qquad (1)$$

où D est la diffusivité de l'oxygène. On a de la même manière pour le volume de CO_2 échangé:

$$dV' = -2\pi\, r dx\, D'\, (p' - P')/e \qquad (2)$$

où D', p' et P' sont respectivement la diffusivité, la pression partielle dans le capillaire et la pression partielle dans les tissus du CO_2.

D'autre part, dans le sang circulant dans le circuit principal avec un débit Q, ces mêmes volumes élémentaires par unité de temps correspondent à une variation de la concentration dc et dc' de O_2 et CO_2 :

$$dV = Qdc \text{ et } dV' = Qdc' \qquad (3)$$

ce qui, avec (1) et (2), permet de relier les concentrations aux pressions au niveau de l'échangeur:

$$Qdc = -2\pi\, r dx\, D\, (p - P)/e \qquad (4)$$

$$Qdc' = -2\pi\, rdx\, D'\,(p' - P')/e \qquad (5)$$

Remarque : quotient respiratoire - des relations (3) on tire: $dV' = (dc'/dc)\,dV$ dont l'intégration et la mesure expérimentale conduisent à une relation de proportionnalité moyenne entre le volume de CO_2 libéré et de O_2 échangé:

$$V' = Q_R\, V \qquad (6)$$

ce qui signifie: en régime permanent et laminaire du sang, le volume de gaz carbonique libéré est directement proportionnel à celui de l'oxygène apporté, le coefficient Q_R étant le quotient respiratoire: on a normalement $0,7 < Q_R < 1$.

Pour déterminer les pressions dans les relations (4) et (5), on a besoin de connaître une relation supplémentaire entre les concentrations et elles, autrement dit comment se dissolvent dans le sang l'oxygène et le gaz carbonique en fonction de leurs pressions partielles. Or on sait que l'oxygène se dissout dans le sang sous forme d'hémoglobine et que la dissolution de O_2 et CO_2 obéit aux ***lois de Hill***:

$$c = 0,2/(1 + 7400\, p^{-2,72}) + a - 5p \qquad (7)$$

$$c' = a'p' + 0,15 \qquad (8)$$

où $a = 3.10^{-5}$ cm^3/cm^3 et $a' = 0,0083$ $cm^3/cm^3/torr$, les concentrations étant en cm^3/cm^3, les pressions en torr. L'intégration de (8) compte tenu de (5) sur la longueur totale L du capillaire fournit la relation entre la pression partielle à l'entrée p'_E et à la sortie p'_S du capillaire pour le CO_2 :

$$p'_S = p'_E \exp(-2\pi\, rD''/eQ)L + P'(1 - \exp(-2\pi\, rD''/eQ)L) \qquad (9)$$

avec $D'' = D'/a'$. Remarquons qu'en l'absence de capillaire ($L = 0$) on a $p'_S = p'_E$ comme il se doit, et que pour un tube infini ($L>>1$) $p'_S = P'$ (la pression de sortie est la pression de CO_2 dissout dans les tissus). Dans (9), la pression partielle de CO_2 dans les tissus peut être connue par les relations suivantes:

- (8) s'applique encore pour la concentration C' de CO_2 dans les tissus:

$$C' = a'P' + 0,15 \qquad (10)$$

- or dans les tissus C' et la concentration C de O^2 sont reliées par:

$$C + C' = m = \text{constante} \qquad (11)$$

- et dans les tissus l'oxygène dissout ne suit plus la loi de Hill mais ***la loi de Henry***:

$$C = AP \text{ (A constante)} \qquad (12)$$

- on a donc C, C' et P' si on connaît P, pression partielle de l'oxygène dans les tissus. Or les grandeurs mesurables sont Q, P_E la pression totale à l'entrée du capillaire donc en amont dans le circuit principal (c'est elle que l'on mesure quand on "prend la tension"), les concentrations de sortie de O_2 et CO_2 du capillaire c_S et c'_S. Par les relations (10), (11) et (12) P' peut s'exprimer

en fonction de P, et comme $P_E = P + P'$, on obtient une relation entre P et P_E:

$$P_E = P(1 - A/a) + (m - 0{,}15)/a \qquad (13)$$

Par ailleurs les concentrations c_S et c'_S interviennent dans la relation entre les volumes d'oxygène, de gaz carbonique et le débit. En effet, à débit constant (régime stationnaire) (3) donne les volumes échangés entre l'entrée et la sortie du capillaire:

$$V = (c_E - c_S)\, Q \qquad (14)$$

$$V' = (c'_E - c'_S)\, Q = Q_R\, V \qquad (15)$$

ce qui, avec (7) et (8) conduit à relier les pressions partielles d'entrée et de sortie du capillaire p'_S , p'_E , p_S , p_E à Q et V. L'écoulement dans le capillaire étant supposé laminaire (***écoulement de Poiseuille***) on a aussi une relation supplémentaire entre p_S , p_E et Q:

$$p_E - p_S = QR \text{ avec } R = 8\mu L/\pi r^4 \ (\mu : \text{viscosité dynamique du sang}) \qquad (16)$$

Remarquons que, en réalité, le sang n'est pas un fluide newtonien et que, par conséquent, il ne suit pas en seconde approximation la loi d'écoulement de Poiseuille dans les capillaires. Mais ça ne change rien au raisonnement car cela revient à dire que la loi d'écoulement, en général, est supposée connue, le modèle de Poiseuille servant d'exemple. Donc p_S , p_E sont déterminées si on connaît p'_S , p'_E , lesquelles sont reliées entre elles par (9) de manière paramétrée par Q. L'une de ces pressions partielles de dioxyde de carbone à la sortie et à l'entrée du capillaire p'_S , p'_E nécessite alors une relation supplémentaire avec l'une des grandeurs déterminées précédemment pour que toutes les variables puissent s'exprimer uniquement en fonction du débit cardiaque Q et du volume d'oxygène V. Or il se trouve que les études de diffusion du dioxyde de carbone dans les capillaires conduisent à relier la pression partielle de CO_2 dans le capillaire à celle dans les tissus par:

$$\ln P' = (g + A'V'^B) \ln p'_E \qquad (17)$$

où g, A' et B sont des constantes connues expérimentalement, et P' pouvant s'exprimer en fonction de P_E, comme on l'a vu, et V' en fonction de V par (15). Physiquement, (17) montre que la pression partielle de CO_2 diffusée dans les tissus augmente avec le débit volumique et la pression partielle de CO_2 dans les capillaires, ce qui semble cohérent.

Toutes les variables sont donc fonction de Q et V. Pour fermer le modèle, il reste à établir comment le volume d'oxygène transféré par unité de temps V est contrôlé par le débit cardiaque Q. Il nous faut donc un critère de contrôle: qu'est-ce qui doit être optimisé? Le critère de contrôle de la tension artérielle P_E ne suffit pas car il faut tenir compte des processus qui se déroulent au niveau des capillaires: ceux-ci étant directement liés à l'échange d'oxygène dans les tissus, comme on l'a vu. Le critère doit donc porter sur l'homéostasie (équilibre dynamique) tissulaire. Celle-ci implique nécessairement la puissance du transfert physique dans les capillaires, puisque l'on a admis que l'adaptation du cœur à l'effort traduit une recherche de puissance minimale à fournir, afin de garantir un fonctionnement de longue durée: le cœur peut fonctionner très longtemps si, à chaque instant, il s'adapte aux sollicitations extérieures en minimisant sa puissance fournie. Dans un écoulement fluide classique, la puissance est proportionnelle au produit de la variation de pression sur le trajet par le débit volumique:

$$W = (P_E - P_I)\, Q \qquad (18)$$

où P_I est la pression inférieure lors de la circulation sanguine (supposée fixe). Mais l'écoulement étant supposé de Poiseuille on a aussi:

$$W = RQ^2 \qquad (19)$$

D'autre part la puissance calorifique relative à l'échange de l'oxygène dans les tissus est supposée proportionnelle à la puissance de transfert de la circulation capillaire, via le coefficient de rendement η. Sa densité volumique est une donnée fixe, appelée équivalent énergétique de l'oxygène w = 20,27.10-3 J/cm^3. Pour V volume d'oxygène transitant en 1 seconde on a donc:

$$wV = \eta\, (P_E - P_I)\, Q \qquad (20)$$

Éliminant $(P_E - P_I)$ entre (18) et (20) et égalisant (18) et (19) il vient, compte tenu de R donnée par (16):

$$V = (8\eta\, \mu\, L/\pi\, wr^4)Q^2 \quad (21)$$

(21) donne la relation entre le volume d'oxygène échangé par unité de temps et le débit sanguin, pour un calibre capillaire r donné. L'adaptation du cœur à l'effort se traduisant par une minimisation de la puissance, on doit avoir dW = 0, ce qui avec (19) conduit à:

$$dW = 2RQdQ + Q^2dR = 0$$

soit: RQ^2 = constante. Or $RQ^2 = wV/\eta = (8\mu\, L/\pi\, r^4)Q^2$ ce qui signifie que si on impose un débit d'oxygène V constant pour répondre à une sollicitation extérieure alors la puissance cardiaque est minimale si le débit dans la circulation principale est directement adapté à la configuration des capillaires (ici leurs sections):

$$Q = (\pi\, wV/8\eta\, \mu\, L)^{1/2}\, r^2 \qquad (22)$$

Pour un besoin important en oxygène (V élevée) le débit de la circulation principale doit être élevé mais fournir une puissance adaptée aux dimensions du réseau capillaire des tissus pour solliciter le cœur avec une puissance minimale. Ce petit exemple montre qu'il est difficile, voire absurde, d'ignorer l'utilisation dans les tissus de l'oxygène transféré dans le circuit sanguin pour comprendre le rôle de la puissance cardiaque et son adaptation à l'effort.

Bibliographie

Y. Cherruault: *Biomathématiques*, PUF, 1983

S. Metry: *Contrôle des grandeurs hémodynamiques de la circulation sanguine*, thèse de 3e cycle, Paris, 1981

S. Silbernagl, A. Despopoulos: *Atlas de la physiologie* - Flammarion, Paris, 1992

Günter Vogel, Hartmunt Angermann: *Atlas de la biologie* - Bibliothèque générale française, 1994