

Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain
(LIED)

Étude et analyse critique d'un modèle de réponse dynamique de muscle

Rapport de stage

BERNARD DOMINIC Edward

Maître de stage : Christophe GOUPIL

Rapporteur : Benjamin THIRIA

Mai 2020 - Juillet 2021

Mots clés : Muscle, Thermodynamique, Conversion d'énergie, métabolisme

Table des matières

1	Introduction	2
2	Modèle	3
2.1	Généralités	3
2.2	Détails	4
2.3	Paramètres	4
2.4	Expressions	5
2.5	Tracés et explications	5
3	La nécessité de prévoir une expérience	8
4	Partie expérimentale	9
5	Conclusion	11

1 Introduction

Le métabolisme est défini comme l'ensemble des réactions chimiques - biochimiques que le corps accomplit afin de survivre en produisant de l'énergie. Ce concept est assez bien compris dans des domaines tels que la biologie. Cette compréhension peut être étendue à des applications comme pour le sport par exemple. Malgré cela, le métabolisme, qui est pourtant lié à la notion d'énergie n'a eu que très récemment un fondement thermodynamique complet [1], considérant les organismes vivants comme des systèmes ouverts *i.e.* qui échangent énergie et matière avec leur environnement. Le travail qui va être présenté ici est scindé en deux grandes parties, la première va être la compréhension du modèle de base, la seconde va être l'élaboration d'une approche expérimentale.

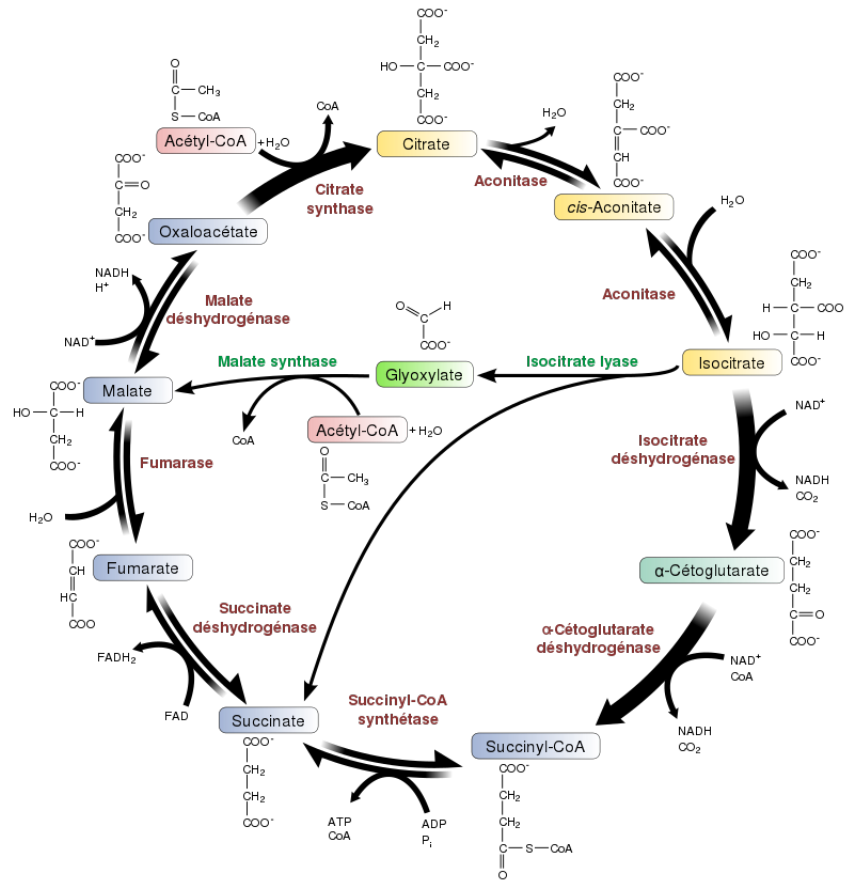


FIGURE 1 – Le cycle de Krebs, consulté sur [5]. Ce cycle participe activement au métabolisme.

La première partie se porte sur la compréhension du modèle thermodynamique. En effet, l'élaboration de celui-ci nécessite d'aborder une réflexion très abstraite à partir de considérations générales. Ceci afin de pouvoir développer une base concrète et exploitable que nous allons pouvoir étudier en détail. Nous allons nous concentrer sur l'explication du fonctionnement du modèle sans regarder la provenance abstraite, puis nous pourrions passer à la seconde partie qui introduira l'importance d'une expérience afin de valider ce modèle, et, finalement, se concentrera sur l'explication de l'élaboration de cette dernière.

2 Modèle

Le muscle peut être représenté par une machine thermodynamique. En effet, ce modèle est un modèle thermodynamique hors équilibre linéaire, cette machine thermodynamique est ouverte, et donc échange de la matière et de l'énergie avec l'extérieur. A partir d'un formalisme spécifique, le formalisme flux-force d'Onsager proche de l'équilibre, on peut arriver à une description assez complète. Ce formalisme relie les flux de variables extensives et la thermodynamique, mais nous n'entrerons pas dans les détails ici.

2.1 Généralités

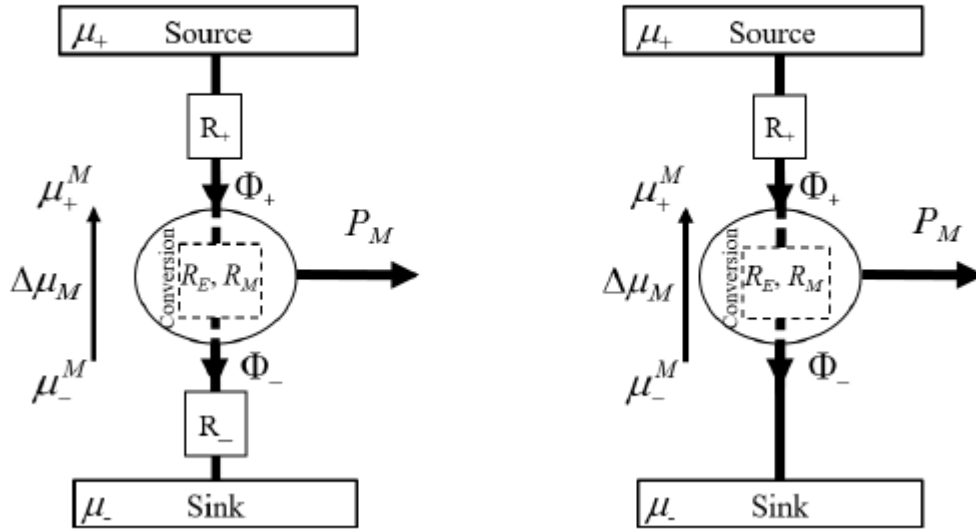


FIGURE 2 – Système Thermodynamique, à gauche : configuration générale, à droite : configuration simplifiée pour les efforts à durée limitée [1]

Ce système est composé de deux réservoirs : une source (de potentiel chimique μ_+), depuis lequel arrive un flux d'énergie sous forme de potentiel chimique et un puits (de potentiel chimique μ_-). Entre ces deux zones se trouve une zone de conversion d'énergie, dite *zone métabolique de conversion*, depuis laquelle est délivrée une puissance P_M , donc une intensité, appelée intensité métabolique i_m . Deux dipôles résistifs, passifs, font le pont entre la zone de conversion et les réservoirs. R_+ (respectivement R_- assure la connexion entre la source (respectivement le puits) et la zone de conversion métabolique. Ces deux résistances définissent en réalité les conditions limites de notre système ; elles quantifient l'accessibilité à la source et la capacité du système à se débarrasser des pertes. Les flux d'énergie sont nommés Φ_+ et Φ_- , Φ_+ étant le flux arrivant dans la zone de conversion, et Φ_- étant celui qui en repart.

2.2 Détails

Rappelons que le potentiel chimique μ est lié à l'énergie qui correspond à la variation de quantité de matière dans un système thermodynamique. Ici le système est ouvert, c'est à dire qu'il échange énergie et matière avec son environnement, le potentiel chimique paraît être le potentiel le plus adéquat pour décrire le système.

Le but étant d'arriver sur une modèle thermodynamique du métabolisme avec un nombre réduit de paramètres, nous devons ici nous concentrer sur les détails. En effet, sur la figure 2, nous remarquons $\Delta\mu_M$. En effet, le potentiel chimique μ_+ n'as pas de raison de rester le même après le passage du flux ϕ_+ à travers la résistance R_+ , il devient donc μ_+^M , de même, il n'est plus le même après passage à travers la zone de conversion métabolique, et devient μ_-^M . La différence entre ces potentiels chimiques est nommée $\Delta\mu_M = \mu_+^M - \mu_-^M$, néanmoins, dans le cas simplifié, il n'y a plus de résistance R_- et donc $\mu_-^M = \mu_-$.

Par ailleurs, la zone de conversion est caractérisée par deux résistances R_E et R_M , la première est associée au transport d'énergie tandis que la seconde est associée au flux de matière, en effet c'est le terme de viscosité du transport de matière. Ainsi, cette zone de conversion délivre une puissance P_M . Il existe donc une intensité, directement reliée au taux de production de réactions chimiques - donc au métabolisme, appelée *Intensité métabolique* I_M . Cette intensité métabolique est reliée à la vitesse de contraction du muscle par une loi très simple : $I_M = kv$, avec k une constante et v la vitesse de contraction du muscle.

2.3 Paramètres

Il est important de prendre en compte les paramètres avant d'explicitier les termes cités ci-dessus en fonction de ces paramètres. En effet, il est question de métabolisme et donc d'un organisme vivant. Cet organisme est donc limité par un certains nombre de caractéristiques physiologiques. Cet aspect se transpose sur ce modèle comme des limitations et des seuils.

Soit un muscle au repos. Si on lui applique une charge (en suspendant un poids en dessous de lui par exemple), il va se contracter, et exercer une force. Cette force est appelée la *Force Isométrique* : F_{iso} .

D'autre part, l'intensité métabolique définie précédemment, est elle aussi limitée pour des raisons physiologiques. De ce fait il existe une *intensité métabolique seuil* : I_T , au-delà de laquelle la puissance disponible décroît.

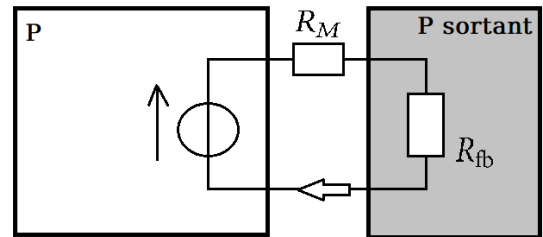


FIGURE 3 – Illustration de l'effet de FeedBack : Ici, une partie de la puissance sortante est réinjectée dans le système. La résistance R_{fb} limite cette puissance réinjectée.

Une autre caractéristique physiologique est que le muscle consomme de l'énergie au repos, en effet cet énergie minimale consommée est appelée l'énergie basale B . En effet ce flux basal correspond à une intensité métabolique nulle $I_M = 0$. La différence fondamentale entre un système vivant et un système non vivant est l'existence de cette énergie basale.

Par ailleurs, il existe un effet de rétroaction : en effet, une partie de la puissance délivrée est réinjectée dans le système, cette rétroaction/*Feedback* est limitée par une résistance dite résistance de feedback : R_{fb} , et intervient en paramètre dans notre modèle. Il reste à caractériser l'efficacité de la zone de conversion η_C , en effet celle-ci peut s'écrire : $\eta_C = \frac{\mu_+ - \mu_-}{\mu_+}$.

On a ainsi les paramètres fondamentaux du modèle, avec lesquels le reste des quantités peuvent s'exprimer : F_{iso} , I_T , B , R_{fb} et η_C .

2.4 Expressions

Nous pouvons reprendre les quantités citées dans la section 2 et les exprimer avec les quantités vues à la section précédente. Nous obtenons les flux Φ_+ et Φ_- :

$$\begin{aligned}\Phi_+ &= \frac{F_{iso}I_M/\eta_C + B}{I_T + I_M}I_T \\ \Phi_- &= R_M I_M^2 + \frac{R_{fb}I_M^2 + F_{iso}(\frac{1}{\eta_C} + 1)I_M + B}{I_T + I_M}I_T\end{aligned}\tag{1}$$

La puissance est donnée par :

$$P = \Phi_+ - \Phi_- = [F_{iso} - (R_M + R_H(I_M))I_M]I_M\tag{2}$$

Avec $R_H = \frac{F_{iso} + R_{fb}I_M}{I_T + I_M}$ la résistance dépendante de l'intensité. Cette résistance montre que le système n'est pas passif, mais s'adapte en fonction de l'intensité métabolique, et donc se ne contente pas simplement de dissiper de l'énergie.

Plusieurs choses peuvent être déduites des expressions 1 et 2 : la force musculaire et l'efficacité de celle-ci. En effet la force ici est équivalente à un potentiel électrique, on a donc $P = F_M I_M$. L'efficacité est donnée par $\eta = \frac{\Phi_+ - \Phi_-}{\Phi_+}$.

2.5 Tracés et explications

La figure 4 représente la puissance en fonction de l'intensité métabolique¹. On s'aperçoit qu'il existe une puissance maximale pour $I_M \approx 6$, en effet, sachant qu'il existe une relation linéaire entre l'intensité métabolique I_M et la vitesse de contraction du muscle [1], on se rends compte que le muscle ne développe pas forcément plus de puissance si l'on augmente sa vitesse de contraction. De ce fait, après avoir atteint le maximum de puissance, l'organisme entre dans un régime où il consomme plus de puissance mécanique qu'il en utilise pour l'effort, ceci mène à terme à l'épuisement musculaire beaucoup plus

1. Les paramètres ici sont : $F_{iso} = 14.70$, $R_{fb} = 0.10$, $I_T = 10$, $R_M = 0.40$, $B = 3$, $\eta_C = 0.84$

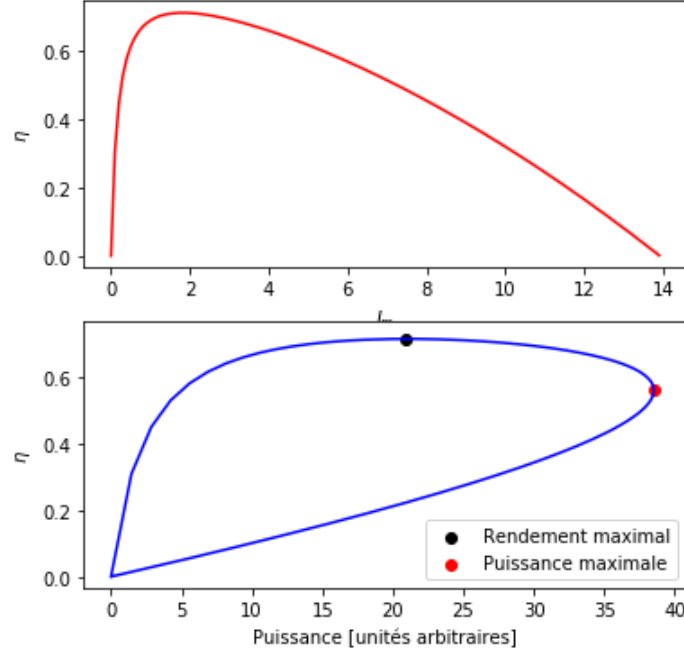


FIGURE 5 – Tracé du Rendement en fonction de I_m en haut, en fonction de la puissance en bas.

rapidement. Le système aurait tout intérêt à rester sur ce point de puissance optimal. La question est la suivante : Le système doit-il *obligatoirement* rester dans cette zone pour fonctionner de manière optimale ou existe-il d'autres paramètres ?

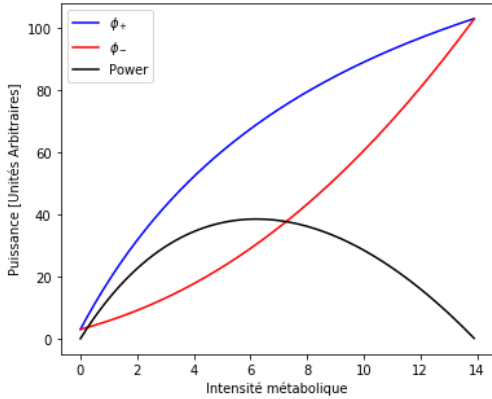


FIGURE 4 – Tracé de Φ_+ , Φ_- , et de la puissance P en fonction de l'intensité métabolique I_M .

La figure 5 représente le rendement η en fonction de l'intensité métabolique et de la puissance². En effet ce rendement n'atteint pas son maximum à la même intensité que le maximum de la puissance, il l'atteint pour une intensité plus faible. Ceci se voit plus clairement sur le second graphe, $\eta = f(P)$, il existe deux points de fonctionnements, l'un a puissance maximale, mais qui épuise beaucoup plus rapidement les ressources (un sprint par exemple), l'autre à efficacité maximale (une marche au rythme normal pour le corps, sans fatigue particulière). Finalement, il faut aussi prendre en compte la gestion des ressources du corps, il existe donc une compétition entre l'efficacité maximale, l'optimisation de la puissance et la gestion efficace des ressources (le minimum de

rejet).

2. Pour les mêmes paramètres que pour le précédent graphe

Modèle de Hill

En 1938, Archibald Vivian Hill, propose dans son papier un modèle de contraction de muscle, reliant la force de la charge appliquée sur le muscle à la vitesse de contraction de celui-ci. Il y apparaît 3 constantes a , b et c .

$$(F + a)(v + b) = c \quad (3)$$

- F est la charge sur le muscle
- a : coefficient de raccourcissement de la chaleur (coefficient of shortening heat)

En reprenant l'expression de la puissance du modèle ci dessus et en y déduisant l'expression de la force du muscle ($F = \frac{P}{I_M}$) :

$$F_M = \frac{(F_{iso} + R_{fb})I_T}{I_M + I_T} - (R_{fb}I_T + R_M I_M) \quad (4)$$

On s'aperçoit que l'équation 4 présente la même force que 3. On peut donc identifier les constantes a, b et c aux paramètres du modèle présenté en section 2 :

- $a = R_{fb}I_T + R_M I_M$
- $b = I_T$
- $c = (F_{iso} + R_{fb}I_T)I_T$

Cette similarité donne finalement, au modèle de Hill de 1938, un fondement thermodynamique.

Toute cette partie peut être manipulée via un code python fourni [4]. Il y est possible de manipuler les paramètres et de tracer les courbes allant avec ces paramètres.

Cost of Transport, Cost of Energy

La capacité d'un animal à se mouvoir dans son environnement régit son mode de vie. En effet ce déplacement est opéré par le corps et, d'un point de vue thermodynamique, est un compromis entre :

- La puissance maximale
- Le rendement maximal
- Le minimum de perte

Le coût de transport en oxygène (Oxygen Cost Of Transport - COT) quantifie le taux de perte d'énergie requise par une unité de masse pour se déplacer d'une unité de "déplacement" [2].

On peut donc écrire $COT = \frac{\Phi_-}{v}$ avec Φ_- le flux d'énergie partant de la zone de conversion, et v la vitesse de l'animal. En effet pour des efforts à durée limitées, Φ_- reflète la fraction de puissance rejetée et montre ainsi la consommation d'oxygène.

Le coût en énergie (Cost of Energy - COE_-) est défini comme la mesure de l'énergie requise par unité d'effort musculaire [2]. Cette quantité intervient comme une généralisation du *Cost of Transport*.

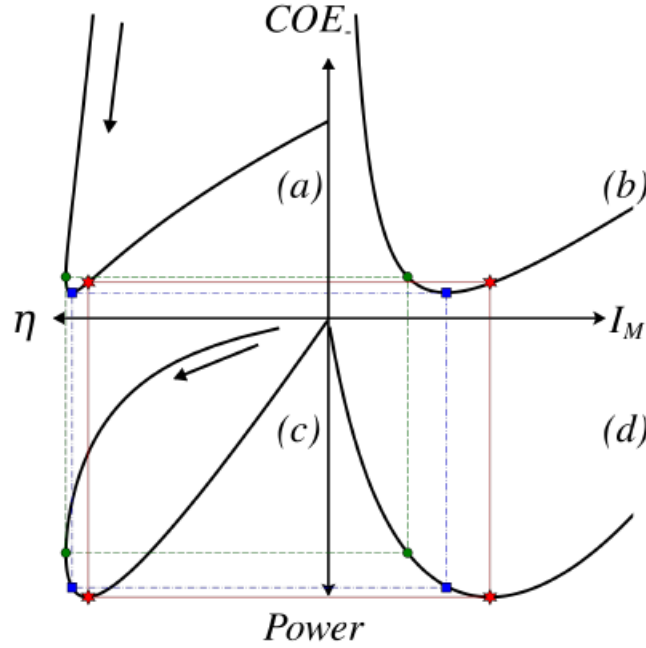


FIGURE 6 – Multi-graphe tiré de [2], les étoiles rouges montrent la puissance maximale, les carrés bleus indiquent les minima du *Cost Of Energy*, et les points verts indiquent le rendement maximal.

Ces deux quantités présentées ci-dessus représentent l'aspect "perte minimum" pour un organisme vivant. Il est nécessaire de les prendre en compte quand on veut étudier les mouvements des organismes d'un point de vue thermodynamique.

La figure 6 montre le COE_- et la Puissance en fonction des paramètres η et l'intensité métabolique I_M . Nous observons particulièrement dans la zone (c) de la figure 6, que l'organisme augmente sa puissance et son rendement, atteint un point où il voit son rendement maximal, puis son coût en énergie minimale, et finalement, fonctionne à puissance maximale. Au delà de ce stade, l'organisme est dans une situation qui peut rapidement mener à l'épuisement, car défavorable pour l'organisme.

3 La nécessité de prévoir une expérience

Vérifier la théorie est une partie à part entière et importante. C'est dans ce but qu'une expérience a été pensée, expérience que nous expliciterons plus tard. Malgré cela, il est toutefois possible de regarder les similitudes entre les résultats théoriques et des expériences. En effet c'est ce qui a été constaté [2] : les expériences faites sur un cheval en 1981 par Hoyt & Taylor [3] sont en accord avec le modèle thermodynamique du muscle.

Selon [2], une batterie de tests a été pratiquée sur un cheval. En effet, la chose intéressante est que le cheval possède 3 modes de déplacement, le pas, le trot et le galop. Il



FIGURE 7 – Pédale droite LOOK, permettant d’avoir accès à la cadence et la puissance

a aussi été vu qu’il existait ainsi un nombre de fibres musculaires impliqués. Ce nombre change et s’accroît d’un certain facteur quand le cheval passe d’un mode de déplacement à l’autre. Une expérience intéressante serait sur le cas humain. En effet, comment, d’un point de vue thermodynamique le corps humain gère-t-il sa consommation d’oxygène sous différents efforts.

Pour ceci, il a été pensé une manip, avec un vélo. En effet, mesurer la puissance instantanée permettrait de remonter à Φ_- qui reflète directement la consommation d’oxygène. Par ailleurs il est aussi intéressant de mesurer le COT et COE_- chez un individu humain.

Il est aussi prévu d’envisager la réponse transitoire, donc que l’intensité métabolique ne serait plus l’équivalent d’un courant continu mais sinusoïdal. De ce fait il faudrait donc remplacer toutes les résistances par des impédances.

4 Partie expérimentale

Afin de pouvoir mesurer la puissance instantanée pendant une manip vélo, des pédales de vélo permettant ce type de mesure ont été acquises, il s’agit de pédales LOOK représenté en figure 7, équipées de capteurs, permettant d’avoir des informations comme la cadence ou encore la puissance instantanée.

Ces informations sont récupérées via une application disponible sur android ou autre, mais ne convient pas à une organisation expérimentale. En effet, il serait beaucoup plus judicieux de récupérer ces informations directement sur ordinateur, ce qui paraît plus compliqué. Malgré le fait que l’application basique est disponible gratuitement, un code a été créé afin d’augmenter la fréquence d’acquisition des données dans le but de gagner en précision. Ce code est un code ".apk" (Android Package), permettant d’installer une

application android. L'équivalent windows d'un fichier ".apk" serai un fichier ".exe".

Une première piste à été de créer un code python afin de pouvoir utiliser le flux de données arrivant depuis les pédales. En effet, des bibliothèques pour gérer le bluetooth existent en python, mais les pédales n'arrivaient pas à être détectées via bluetooth en python.

Emulateurs Android

En effet on pourrait aussi simplement penser à installer un émulateur afin de profiter de l'application android directement sur l'ordinateur. L'émulation est le fait de remplacer un matériel informatique par un logiciel dédié. En effet dans notre cas, il nous faut remplacer l'environnement Android par un logiciel afin de pouvoir faire tourner l'application.

Après plusieurs test de plusieurs émulateurs tous différents³, il est possible de faire tourner l'application mais il est impossible de faire communiquer les pédales avec cette application.

La difficulté ici est que cette application requiert une connexion bluetooth, car elle transfère les données via bluetooth⁴.

La finalité est que les émulateurs ne prennent malheureusement pas en compte le bluetooth.

Ainsi, même si l'application marche, les données ne sont pas récupérables de cette façon.

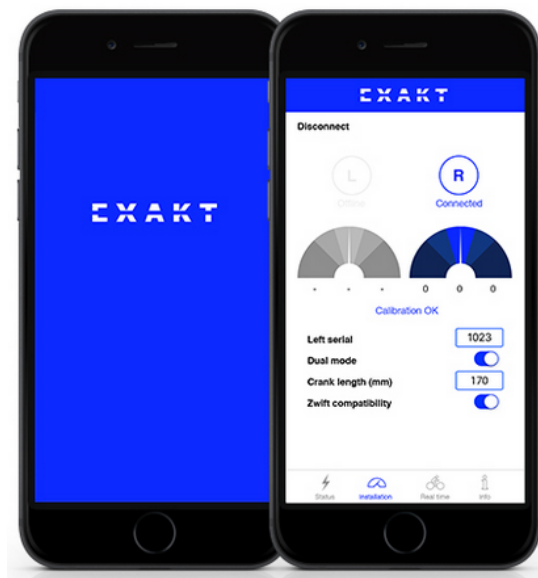


FIGURE 8 – Application Look Exakt

Machine Virtuelle

Une autre possibilité serait en effet de faire tourner l'application android sur un android, le tout sur un ordinateur. C'est en effet possible grâce à une machine virtuelle du type "Virtual Box". Une machine virtuelle est donc un environnement illusoire d'un système informatique, de façon à pouvoir utiliser n'importe quel système d'exploitation. Il s'agit donc dans notre cas de créer un environnement android dans l'ordinateur via cette virtual box. Le tout est de choisir convenablement la version correcte et qui présente le plus de stabilité possible.

Le problème est qu'aucune version d'android actuelle n'est stable à travers cette machine virtuelle. Dans les rares cas où le système est stable, les pédales n'arrivent pas à se

3. tels que *Nox App Player*, *MEmu*, *Genymotion*...

4. Ces pédales peuvent transférer les données via bluetooth et une connectivité ANT+

connecter en bluetooth. Le test de nombreuses versions et l'échec de la connexion de ces pédales ont donc guidé l'abandon de cette possible solution.

Propositions de solutions

L'autre type de connectivité que la paire de pédale possède est l'*ANT+*. La connectivité ANT+ est utilisé pour faire communiquer des appareils sans fil⁵.

Cette technologie est connue pour ne pas être énergivore, impliquant un petit dimensionnement du système ANT+, et donc peut être incorporée très facilement dans des appareils.

Les cyclistes peuvent pratiquer leur sport en intérieur; en effet certaines plateformes comme *Zwift* proposent un programme d'entraînement de cyclisme virtuel. C'est à dire qu'il est possible d'installer les pédales présentées précédemment sur un vélo, puis de relier les pédales directement au logiciel *Zwift* via ANT+. De cette façon on peut récupérer les données extraites par le logiciel.

Par ailleurs, il existe un autre logiciel capable de faire la même chose, et qui est fortement utilisé pour des expériences, c'est le logiciel *Golden Cheetah*. La récupération des données est la même que précédemment, sur une plateforme plus adaptée à l'acquisition de données.

Le problème est que ces propositions de solutions ne permettent pas de faire tourner l'application désirée.



FIGURE 9 – Le dongle permettant la connexion des pédales look avec l'ordinateur, en vente libre.

5 Conclusion

D'une part, ce stage à eu principalement pour but de comprendre comment marche la thermodynamique en dehors du cadre formel et scolaire de ce qui a pu être vu jusqu'à présent. En effet cette application à de choses concrètes telles que ce modèle thermodynamique du métabolisme a permit d'avoir une vision plus ouverte et plus précise de ce que la thermodynamique peut apporter. Par ailleurs, une grosse partie du travail à aussi été de faire de l'instrumentation, dans l'objectif de participer en amont à la préparation d'une expérience suite à la question de considérer un régime transitoire. Il a donc été question, comme vu précédemment, de trouver un moyen de connecter les pédales directement sur ordinateur, ce qui n'as finalement pas pu être fait de la bonne façon.

5. sur la bande de fréquence 2.4GHz

Références

- [1] C. Goupil, H. Ouerdane, E. Herbert, Y. D'Angelo *Thermodynamics of metabolic energy conversion under muscle load*, New Journal of Physics, 2019
- [2] E. Herbert, H. Ouerdane, Ph. Lecoœur, V. Bels, C. Goupil *Thermodynamics of animal locomotion*, 2020
- [3] D. F. Hoyt. and C. R. Taylor, Nature 292, 239 (1981).
- [4] <https://github.com/EdwardBernard/Mod-le-thermodynamique-du-m-tabolisme.git>
- [5] Métabolisme, consulté sur Wikipédia <https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9tabolisme>