ACTION SPECIFIQUE CNRS – DEPARTEMENT STIC ENERGIE PORTABLE





ANALYSE DES POSSIBILITES DE RECUPERATION DE L'ENERGIE SUR L'ETRE HUMAIN, NOTAMMENT SUR LES MOUVEMENTS ET

CONCEPTION D'UN GENERATEUR ELECTROMAGNETIQUE LINEAIRE
ALTERNATIF



Laboratoire de physiologie et de biomécanique de l'exercice musculaire Université de Rennes 2 : Franck MULTON (MC), Paul DELAMARCHE (PU)



Antenne de Bretagne de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan :

> Sylvie TURRI (ATER), Bernard MULTON (PU), Hamid BEN AHMED (MC), Dominique MILLER (PRAG).

SOMMAIRE

PARTIE A:	1
Etude bibliographique et état de l'art sur la récupération d'énergie mécanique à	
partir des mouvements humains.	
PARTIE B:	19
Aspects énergétiques du métabolisme humain et modélisation mécanique des	
mouvements.	
PARTIE C:	27
Analyse quantitative expérimentale d'un dispositif commercial freeplay.	
PARTIE D:	41
Prédimensionnement d'une maquette de générateur fonctionnant à partir de la	
marche.	

- PARTIE A -

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET ETAT DE L'ART SUR LA RECUPERATION D'ENERGIE MECANIQUE A PARTIR DES MOUVEMENTS HUMAINS

1. Introduction.

L'augmentation du marché des systèmes portables (GPS, téléphones cellulaires, ordinateur portable,...), liée à une demande en matériels entièrement basés sur l'électronique, s'accompagne d'une augmentation de la mobilité et des besoins énergétiques pour les communications et le traitement de l'information [JANSEN-99]. Tous ces systèmes sont alimentés par des piles ou des batteries qui doivent être petites, légères, tout en procurant une autonomie élevée.

1.1. Marché des accumulateurs.

L'évolution rapide de la consommation des terminaux portables rend difficile les prévisions dans le secteur des accumulateurs [EIH-99]. Selon une étude effectuée par la société Avicenne Développement [EIH-00], le marché mondial, des accumulateurs portables lithium-ion (Li-ion), nickel métal hydrure (NiMH) et nickel cadium (NiCd) a atteint 5150 M\$ en 1999, en progression de 11.2% par rapport à l'année 1998. En nombre d'éléments, la progression moyenne a été encore plus forte, environ 14%. En Europe, l'évolution du taux d'équipement en téléphones mobiles est passée brutalement de 24% en 1998 à 40 % en 1999 et, toujours selon la société Avicenne, devait atteindre 50% en 2001. Le ralentissement prévisible de la progression des téléphones mobiles s'accompagne cependant d'un taux de renouvellement important des accumulateurs des téléphones.

Comme le montre la figure 1, on continue à observer une croissance de la consommation des accumulateurs.

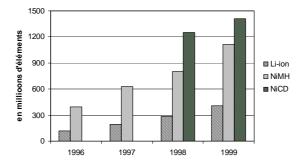


figure 1 : Marché mondial (en volume) des accumulateurs portables [EIH-99][EIH-00]

1.2. Progrès et limites.

La consommation des systèmes électroniques est liée aux fonctions à réaliser (éclairage, réceptionémission radiofréquence, microprocess,...). Bien que des progrès soient régulièrement faits, la complexification des fonctions souhaitées ne conduit pas aux réductions de consommation espérées. Il est clair qu'il est nécessaire d'améliorer l'efficacité énergétique des systèmes embarquées grâce à des process au meilleur rendement et à une gestion plus intelligente de l'énergie.

1.3. But et objectifs recherchés dans ce programme.

Le but est de chercher à réduire le volume de piles ou batteries et ou de réduire la fréquence des recharges, voire de les supprimer, grâce à un prélèvement d'énergie dans l'environnement immédiat (naturel) des appareils portables considérés. Les qualités attendues sont ici la puissance massique (et volumique) du générateur et encore l'énergie massique des moyens de stockage qui resteront

nécessaires. On cherchera en outre à accroître la disponibilité et à réduire les conséquences sur l'environnement, en terme de bilan énergétique et de recyclage en fin de vie.

L'objectif est de déterminer dans un premier temps pour quels types de produits portables et comment la puissance humaine, notamment mécanique, peut constituer un apport énergétique acceptable.

Rappelons que de tels appareils ne sont pas nouveaux : les dynamos des vélos pour l'éclairage et les dispositifs à balancier dans les montres génèrent de l'énergie à partir du corps humain par simple prélèvement sur des mouvements naturels. Le but aujourd'hui est d'utiliser l'énergie humaine, simplement, avec un rendement important, et de stocker l'énergie. [KENNEALLY_WEB-00]

Le champ des systèmes à récupération de l'énergie humaine (« human power » dans la littérature anglosaxonne) est étendu et conduit à d'intéressantes possibilités d'innovation. Il allie ergonomie, mécatronique et énergétique humaine.

2. L'ENERGIE HUMAINE.

[Rowe-97]

Le corps humain stocke, dissipe et peut produire une énergie considérable eu égard à la consommation de nos appareils électroniques portables habituels. Il produit de l'énergie constamment (mouvements, respiration, chaleur,....), et on peut considérer qu'il s'agit d'une énergie renouvelable, gratuite, non polluante et de durée de vie élevée... Il est constitué en moyenne de 15% de graisse et représente une énergie stockée supérieure à 11 kWh. Notons qu'une personne d'âge moyen consomme entre 2000 et 3000 kcalories par jour, soit environ (2,3 à 3,4 kWh d'énergie alimentaire) et qu'il faut 30 minutes pour absorber en mangeant 3000 kcalories, ce qui correspond à une puissance de recharge de 7 kW.

Même si, bien sûr, une part faible de cette énergie est exploitable, il semble que l'énergie associée aux mouvements du corps humain peut permettre d'approvisionner bon nombre d'applications. Cela requiert une conversion en électricité d'une part de l'énergie dépensée par des moyens à déterminer en fonction des ressources, des solutions technologiques envisageables et des besoins.

Comme la génération d'énergie, par exemple l'activité physique, risque d'être intermittente, il faudra un stockage d'énergie, a priori réduit par rapport à celui qui était nécessaire auparavant.

3. ESTIMATION DES SOURCES POTENTIELLES D'ENERGIE DU CORPS HUMAIN.

Il est intéressant de rappeler [JANSEN-99] :

- que le corps humain génère de l'énergie mécanique (mouvements, muscles), de l'énergie électrique (énergie électrostatique de la peau), de l'énergie thermique (chaleur du corps) et de l'énergie chimique (respiration);
- que l'énergie obtenue dépend des parties du corps utilisés, des conditions physiques et mentales, du couplage entre le générateur et l'utilisateur, ainsi que de son influence.

Au repos, un homme de 70 kg dissipe, sous forme de chaleur, entre 80 et 100 W. Lors d'un exercice physique, la puissance d'un sportif dépasse 1000 W dont 80 à 90 % sont transformés en chaleur [TIMBAL-78].

Au repos [LACOUR-78], le simple maintien des activités vitales nécessite de l'énergie. Celle ci est entièrement fournie par des oxydations : un individu au repos consomme de 250 à 300 ml d'oxygène par minute (dans les conditions standard de température et de pression).

Il existe une relation linéaire entre la puissance fournie et le surcroît de consommation d'oxygène déterminé par l'exercice (figure 2). Cette relation linéaire est souvent utilisée pour déterminer le niveau de puissance fournie par un individu associé à l'activité physique.

Pour un exercice simple comme la course à pied ou la bicyclette, toute augmentation de 100 W de la puissance fournie augmente la consommation d'oxygène du sujet de 1.35 l/mn. Dans ces conditions, le rendement global de l'organisme est de 23%. Notons que la consommation d'un litre d'oxygène assure la libération de 20.5 kJ donc 1.35 l libère 27.7 kJ (10,5 Wh) dont 6 (1,6 Wh) seulement apparaissent sous forme de travail mécanique (6 kJ ou 1,6 Wh par minute correspondent à une puissance de 100 W).

Cette relation linéaire n'est valable qu'entre certaines limites comme le montre la figure 2. Lorsque la puissance d'un exercice augmente progressivement, la consommation d'oxygène n'augmente plus à partir d'un certain niveau. Cette valeur maximale est caractéristique de l'individu et est exprimée en l/mn ou en ml/mn/kg de poids.

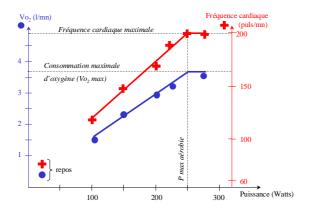


figure 2 : Influence de la puissance de l'exercice [LACOUR-78]

La puissance associée avec l'activité physique (tableau 1) a été estimé par D. Morton en 1952. Les conditions de l'estimation de ces puissances et leur mesures n'ont pas été précisés dans les articles cités.

tableau 1 :	: Puissances	calorifiques	consommées i	oar des	activités courantes.	[STARNER-96]	. [Rowe-97]

Activité	Puissance (kcalorie/h)	Puissance (W)
Dormir	70	81
Allonger	80	93
Assis	100	116
Se tenir debout	110	128
Discuter	110	128
Manger (repas)	110	128
Marcher	140	163
Conduire	140	163
Faire le ménage	150	175
Marcher rapidement (1.6km/h)	350	407
Nager	500	582
Courir sur longue distance	900	1048
Sprint	1400	1630

En 1978, J.R. Lacour (tableau 2) résume la puissance nécessaire dont a besoin un individu de poids moyen pour effectuer certaines activités. Ces puissances ont été déterminées en mesurant le volume d'oxygène consommé. Il est à noter qu'un exercice comme la course à pied met en jeu environ 25 kg de muscles.

tableau 2 : Puissance calorifique nécessaire à un individu de poids moyen [LACOUR-78]

Activité	Conditions	Puissance nécessaire
Marche	en terrain plat (pour 30 kg de muscles)	50 W
Course	100 m en 12 ou 15 s	6 à 8 kW
Course longue	5000 m en 25 min (homme de 20 ans)	1 kW
Consommation d'oxygène	1.35 l/min	100 W

En 1996, T. Starner [STARNER-96], étudiant au MIT, analyse plusieurs sources potentielles d'énergie avec le corps humain qui peuvent être utilisées pour la conversion humaine. Il en a conclu que les mouvements des membres inférieurs, marcher et courir sont les sources de puissance les mieux adaptées pour produire une puissance de quelques watts comme le montre la figure 3.

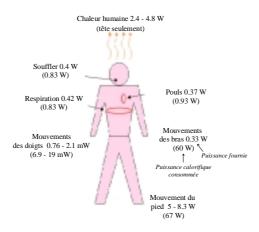


figure 3 : Puissance générée par le corps humain. [STARNER-96]

En 1999, l'Université de Delft aux Pays-Bas s'intéressant également à l'énergie produite par l'être humain par rapport à la consommation de certains appareils électroniques. C'est ainsi que A. Jansen [JANSEN-99] détermine et publie les tableaux suivants (tableau 3 et tableau 4) :

tableau 3 : Puissance mécanique de quelques activités musculaires [JANSEN-99]

Action	Puissance (W)
Appui sur un bouton avec le pouce	0.3
Action de serrer / déserrer avec la main	6
Tourner une manivelle	21
Faire du vélo à 25 km/h	100

tableau 4 : Puissance mécanique maximale d'un homme entre 20 et 30 ans [JANSEN-99]

Action	Force (N)	Distance (mm)	Temps (s)	Puissance (W)
Appuyer	16	40	1	0.64
Serrer / déserrer	400	30	1	12
Tourner	30	rayon = 100	1.5 tr/s*2*Pi	28

4. ESTIMATION DE LA CONSOMMATION DE QUELQUES APPAREILS.

L'Université de Delft, A. Jansen [JANSEN-99], s'intéresse à la conversion mécanique de l'énergie humaine en électricité, dans des plages comprises entre 0.1 et 100 W. Dans cette optique, ils ont estimé la consommation de la puissance électrique de quelques appareils, résumée dans le tableau 5.

tableau 5 : Puissance consommée par quelques appareils électriques portables [JANSEN-99].

Appareil		élect	sance rique mmée
Petite radio FM		30	mW
Walkman en Play		60	mW
Tálanhana nartahla	Appel	2	W
Télephone portable	Veille	35	mW
Lampe électrique de	4	W	

De même, dans le tableau 6, on observe l'évolution de l'électronique dans le domaine téléphonique vers la miniaturisation et la réduction de la consommation électrique. On peut généraliser cette tendance à tous les systèmes électriques.

tableau 6 : Quelques chiffres concernant les téléphones portables et sans fils Philips [Ram-99].

	Téléphones	Téléphones cellulaires		es sans fils
	Fizz 1996	Genie 1997	Dect2 1996	Xalio 1997
Poids total : téléphone+base+charge (g)	326	210	1110	780
Poids de la batterie (g)	84	24	64	35
Poids du téléphone seul (g)	230	100	220	180
Type de la batterie	Ni Cd	Li Ion	Ni Cd	Ni Cd
Tension (V)	4,8	3,6	3,6	3,6
Énergie stockée (Wh)	1,92	1,98	2,52	1,08
Énergie massique (batterie) (Wh/kg)	23	83	39	31
Capacité (batterie) (mAh)	400	550	700	300
Appel (puissance consommée en W)	1,9	1,9	3,6	3,2
Veille (avec chargeur)	53 mW	35 mW	2,9 W	2,7 W
Charge (W)	/	/	3	3

5. LES CENTRES DE RECHERCHE OU SOCIETES QUI S'INTERESSENT AUX DISPOSTIFS ELECTROMECANIQUES.

DARPA : Defense Advanced Research Project Agency, Département Recherche et Développement du ministère de la défense des Etats-Unis : "Departement of Defense" (DoD).

Le programme "Portable Power" est dirigé par le Dr Nowak Robert, responsable de : Office of Naval Research ; Navy's basic Research program in electrochemistry ; Mobile Electric Power.

 $Site\ web: http://www.dera.gov.uk/newsite/home_2.htm$

MIT Média Laboratory: Massachussetts Institue of Technology, Cambridge, Etats-Unis, Site web: http://www.media.mit.edu/resenv/index.html

Ce laboratoire travaille sur l'idée de récupérer la puissance parasite générée par les personnes qui marchent en utilisant des matériaux piézoélectriques à l'intérieur des chaussures (génération d'une tension sous contrainte mécanique). Il travaille en collaboration avec le DARPA.

Starner Thad qui était étudiant au MIT a réalisé l'examen systématiques des sources potentielles de puissance en 1996, il est maintenant Professeur à l'"Institute of Technology of Georgia".

Paradiso Joseph A. est le directeur du : "Responsive environments Group".

Shenck Nathan S. a réalisé sa thèse sous la direction de J.A. Paradiso sur un démonstrateur piézoélectrique dans une chaussure (A Demonstration of Useful Electric Energy Generation from Piezoceramics in a Shoe) [SHENCK-99] qu'il a soutenue en mai 1999.

Applied Innovative Technology: US.

Cette société commercialise des lampes torches du nom de Nightstar flashlight fonctionnant en la secouant.

Compaq:

Les laboratoires Compaq ont breveté un clavier d'ordinateur qui convertit la frappe des doigts sur les touches en énergie électrique [CRISAN_BV-99] mais il ne semble pas qu'il y ait eu de commercialisation.

DERA : Defense Evaluation and Research Agency, Département Recherche et Développement du ministère de la défense de la Grande-Bretagne.

C'est une Agence du Ministère de la Défense en Grande-Bretagne (MOD_UK), équivalente au DARPA.

Elle s'intéresse aux technologies pour convertir l'énergie mécanique de la marche en énergie électrique selon les besoins de la charge de la batterie à travers un dispositif piézoélectrique dans le talon de la chaussure. Elle travaille en collaboration la société anglaise The Electric Shoe Company créée en 2000 par Baylis Trevor, inventeur de la radio à ressort qui a eu l'idée de créer un partenariat avec Texon International, fabricant de chaussures.

Site Web: http://www.dera.gov.uk/newsite/home_2.htm

Dfs: Design for sustainability, Département du laboratoire de l'Université Technologique de Delft au Pays-Bas. (Delft University of Technology).

Le "Departement of Industrial Design Engineering" est dirigé par Arjen Jansen. Il travaille sur la consommation des systèmes électroniques portables et sur la recherche d'un moyen pour convertir l'énergie mécanique des muscles du corps humain en énergie électrique. En 1999, A. Jansen a commencé des travaux sur l'étude d'activités musculaires des humains, en considérant également le confort et l'épuisement que ces activités provoquent.

Jansen A. est Assistant professeur à la "Faculty of Industrial Design Engineering at Delft University of Technology" depuis 1994.

Groupe Freeplay Energy: Société britannique, qui repose sur l'invention de Travor Baylis et de son concept de radio à remonter, depuis 1994. Freeplay conçoit et produit des appareils fonctionnant de manière totalement autonome tel qu'une radio, une lampe torche et d'autres produits dans l'avenir.

Motorola : En association avec Freeplay Energy, ils ont développé un chargeur de téléphone qui fonctionne en tournant une manivelle.

Nissho Engineering : Société japonaise.

Cette société a créé des dispositifs de recharge autonomes fonctionnant avec un mouvement mécanique (action de serrer / desserrer ou action de pédaler). Ils développent un dispositif de chargeur de téléphone fonctionnant tel un lanceur de moteur à gazon.

Seiko : Société japonaise commercialisant des montres utilisant l'énergie cinétique.

6. LES DISPOSITIFS ELECTROMECANIQUES. [TURRI-02A]

L'idée d'utiliser l'énergie mécanique de l'homme pour alimenter les systèmes électriques portables n'est pas nouvelle mais elle connaît un regain d'intérêt depuis l'explosion du marché des appareils électroniques portables, soit depuis la fin des années 1990. De nombreuses recherches et/ou systèmes matures autres que l'utilisation de l'énergie mécanique humaine existent pour essayer d'améliorer, de réduire, voire supprimer les problèmes de recharge et de dépendance aux réseaux électriques ou aux piles. Nous ne nous intéressons ici plus particulièrement aux dispositifs existants ou en cours d'étude exploitant l'énergie des mouvements humains.

6.1. Les dispositifs électromagnétiques.

Rappelons que de tels appareils ne sont pas nouveaux : les dynamos de vélos pour l'éclairage et les dispositifs à balancier dans les montres génèrent de l'énergie à partir du corps humain par simple prélèvement sur des mouvements naturels.

Les pionniers de ces dispositifs pour s'affranchir des piles sont les montres à énergie cinétique "kinetics" (figure 4).



figure 4 : Système Kinetics de Seiko [SEIKO_WEB-01]

Mais une montre ne consomme que très peu d'énergie! D'où l'apparition d'une nouvelle problématique de recherche, fin des années1990 : chercher à mieux utiliser l'énergie humaine dans les appareils portables.

Quelques sociétés et laboratoires de recherche travaillent sur cette problématique.

6.1.1. Les appareils portatifs.

Il s'agit en général de lampes de poche ou de petites radios.

La plus simple des lampes ne contient pas de stockage d'énergie donc pas de batterie. La lumière est produite par simple action mécanique de la poignée métallique qui se rétracte lorsque l'on appuie dessus (figure 5). Cette lampe de poche appelée Forever flashlight est fabriquée aux Etats-Unis et ne pèse que 227g.



figure 5 : Forever flashlight [Great_Web-02]

La société Applied Innovative Technology (Etats Unis) commercialise des lampes (Fig. 4) conçues pour la plongée sous-marine qui fonctionne sur le principe suivant : en secouant la lampe, un aimant se déplace à l'intérieur d'une bobine et crée un courant qui est stocké dans une capacité (figure 6).

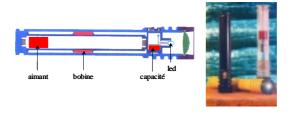


figure 6 : Lampe Nightstar flashlight [Nightstar_web-01]

L'inventeur S. Veterino a choisi de réaliser l'éclairage par une LED, car elle permet de supporter des températures extrêmes, et sa durée de vie est de l'ordre de 100 000 heures.

30 secondes de secousses (avec environ 3 secousses par seconde) créent 5 minutes de lumière intense puis 2 minutes de lumière plus faible. Cette lampe pratiquement incassable pèse environ 390 g.

La société Freeplay Energy (Grande-Bretagne) créé des appareils fonctionnant de manière totalement autonome tels que récepteurs radio, lampes torches et envisage d'autres produits. Cette société s'est lancée dans l'aventure de l'énergie autonome il y a quelques années afin notamment de permettre aux pays africains en voie de développement de ne plus être coupés du monde faute de piles ou de réseau de distribution, en mettant à leur disposition une radio fonctionnant grâce à l'énergie humaine. Un remontage par manivelle accumule de l'énergie mécanique dans un ressort (Fig. 5) qui la restitue ensuite via un générateur électrique. Une partie peut être stockée temporairement dans un accumulateur électrochimique, non représenté sur la figure 7.

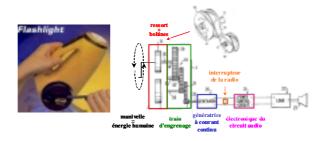


figure 7 : Principe de fonctionnement des produits Freeplay [BAYLIS_BV-99], [FREEPLAY_WEB-01]

Ces appareils entièrement basés sur des systèmes manuels (éventuellement complétés par une génération solaire photovoltaïque) existent depuis 1995. Ils fonctionnent sans aucune pile. Un générateur à ressort se remonte en 20 secondes à l'aide d'une manivelle située au dos pour fournir l'énergie nécessaire à l'écoute de la radio ou à l'éclairage d'une lampe de torche.

On peut citer pour exemples:

- La radio S360 (figure 8) fonctionne selon le principe d'un générateur à ressort. Elle est dotée en plus d'une petite batterie rechargeable qui permet de fournir jusqu'à 15h d'écoute lorsqu'elle est totalement rechargée.



figure 8: Radio Freeplay S360 [FREEPLAY_WEB-01]

Trois sources d'énergie peuvent recharger l'accumulateur : remonter le ressort, recharge sur le secteur ou capteur solaire.

Il est à noter qu'il faut environ 12 à 14 heures pour recharger de façon complète l'accumulateur à l'aide de l'adaptateur 4.5 V, 100 mA. Cette petite radio pèse environ 850 g.

- La lampe Supernova, représentée à la figure 9 onctionne sur le même principe de générateur à ressort. Lorsque la batterie est pleine, elle fournit 2 heures d'éclairage en mode normal ou 1 heure en mode maximal grâce à une ampoule au xénon à double filament.
- L'énergie libérée par le générateur à ressort peut également alimenter directement l'ampoule en mode normal pour 4 minutes d'éclairage instantané à partir de 60 tours de manivelle (environ 20 secondes).



figure 9: Lampe Supernova [FREEPLAY WEB-01]

Cette lampe est également dotée d'une prise de sortie qui permet d'alimenter tout autre appareil fonctionnant avec deux piles 1.5 V. Sa masse est d'environ 2 Kg!

6.1.2. Les générateurs d'usage général.

Ce sont des générateurs – chargeurs de batterie qui permettent de recharger différents appareils portables. Ces dispositifs de recharge sont créés par la société Nissho Engineering (Japon) [Aladdinpower_eih-01], [Aladdinpower_web-01], [Komezumi_bv-01]. A notre connaissance, deux de leurs dispositifs existent pour l'instant sur le marché.

Le dispositif appelé Aladdin Power fonctionne, comme le montre la figure 10, en serrant et relâchant un levier qui actionne un train d'engrenages et amplifie la vitesse de rotation de la génératrice. Celle-ci peut fournit jusqu'à 1,6 W pour 90 mouvements (serrer / relâcher) par minute.

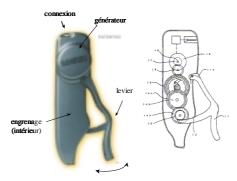


figure 10: L'Aladdin Power et son principe de fonctionnement [KOMEZUMI_BV-01]

Si l'on prend l'exemple d'un téléphone portable, 3 minutes de mouvements permettent de générer environ 20 minutes d'appel. Cet appareil pèse 111 g et sa liaison avec un téléphone se par un cordon allume cigare.

Le Stepcharger basé sur le même principe, permet (figure 11) de générer une puissance de sortie comprise entre 0 et 6 W pour une tension continue de 18 V, en actionnant la pédale avec le pied.

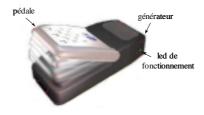


figure 11: Stepcharger [ALADDINPOWER_WEB-01]

6.1.3. Les applications spécifiques aux téléphones portables.

Deux sociétés concurrentes travaillent sur des dispositifs réservés à la recharge des téléphones portables.

D'une part, les sociétés Freeplay Energy et Motorola se sont associées pour développer une source d'énergie manuelle afin de recharger les téléphones portables. La mise en vente était prévue fin 2001 (figure 12). 45 secondes de tours de manivelle permettent de produire 3 à 6 minutes d'appel et plusieurs heures de veille (3 à 4h).

Cette "alimentation" de la taille d'un téléphone portable a une masse de 200 g, et sera vendue avec un cordon de liaison.



figure 12: FreeCharge [MOTOROLA_WEB-01], [FREEPLAY_WEB-01]

D'autre part, la société Nissho Engineering propose une génératrice constituée d'une ficelle enroulée autour d'un tambour, fonctionnant tel un lanceur de moteur de tondeuse à gazon sans batterie. Le dispositif (figure 13) peut être utilisé soit en lampe de poche grâce à la présence d'une LED, ou soit pour recharger les téléphones portables par connexion directe au niveau de l'adaptateur des téléphones. Il contient une batterie optionnelle Li-ion qui se recharge en 500 mouvements.

Si le mécanisme est actionné 60 fois par minutes, il fournit une puissance comprise entre 2,5 et 3,5 W.

Ce nouvel appareil est protégé par un brevet.



figure 13: Tug Power [NISSHO_WEB-02]

6.1.4. Les applications spécifiques aux ordinateurs portables.

La société Compaq Computer Corporation à Houston a déposé un brevet [CRISAN_BV-99] pour un clavier d'ordinateur. Chaque touche est munie à sa base d'un aimant qui, lorsqu'on appuie sur la touche, s'enfonce dans une bobine et joue le rôle de mini-générateur de courant permettant la charge d'un condensateur (figure 14).

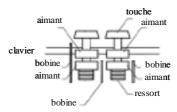


figure 14: Brevet Compaq [CRISAN_BV-99]

Les promesses de ce système sont :

- une durée d'utilisation du portable de 10 heures pour une seule charge de batterie (contre 2h30 de durée actuellement) ;
- une diminution du poids des ordinateurs grâce à une batterie moins volumineuse (1,5 kg au lieu de 1 kg).

6.1.5. Les nouveaux débouchés.

Le système d'énergie cinétique utilisé dans les montres sans piles (autoquartz) de la marque japonaise Seiko depuis 1988 ou les micro générateurs à système "kinetic" de la société néerlandaise Kinetron utilisés depuis 1989 dans plusieurs marques de montres (Swatch, Omega, Tissot, Longines, Bulova et Jean d'Eve) n'ont plus à faire leurs preuves.

A travers le projet WEOS [SEIKO_EIH-01], la firme Seiko démontre que le système basé sur l'énergie cinétique peut trouver de nouvelles applications en dehors de la montre. En effet, en 2002, les baleines bleues suivies dans le cadre du projet international WEOS (Whale Ecology Observation Satellite System) porteront une sonde développée par l'Institut Technologique de Chiba au Japon.

Le mouvement mécanique continu créé par la nage des baleines permettra de recharger, via un générateur électrique, une batterie de 5 W.

La sonde émettra pendant 2 ou 3 ans avant de se détacher d'elle-même

De la même façon, la société concurrente Kinetron recherche de nouveaux champs d'application, et réalise des études sur les aides auditives, les pacemakers, les serrures électroniques ou certains types d'appareils portables. Pour l'instant, une de leurs nouvelles applications est l'utilisation d'une micro génératrice [Kinetron_Web-02] placée dans la pédale d'une bicyclette, qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique afin de réaliser l'éclairage par des LED (figure 15).



figure 15 : Pedal-light [Kinetron_Web-02]

6.1.6. Les recherches actuelles. Erreur ! Source du renvoi introuvable.

Les chercheurs du M.I.T. ont testé un système magnétique : un générateur rotatif, placé dans la semelle de la chaussure (figure 16). Certes la puissance récupérée atteint 60 mW, mais le dispositif est complexe, fragile et cher. De plus, il présente une gêne pour l'utilisateur.



figure 16 : Générateur rotatif du M.I.T. [Shenck_Web_02]

The Electric Shoe Company [Shenck_Web_02] a été créée par T.G. Baylis (l'inventeur de la radio "à ressort" Freeplay) en collaboration avec DERA et Texon International (J. Grantham), un fabricant mondial de matériaux pour les chaussures. Un projet d'étude vient de démarrer : il s'agit d'un appareil électromécanique miniature, tel une dynamo dans le talon de la chaussure, qui tournerait lors du choc de la chaussure sur le sol.

6.1.7. Utilisation de ces appareils.

Les produits "Freeplay" ont été achetés et distribués par l'Aide Internationale au Kosovo. Ils sont également achetés par les campeurs et dans les foyers afin de pallier les circonstances critiques (coupures d'électricité) [Kenneally_web-00].

Le générateur "Aladdin Power" [RowE-97] est utilisé par l'armée américaine ainsi que les lampes "Flashlight".

Les astronautes d'Apollo ont amené avec eux sur la lune un rasoir électrique rotatif constitué d'un petit volant d'inertie que l'on active en tirant sur une corde (mais il n'était pas électrique).

Nous donnons à titre indicatifs, dans le tableau 7, quelques prix, sachant qu'ils dépendent pour certains (produits Freeplay) du type d'appareil.

Appareils	Fabriquants	Prix (F)	Prix (Euro)
Stepcharger	Nissho Engineering	1112	170
Aladdin Power	Nissho Engineering	445	68
Lampe	Freeplay	399	61
Radio	Freeplay	399	61
Nightstar Flashlight	Applied Innovative Technology	513	78
Forever Flashlight	Great Lakes Marine Specialities	81	12
FreeCharge	Freeplay	480	73

tableau 7 : Quelques prix approximatifs de ces appareils

6.2. Les dispositifs piézoélectriques.

Deux groupes de recherche travaillent sur des dispositifs capables de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique, par effet piézoélectrique.

6.2.1. Le MIT.

6.2.1.1. Les touches piézoélectriques.

Le clavier d'ordinateur mis au point par A. Crisan [CRISAN_BV-99] n'a pas tardé à inspirer l'équipe de J. Paradiso : ne pourrait-on pas associer à chaque touche un barreau piézoélectrique, dont les avantages sont, rappelons-le, la compacité, la simplicité et le faible coût?

Dans un ler temps, les chercheurs ont réalisé un démonstrateur simple [PARADISO_WEB-02] : un bouton-poussoir alimentant un émetteur destiné à l'identification par radiofréquence (RFID) (figure 17).

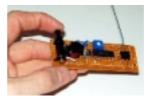


figure 17: Emetteur ID prototype [PARADISO_WEB-02]

L'élément piézoélectrique, après l'impact, vibre à la résonance, afin de maximiser le rendement de la conversion mécano-électrique. Un transformateur abaisse la tension et joue le rôle de self d'accord. A ce stade de conversion, le rendement est de 7%, pour

2 mJ générées à chaque pression. En sortie du régulateur de tension, il reste 0,5 mJ sous 3 V pour alimenter l'ensemble encodeur-transmetteur, qui consomment 150 μ J pendant la transmission de 20 ms.

Même si ce démonstrateur simple fonctionne, il reste à améliorer le rendement, mais aussi à étudier le vieillissement des barreaux piézoélectriques, soumis à des impacts répétés qui peuvent entraîner des micro-craquelures du matériau.

Cependant, les perspectives sont nombreuses et alléchantes : systèmes portables autonomes, allant de l'ordinateur aux systèmes d'identification.

6.2.1.2. Les chaussures piezoélectriques.

J. Paradiso travaille en collaboration avec le DARPA.

Ils ont observé que les chaussures ont une épaisseur suffisamment élevée au niveau du talon pour y loger un générateur piézoélectrique. Deux dispositifs ont été comparés du point de vue puissance générée lors de la marche pour une fréquence de 0.9 Hz :

- une feuille piézoélectrique flexible en PVDF (polyfluorure de vinylidène), placée dans la semelle pour récupérer l'énergie des mouvements de flexion pendant chaque pas. L'énergie récupérée (charge adaptée de $250~\mathrm{k}\Omega$) est de l'ordre de $1.3~\mathrm{mW}$.
- un dispositif formé de 2 rubans précontraints et incurvés de céramique PZT (Lead Zirconate Titanate), appelé "dimorphe", placé dans le talon. L'énergie récupérée (charge adaptée de $500~\mathrm{k}\Omega$) est de l'ordre de $8.4~\mathrm{mW}$.

Le dimorphe a été choisi pour réaliser un démonstrateur (figure 18) sur lequel N. S. Shenck a réalisé sa thèse [SHENCK-99] et [Shenck_Web_02].

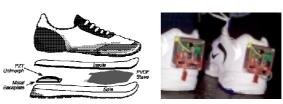


figure 18 : Implantation du matériel piézoélectrique dans la chaussure et vue du convertisseur de remise en forme de la tension [PARADISO-00]

Pour mettre en forme le signal haute impédance, qu'il récupère de la compression du matériel piézoélectrique, pour le stocker dans une capacité, il utilise un convertisseur hybride à haute fréquence de découpage (forward représenté sur la figure 19 ou hacheur abaisseur).

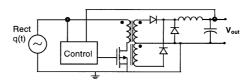


figure 19 : Topologie du convertisseur forward hybride pour la remise en forme des signaux

6.2.2. The Electric Shoe Compagny. [ELECTRICSHOE_WEB-01]

T.G. Baylis (l'inventeur de la radio "à ressort" Freeplay) en collaboration avec DERA et Texon International (J. Grantham), un fabricant mondial de matériaux pour les chaussures, ont créé un

dispositif piézoélectrique dans le talon des chaussures qui, par la pression et flexion, génèrent assez d'électricité pour recharger la batterie d'un téléphone portable. Des chaussures expérimentales (figure 20) ont été testées en juin 2000 en traversant le désert de Namibian, elles alimentaient un téléphone portable. La transmission d'énergie des chaussures au téléphone est réalisée par liaison filaire.





figure 20 : Chaussures expérimentales testées dans le désert [ELECTRICSHOE_WEB-01]

La compagnie Electric Shoe s'investit dans plusieurs technologies pour convertir l'énergie mécanique de la marche en puissance électrique. Deux voies semblent intéressantes :

- le matériel piézoélectrique dans le talon de la chaussure (figure 20) ;
- un appareil électromécanique miniature, tel qu'une dynamo dans le talon d'une chaussure, qui tournerait lors du choc de la chaussure sur le sol.

The Electric Shoe Company envisage également de consacrer des recherches autour de dispositifs inductif, magnétostrictif et biomécanique.

A terme, le but est de mettre au point des vêtements intelligents, où diverses fonctions augmenteraient la force et l'endurance de l'utilisateur, grâce à des systèmes portables autonomes (positionnement, éclairage, chauffage). Cela explique que les études ont commencé dans le domaine militaire, mais visent déjà un autre public, comme en témoigne la création de la société The Electric Shoe Company.

7. CONCLUSION.

L'expansion des appareils portables et de leurs domaines d'utilisation créent une servitude pour l'utilisateur. Les batteries et accumulateurs n'offrent pas toutes les caractéristiques d'autonomie et de fiabilité nécessaires à un fonctionnement optimal, et sont un facteur de pollution de l'environnement. Ces inconvénients sont devenu omniprésents aujourd'hui, ce qui entraîne un regain d'intérêt envers les dispositifs permettant la récupération d'une partie de l'énergie naturellement dissipée par l'homme. La possibilité de réaliser de tels systèmes est aidée par la diminution de la consommation électrique des appareils portatifs, autre défi technologique.

Nous pouvons constater qu'ils utilisent deux types de mouvements : les mouvements réalisés de façon naturelle, qui sont malheureusement contraignants pour les systèmes et donc peu utilisés, et les mouvements réalisés de façon volontaire, qui ont l'inconvénient de contraindre l'individu à être mobilisé pendant cette action et qui peuvent entraîner une gêne. Cette gêne est tolérable si les performances des dispositifs sont correctes ce qui nécessitent des solutions technologiques innovantes et performantes en terme de rendement.

Afin de prendre en compte tous ces facteurs, des équipes de chercheurs tentent d'améliorer les dispositifs existants, et de trouver des concepts nouveaux, qui feront peut-être partie intégrante des technologies futures.

L'alimentation en énergie des objets portables représente un véritable défi en termes d'autonomie et d'ergonomie. L'alimentation en énergie des objets portables représente un véritable défi en termes d'autonomie et d'ergonomie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[ALADDINPOWER_EIH-01] Mini générateur ou appareil de musculation ?

Electronique International Hebdo, 5 juillet 2001, N°441, page 45.

[ALADDINPOWER WEB-01] Site internet de la société AladdinPower, Floride, US.

Constructeur Nissho Engeneering (Japon)

http://www.aladdinpower.com

[BAYLIS_BV-99] BAYLIS T. G.

Spring operated current generator for supplying controlled electric current to a

load.

Demandeur: Baylis Generators Limited, Twickenham, Grande Bretagne - Brevet

N° US 5917310, 29 june 1999, 18 pages.

[CRISAN BV-99] CRISAN A.

Typing power.

Demandeur: Compaq computer Corporation, Houston, US.

Brevet N° US 5911529, 15 june 1999, 9 pages.

[EIH-99] Entreprises & Marché.

Accumulateurs : Marché mondial en 1998 des accumulateurs. Electronique International Hebdo. 3 juin 1999. N°352, page 13.

[EIH-00] Entreprises & Marché.

Marché mondial des accumulateurs portables en 1999.

Electronique International Hebdo. 20 avril 2000. N°388, page 13.

[ELECTRICSHOE WEB-01] Site internet de la société The Electric Shoe Compagny, Grande Bretagne.

http://www.theelectricshoeco.com/

[FREEPLAY_WEB-01] Site internet de la société Freeplay Energy, Grande Bretagne.

http://www.freeplay.net

[GREAT WEB-02] Great Lakes Marine Specialties, Minneapolis, US, Annonce Forever, site web:

http://www.navstore.com/forever.asp

[JANSEN-99] Jansen A.J., STEVELS A.L.N.

Human Power, a sustainable option for electronics.

Electronics and the Environment, Proceedings IEEE International Symposium

on, 1999, pages 215-218.

[KENNEALLY_WEB-00] Kenneally C.

Power from the people breaks the hold of batteries and plug.

The New York Times. 3 août 2000.

 $http://www.nytimes.com/learning/general/featured_articles/000803 thursday.html\\$

[KINETRON_WEB-02] Kinetron, New applications,

 $site\ web: http://www.kinetron.nl/d_newapp/d1.htm$

[KOMEZUMI_BV-01] Komezumi T., Hirakui K.

Portable Manual Generator.

Demandeur: Nissho Engineering, Japon - Brevet N° WO 0131764, 3 may 2001,

30 pages.

[LACOUR-78] LACOUR J.R.

Le fonctionnement musculaire.

Hors série Science et Vie, juin 1978, pages 99-111.

[MORTON-52] MORTon d.

Human Locomotion and Body Form.

The Williams & Wilkins Co., Baltimore, 1952.

[MOTOROLA_WEB-01] Motorola, US, Annonce publi-information, Site web:

http://commerce.motorola.com/consumer/QWhtml/freecharge.htmlSite

[NISSHO_WEB-02] Nissho Engineering, Japon, Annonce Tup-Power, Site web:

http://www.nseg.co.jp/english2/products/tug/syousai.htm

[NIGHTSTAR_WEB-01] Site Internet Nightstar Flashlight

Applied Innovative Technologies, USA.

http://www.nightstar1.com

[PARADISO-00] Paradiso J.

Renewable Energy Sources for the Future of Mobile and Embedded Computing.

Computing Continuum Conference, San Francisco, CA, 16 mars 2000.

http://www.media.mit.edu/resenv/papers.html

[PARADISO_WEB-02] PARADISO J.A., FELDMEIER M., « A compact, wireless, self-powered

pushbutton controller. »,

site web: http://www.media.mit.edu/resenv/pubs/papers/UbiComp-Switch-

submitted.pdf

[RAM-99] Ram B., Stevels A., Griese H., Middendorf A., Muller J., Nissen N.F., Reich H.

Environmental performance of mobile products.

Electronics and the Environment, Proceedings IEEE International Symposium

on, 1999, pages 140-145.

[ROWE-97] ROWE J.E. et al.

Energy – Efficient Technologies for the Dismounted Soldier.

Committee on Electric Power for the Dismouncil Soldier, Board on Army Science and technology, Commission on Engeneering and Technical Systems,

National Research Council.

National Academy Press, 1997, 286 pages. http://www.nap.edu/catalog/5905.html

[SEIKO_EIH-01] Seiko.

L'alimentation par le mouvement sort de la montre.

Electronique International Hebdo. 1 septembre 2001. N°442, page 43

[SEIKO_WEB-01] Site Web Seiko.

Thermic: la technologie de la chaleur. http://www.seiko.fr/cadres/techno.htm.

[SHENCK-99] Shenck N.S.

A Demonstration of Useful Electric Energy Generation from Piezoceramics in a

Shoe.

Thèse Massachussetts Institute of Technology. Mai 1999.

http://www.media.mit.edu/resenv/papers.html

[SHENCK_WEB_02] Shenck N.S., Paradiso J.A., «Energy scavenging with shoe-mounted

piezoelectrics. », IEEE Micro, Volume 21, Issue 3, May-June 2001, pages 30-42,

site web:

http://www.computer.org/micro/homepage/may_june/shenck/

[STARNER-96] Starner T.

Human-Powered Wearable Computing.

IBM Systems Journal, Vol. 35, pages 618-629, 1996.

[TIMBAL-78] TIMBAL J.

Lutter contre le froid et le chaud.

Hors série Science et Vie, juin 1978, pages 53-63.

[TURRI-02A] TURRI S., POULIN G.

Dispositifs électromagnétiques permettant l'exploitation de l'énergie des

mouvements humains.

Colloque Energie Portable: autonomie et intégration dans l'environnement humain, Journées Electrotechniques du Club EEA, 21-22 mars 2002., pages 69-

77.

- PARTIE B -

ASPECTS ENERGETIQUES DU METABOLISME HUMAIN ET MODELISATION MECANIQUE DES MOUVEMENTS

1. Introduction.

Le laboratoire de Physiologie et Biomécanique de l'Exercice Musculaire travaille sur le mouvement humain et plus particulièrement sur les adaptations mécaniques et métaboliques à l'exercice physique. Parmi tous les paramètres que ce type d'étude fait intervenir, l'un des plus important est l'énergie. Les deux spécialités du laboratoire ont permis d'appréhender l'être humain comme une machine consommant un carburant lié au métabolisme (consommation d'oxygène) et restituant un travail mécanique. Le couplage de ces deux approches permet d'envisager des calculs de rendement et d'efficacité.

Dans ce document, nous donnons quelques résultats obtenus sur la locomotion humaine aussi bien du point de vue mécanique que métabolique.

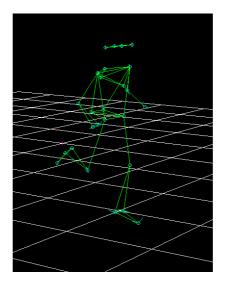
2. ANALYSE ENERGETIQUE DE LA LOCOMOTION HUMAINE

Lorsqu'on s'intéresse au mouvement humain, on commence en général par analyser la locomotion humaine. La locomotion bipède est en effet le mouvement qui caractérise l'être humain parmi toutes les autres espèces animales. La locomotion humaine a depuis longtemps été analysée suivant de multiples points de vue. Entre autre, l'énergie de la locomotion humaine peut être analysée du point de vue métabolique et mécanique. L'énergie métabolique donne le nombre calories consommées pendant un mouvement que l'on mesure en général de manière indirecte. Cette énergie peut être comparée au carburant que l'on utilise dans un véhicule. Ce carburant ne sert pas uniquement à engendrer un mouvement mais est aussi utilisé pour de nombreuses fonctions du corps humain (respiration, maintien de la température, battements cardiaques...). Seule une partie de cette énergie est restituée en travail mécanique.

2.1. Aspects mécaniques

L'énergie mécanique est calculée de manière indirecte par la mesure des déplacements des segments corporels. Pour y parvenir, nous utilisons le protocole suivant. Les sujets sont équipés de marqueurs réfléchissant l'infrarouge (demi-sphères de 2,5 cm de diamètre). Ces marqueurs sont positionnés sur des repères anatomiques bien déterminés afin de limiter le glissement de la peau ou des muscles. 28 marqueurs sont généralement utilisés permettant ainsi de représenter le corps humain en 12 segments rigides articulés (tête, tronc, bras, avant-bras, cuisses, tibias et pieds). Des tables anthropométriques nous permettent de retrouver les masses de ces divers segments en fonction de la masse totale. Les tables nous fournissent aussi les inerties des segments ainsi que la position de son centre de masse. Bien entendu, ces données sont des moyennes qui apportent une imprécision de mesure lorsqu'on travaille sur des sujets éloignés des moyennes.

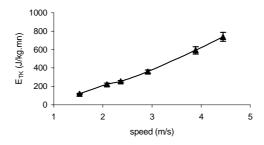
7 caméras infrarouges synchronisées à 60Hz nous permettent d'obtenir la position de ces marqueurs dans les trois dimensions à partir d'un algorithme de reconstruction 3D (algorithme DLT). La figure cidessous montre le résultat obtenu en 3D sur un athlète courant sur tapis roulant. A partir de ces mesures, on calcule les centres de masse des segments corporels ainsi que les angles aux articulations. De là, on peut appliquer les définitions des différentes énergies mécaniques qui interviennent.



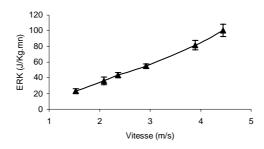
Nous calculons la position du centre de masse du sujet grâce aux tables anthropométriques et obtenons ensuite l'énergie cinétique dite externe. Nous calculons ensuite, pour chaque segment i, la vitesse du centre de masse Gi par rapport au centre de masse global G. De la même manière, les vitesses angulaires sont calculées à chaque articulation. De là nous calculons l'énergie cinétique dite interne des segments corporels. L'énergie cinétique totale est donc donnée par :

$$E_{\kappa} = \frac{1}{2}MV_{G/R}^{2} + \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{1}{2}m_{i}V_{G_{i}/R^{*}}^{2} + \frac{1}{2}I_{i}w_{i}^{2}\right)$$

où M est la masse totale, VG/R est la vitesse du centre de masse par rapport au repère du laboratoire, mi et Ii sont respectivement la masse et le moment d'inertie du segment i. wi est la vitesse angulaire du segment i et V_{Gi/R*} est la vitesse de Gi par rapport au repère barycentrique centré en G. L'énergie cinétique externe varie naturellement de manière parabolique par rapport à la vitesse et ne dépend que de la masse du sujet. Afin d'éliminer le biais de la masse, nous normalisons toutes nos énergies par rapport à la masse. De même, comme la locomotion est un mouvement quasi-périodique, nous rapportons l'énergie dépensée au temps de course, l'exprimant ainsi en J.Kg⁻¹.min⁻¹. La figure cidessous illustre l'évolution de l'énergie cinétique interne de translation en fonction de la vitesse de course. Il existe une relation parabolique entre cette énergie et la vitesse, mais cette relation varie d'un individu à l'autre en fonction de sa technique de course et de marche.



Il en est de même pour l'énergie cinétique interne de rotation.



Une autre énergie mécanique rentrant en ligne de compte est l'énergie potentielle. Elle dépend des oscillations verticales intervenant pendant le mouvement humain :

$$E_{P} = \sum_{i=1}^{12} m_{i} g h_{i}$$

où h_i représente la variation de hauteur du centre de masse du segment i. Comme le mouvement de course peut être considéré comme une succession de sauts, cette part d'énergie joue un rôle important. La littérature en biomécanique indique cependant que les oscillations verticales augmentent avec la vitesse jusqu'à une vitesse seuil à partir de laquelle elles diminuent. Les oscillations verticales maximales sont de l'ordre de 10cm mais en moyenne sur un cycle de marche l'énergie potentielle est nulle. De la même manière que l'énergie cinétique interne, la relation de cette énergie avec la vitesse dépend de la technique de course et de l'entraînement.

Il reste à considérer les forces mises en jeu lors du mouvement. Ces forces sont principalement le poids du sujet et la force de réaction du sol R (on néglige généralement les frottements de l'air). Dans la littérature, le travail de R est souvent négligé puisqu'on suppose que le point d'application de la force ne se déplace que très peu. On fait l'hypothèse que le pied peut être ramené à un point, si bien que le travail est nul. Cependant, la force de réaction du sol se déplace sous la voûte plantaire et son déplacement diminue avec la vitesse. Pour une marche, il y a un contact talon-sol puis un déplacement de la force de réaction du sol vers le bol du pied. Au pire cela correspond à la longueur du pied, soit approximativement 20 cm. R supporte non seulement le poids mais permet aussi de se propulser, si bien que ses valeurs dépassent légèrement, en moyenne le poids du sujet. Comme les précédentes énergies sont normalisées par la masse du sujet et qu'un pas dure une seconde, on obtient une approximation de ce travail de : 0.2*g*60≈120 J.Kg⁻¹.min⁻¹ ce qui est en fait loin d'être négligeable.

A partir de ces divers calculs d'énergie on accède au travail des forces internes. On utilise pour cela le théorème de l'énergie cinétique qui stipule :

$$\Delta E_{K} = W_{int} + W_{ext}$$

où W_{int} est le travail des forces internes et W_{ext} celui des forces externes. Si on néglige, comme c'est le cas dans la littérature, le travail de la force de réaction du sol, on obtient :

$$W_{_{int}} = \Delta E_{_{K}} - W_{_{ext}} \iff W_{_{int}} = \Delta E_{_{K}} + \Delta E_{_{P}}$$

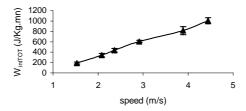
Au final, nous obtenons la relation suivante :

$$W_{\text{int}} = \Delta \left[\sum_{i=1}^{i=11} m_{i} gh_{i} + \frac{1}{2} MV_{2} + \sum_{i=1}^{i=11} \left(\frac{1}{2} m_{i} V_{G_{i}/R^{*}}^{2} + \frac{1}{2} I_{i} w_{i}^{2} \right) \right]$$

Comme cette valeur est calculée à chaque instant, c'est à dire à 60Hz, le travail total (moyen) est calculé de la manière suivante :

$$W_{_{\mathrm{int}TOT}} = \frac{1}{t_{_{f}} - t_{_{0}}} \sum_{_{t=t_{0}}}^{_{t=t_{f}}} |W_{_{\mathrm{int}}}(t)|$$

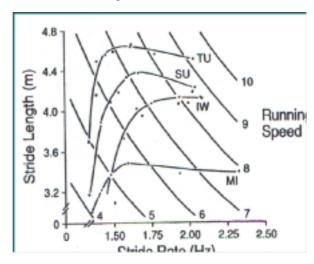
Dans cette expression, on ne tient pas compte de la part du travail efficace et résistif et on suppose donc qu'ils « coûtent » la même énergie métabolique. La figure ci-dessous représente le travail total des forces internes en fonction de la vitesse de progression.



Il reste maintenant à examiner comment évoluent la fréquence et la longueur des pas en fonction de la vitesse. Rappelons que la vitesse de progression est lié à ces deux paramètres :

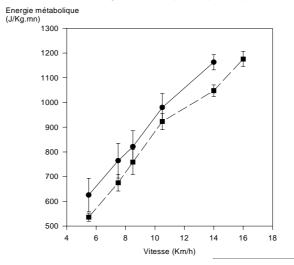
V=F*l

Ainsi les courbes d'iso-vitesse dans le plan fréquence/longueur des pas sont des hyperboles. Plusieurs auteurs (Enoka 1990) ont démontré que, naturellement, l'être humain cherche à augmenter préférentiellement sa longueur des pas jusqu'à une valeur maximale. Pour des vitesses supérieures, cette longueur des pas reste constante et a même tendance à décroître. Pour augmenter la vitesse nous choisissons donc d'augmenter la fréquence des mouvements. Ainsi, la figure ci-dessous illustre des iso-vitesses allant de 4 à 10 m.s⁻¹ dans le plan fréquence des pas / longueurs des pas. Les courbes de 4 sujets en course sont représentées sur ce graphe et on peut constater que, pour tous les sujets, il y a bien augmentation de la longueur des pas pour de faibles vitesses puis augmentation de la fréquence des pas (de 1.25Hz à plus de 2 Hz pour des vitesses allant jusqu'à 9m.s⁻¹). Ainsi 2Hz peut être considéré comme l'une des plus hautes fréquences de la course humaine. La fréquence de pas en marche a des valeurs de l'ordre de 0.5 Hz à 0.3 m.s⁻¹ atteignant 1Hz à 1.3 m.s⁻¹ [EMMERIK_96].



2.2. Aspects physiologiques

Energie métabolique = f(vitesse)



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[EMMERIK_96]

EMMERIK R.E.A., WAGENAAR R.C. Effects of walking velocity on relative phase dynamics in the trunk in human walking. J Biomechanics 1996; 29; 9: 1175-1184.

- PARTIE C -

ANALYSE QUANTITATIVE EXPERIMENTALE D'UN DISPOSITIF COMMERCIAL FREEPLAY

1. Introduction.

Le but est de réaliser l'analyse quantitative d'une chaîne de conversion "énergie électrique-énergie mécanique" afin d'établir le bilan énergétique complet pour déterminer les possibilités d'un tel système ainsi que son potentiel d'amélioration. Pour cela, nous expérimentons un système de radio portative commercialisé par la société Freeplay (Partie A-6.1.1.) qui utilise l'énergie mécanique fournie par un mouvement volontaire de l'homme (tourner une manivelle) pour la transformer en énergie électrique.

Ces travaux ont été présenté au colloque GEVIQ 2002 à Marseille [TURRI_02B].

2. Presentation du système etudie.

Il s'agit d'une petite radio Freeplay (S360) qui permet, à l'aide d'une manivelle, de faire passer d'une bobine à une autre un ressort précontraint en acier au carbone, accumulant ainsi de l'énergie mécanique. Libéré, le ressort tend à revenir, sur sa bobine initiale, à la position d'origine en restituant l'énergie mécanique, via un train d'engrenages, à une génératrice à courant continu (figure 1). L'énergie électrique récupérée est stockée dans une petite batterie NiCd et/ou alimente l'électronique du circuit audio.





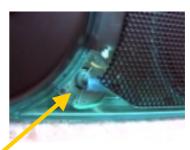


figure 1 : manivelle, train d'engrenages et génératrice à courant continu

D'autres sources, panneau photovoltaïque ou adaptateur sur secteur (4.5 V, 100 mA) permettent de recharger l'accumulateur. Cependant la surface du panneau photovoltaïque (figure 2) nécessite, pour avoir une réelle efficacité d'alimentation de la radio, d'être quasiment en plein soleil.



figure 2 : vue du générateur photovoltaïque

3. CHAINE DE CONVERSION D'ENERGIE.

Afin de distinguer les différents éléments qui entrent en jeu, et pour analyser la chaîne de conversion énergie humaine – énergie mécanique - énergie électrique, nous présentons ci dessous (figure 3) l'objet de l'étude réparti en sous parties.

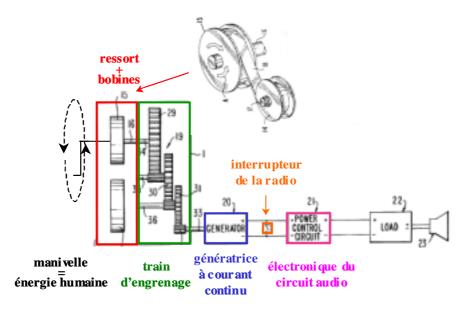


figure 3 : schéma général du système étudié [BAYLIS_BV-99]

L'instrumentation de l'appareil (figure 4) nous a permis de relever les caractéristiques électriques et mécanique. La manivelle a été remplacée par une poulie qui nous permet de déterminer la force à fournir pour bobiner le ressort.

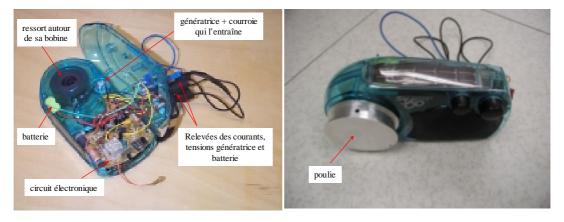


figure 4 : Instrumentation de la radio (électrique et mécanique)

Quelques caractéristiques mesurées :

- Masse du ressort et des 2 bobines : $M_{ressort} = 366g$
- Nombre de tours permettant au ressort d'être complètement remonté : $n_{trf} = 60$
- Temps moyen pour remonter le ressort entièrement : $t_{remontage}$ = 60 s
- Temps moyen pour que le ressort revienne à sa position initiale : t_{déroulement}=319 s
- Rayon de la manivelle : 9.5 cm
- Diamètre de la poulie : 7 cm.
- Rapport de multiplication du train d'engrenages avec poulies et courroie : m = 326
- Batteries : 2 éléments NiCd en série d'une capacité C = 600 mA.h sous 2.4 V environ.

4. ANALYSE D'UN MOUVEMENT VOLONTAIRE PARTICULIER.

Nous avons expérimenté des mesures de l'énergie consommée et fournie par un sujet effectuant le mouvement de manivelle sur la radio rechargeable. Nous avons choisi une étudiante entraînée de troisième cycle en STAPS pour effectuer cette première expérimentation.

4.1. Mesure de la consommation énergétique humaine.

Il existe une relation linéaire entre la puissance fournie et le surcroît de la consommation d'oxygène lié à l'exercice (figure 5). Cette relation est utilisée pour déterminer le métabolisme énergétique.

Notons qu'un litre d'oxygène par minute (noté VO2) correspond à 4,8 kcal par minute soit 340 W métaboliques. Sachant que le rendement énergétique musculaire vaut environ 20% (il varie assez peu en fonction des individus, c'est la limite de possibilité de consommation d'oxygène qui change surtout), un accroissement de VO2, par rapport à un état de repos, de 1 litre/minute correspond environ à une puissance mécanique de 70 W. La figure 13 montre, pour un individu donné, l'évolution de VO2 en fonction de la puissance mécanique ainsi que l'accroissement du rythme cardiaque correspondant. On constate effectivement une croissance de 1 litre/mn pour 70 W.

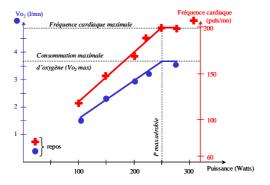


figure 5 : Relation entre consommation d'oxygène et énergie mécanique produite [LACOUR-78]

Comme l'accroissement de VO2, lié à l'effort physique correspondant au remontage du ressort, est relativement faible par rapport à la valeur de repos et afin de stabiliser les mécanismes biologiques, un protocole a été mis au point.

4.2. Protocole de l'expérimentation.

Dans un premier temps, nous avons demandé au sujet ses paramètres morphologiques (taille, poids) et mesuré la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène de repos (debout dans le laboratoire). La consommation d'oxygène a été mesurée par un CPX (calibré en fonction de l'hydrométrie, de la pression atmosphérique et de la température) et la fréquence cardiaque par un cardio-fréquencemètre. Les valeurs de repos sont de 76 pulsations par minute pour la fréquence cardiaque et 4 ml.kg-1.min-1 soit 0.24 l.min-1 pour la consommation d'oxygène. Pendant cette phase de mesure nous avons placé des marqueurs réfléchissant l'infrarouge sur les repères anatomiques du haut du corps : les deux épaules, le coude droit, le biceps droit, les malléoles interne et externe du poignet, la première phalange du majeur, la clavicule, la base du sternum, les épines iliaques gauche et droit, et sous le nombril. Le placement de ces marqueurs nous sert à définir un repère pour chaque segment considéré en assurant que trois marqueurs au moins sont liés à un même segment. Nous envisageons donc le squelette décrit dans la figure ci-dessous. Les positions des marqueurs ont été mesurées par 4 caméras infrarouges (vicon370) placées en arc de cercle autour du côté droit du sujet, comme le montre la figure 6. La fréquence de mesure était de 60 Hz.

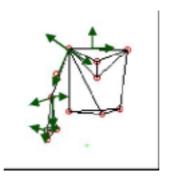


figure 6 : Positions des marqueurs sur la partie supérieure du corps

A partir de ces repères, il est possible de calculer les angles d'Euler entre les différents segments et le repère lié au tronc. Ces angles sont dérivés pour calculer l'énergie cinétique de rotation des segments corporels comme nous l'avons vu précédemment. De même, nous calculons l'énergie cinétique de translation de ces même segments. La puissance mécanique liée au travail de la force agissant sur la manivelle a été estimé à 4 W. Il n'est pas nécessaire de calculer l'énergie potentielle des segments corporels puisque le mouvement est cyclique (énergie potentielle supposée nulle). Ces énergies sont divisées par le temps nécessaire pour effectuer un cycle afin d'obtenir la puissance développée pendant les différents mouvements du protocole.

Dans un deuxième temps, nous avons demandé au sujet de marcher sur tapis roulant pendant trois minutes à la vitesse de 5 km.h⁻¹ afin d'obtenir un premier palier de consommation d'oxygène et de fréquence cardiaque. Pendant ces trois minutes, nous avons effectué une mesure du mouvement des marqueurs afin d'évaluer l'énergie cinétique de translation et de rotation des segments corporels à ce même exercice. Cette énergie correspond au mouvement de balancier du bras pendant la locomotion humaine. La fréquence des pas était approximativement de 1Hz (mesure du temps s'écoulant entre deux valeurs pic de l'altitude de l'épaule). La consommation d'oxygène stabilisée au bout des trois minutes était de 0.93 l.min⁻¹ et la fréquence cardiaque de 90 pulsations par minute. Vu le type de mouvement, nous pouvons considérer que l'énergie consommée par minute est de 4.825.(0.93 – 0.24)= 3.33 kcal.min⁻¹ pour la marche seul. Soit en prenant en compte la phase de repos, une puissance mécanique d'environ 50 W. La figure 6 montre l'évolution de la consommation d'oxygène en fonction du temps pendant cette phase de stabilisation. On voit bien sur cette figure que la consommation d'oxygène augmente pour se stabiliser à un palier.

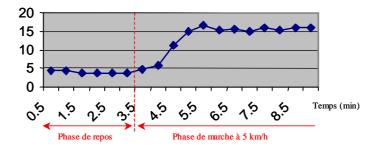


figure 7 : Evolution de la consommation d'oxygène spécifique en ml.kg⁻¹.mn⁻¹ pendant la phase de stabilisation (individu de 60 kg)

Lors de la troisième étape nous avons demandé au sujet de prendre la radio en main et de tourner la manivelle lentement (en laissant l'appréciation de la vitesse exacte au sujet). Le sujet continue à marcher pendant 3 minutes à la même vitesse pendant le rechargement. La fréquence de marche est restée identique (1 seconde entre chaque pic d'épaule), la manipulation de l'appareil n'a donc pas modifié ce paramètre. La fréquence naturellement choisie pour tourner la manivelle a aussi été mesuré à 1 Hz. Ce choix d'une fréquence identique est un résultat connu dans le domaine des neurosciences.

Lors du rechargement nous avons vu la fréquence cardiaque passer de 90 à 100 pulsations par minute, ce qui est suffisamment important pour s'abstraire de l'imprécision de mesure. De même la consommation d'oxygène a légèrement augmenté et malgré qu'un palier ne soit pas clairement atteint faute de temps, nous pouvons constater une augmentation suffisante pour mesurer l'impact de ce mouvement du point de vue énergétique. On peut considérer que la consommation d'oxygène est passée de 0.93 à 1.07 l.mm⁻¹, ce qui représente une augmentation de la puissance mécanique de 9 W (courbe figure 8). Cette valeur est supérieure aux 4 watts prévus car les mouvements nécessaires, notamment des bras, consomment également de l'énergie. En tenant compte du rendement énergétique musculaire de 20%, le rendement énergétique global vaut donc approximativement 8%.

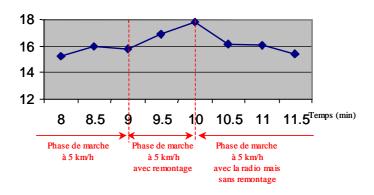


figure 8 : consommation d'oxygène pendant le remontage en ml.kg⁻¹.mn⁻¹.

A la fin du rechargement, nous avons demandé au sujet de continuer à marcher pendant 3 minutes à la même vitesse avec l'appareil en main, sans tourner la manivelle. Nous pensions retrouver le palier précédent, mais le fait de tenir l'appareil nous a montré (figure 9) que la fréquence cardiaque ne retrouvait pas la valeur de 90 pulsations par minute mais restait proche de 95 pulsations par minute. Le sujet nous a informé qu'il peinait à porter l'appareil qui avait tendance à glisser dans ses mains et entraînait donc de nouveaux efforts pour y parvenir. Au bout des trois minutes nous avons demandé au sujet de recharger l'appareil plus rapidement en lui laissant le choix de la vitesse exacte. Nous avons pu constater une fréquence de mouvement parfaitement égale au double de la fréquence de marche qui n'a pas changé pour autant. La fréquence cardiaque a de nouveau augmenté pour passer de 95 à 105 pulsations par minute. La consommation d'oxygène, sans atteindre de nouveau un palier est montée de 0.93 à 1.02 l.mn⁻¹, (supplément d'énergie de 0.43 kcal.mn⁻¹) soit une puissance mécanique de 1.25 W. Malheureusement, le temps de rechargement à cette vitesse est légèrement insuffisant pour conclure strictement sur les bilans énergétiques mis en jeu, toutefois on peut noter une nette tendance à l'augmentation qui devrait être validée par une mesure avec un appareil ayant une plus longue durée de rechargement.

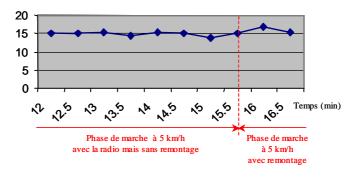


figure 9 : consommation d'oxygène après la fin du remontage en ml.kg⁻¹.mn⁻¹

4.3. Conclusion.

Nous souhaitons insister sur trois points :

Nos appareils de mesure sont assez sensibles pour mesurer le surcoût d'énergie engendré par ce type de mouvement (peu stressant pourtant). Ceci nous amène à conclure que de nouvelles expérimentations de ce genre peuvent être menées par la suite.

A l'avenir, il faudra veiller à tester des systèmes qui permettent une plus longue durée de travail afin d'offrir les meilleurs résultats possibles.

Il faudra aussi prendre en compte des phénomènes entourant la manipulation de l'appareil. Dans cette expérimentation, nous aurions dû mesurer les énergies mises en jeu lors du mouvement de marche sur tapis en tenant l'appareil car il semble qu'il apporte un inconfort qui biaise les mesures lors du rechargement.

5. ANALYSE DE LA PARTIE MECANIQUE.

La poulie nous permet de connaître grâce à des masses connues, le poids (P=M.g) nécessaire qui permet d'enrouler le ressort à chaque instant. Nous avons relevé tous les 5 tours, la masse mise en jeu qui permet de trouver l'équilibre entre bobinage et rembobinage. Nous constatons que la force donc le couple à fournir pour remonter le ressort n'est pas constant sur l'ensemble du bobinage, la caractéristique non linéaire Force en fonction du nombre de tours est donnée figure 10.

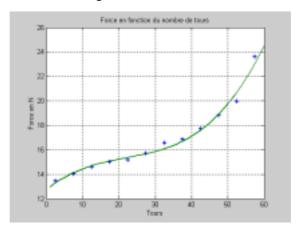


figure 10 : force en fonction du nombre de tours (bobinage du ressort)

La figure 11 montre la courbe de l'effort et de l'énergie stockée dans le ressort (obtenue par intégration de $C.d\theta$). On remarque que le couple varie (augmente) sensiblement pendant le remontage.

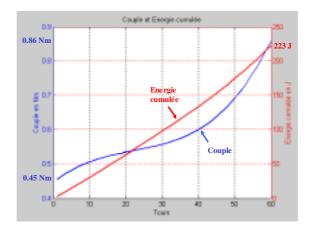


figure 11 : couple et énergie cumulée dans le ressort (bobinage) en fonction du nombre de tours

L'énergie du dispositif atteint 223 J en 60 trs de remontage. L'énergie massique du ressort vaut 0.17 Wh/kg.

Pour avoir l'équivalent de l'énergie stockée, il faudrait sous une tension de 3V, un (super)condensateur de capacité de 50 F que l'on amènerait en décharge complète.

A une vitesse de remontage de 1 tr.s $^{-1}$, la puissance mécanique $P=C.\Omega$ en début et fin de remontage vaut :

$$P_{début}$$
=2.8 W et P_{fin} =5.4 W

Le couple fourni lors du déroulement peut s'exprimer en fonction du nombre de tours n_{tr} par :

$$C_{ressort_d\acute{e}roulement}(n_{tr}) = C_{ressort_remontage}(n_{trf} - n_{tr})$$

6. ANALYSE DE LA CONVERSION ENERGIE MECANIQUE-ENERGIE ELECTRIQUE (DEROULEMENT DU RESSORT).

6.1. Génératrice à collecteur seul.

Il s'agit d'une machine à collecteur à aimants Mabuchi Motor de type RF 370C 2217. Les essais expérimentaux réalisés nous ont permis de déterminer ses caractéristiques (figure 10) :

- Résistance de la génératrice à courant continu : $R_{mcc} = 2.3\Omega$
- Constante de couple et de force contre électromotrice de la génératrice : $k = 95.10^{-4} \text{ V.s.rad}^{-1}$.

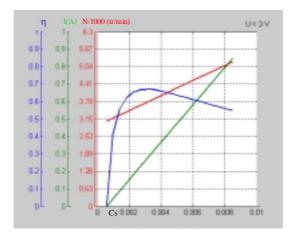


figure 12 : Rendement, Courant et Vitesse de la génératrice en fonction du Couple pour U=3V

Ces caractéristiques nous permettront de déduire les points de fonctionnement de la génératrice lors du déroulement du ressort (figure 15).

6.2. Génératrice entraînée par le déroulement du ressort.

Le déroulement du ressort, à travers le multiplicateur, donne une attaque en couple de la génératrice à aimants.

La figure 13montre les tensions aux bornes de la génératrice et de la batterie ainsi que le courant fourni par la génératrice égal à celui absorbé par la batterie (radio éteinte).

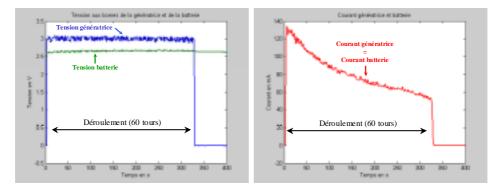


figure 13 : tensions et courants génératrice à collecteur-batterie

Le tableau 1 résume les valeurs des tensions et courants au début et fin de déroulement :

tableau 1 : Relevé des grandeurs lors du déroulement

	Ugene (V)	Igene (mA)	Ubat (V)	Ibat (mA)
Début déroulement	2.97	134	2.59	134
Fin déroulement	2.99	53	2.66	53

La chute de tension observée, entre la tension génératrice et la tension batterie, s'explique par l'analyse du schéma électronique de l'alimentation audio et de la recharge de la batterie (figure 14).

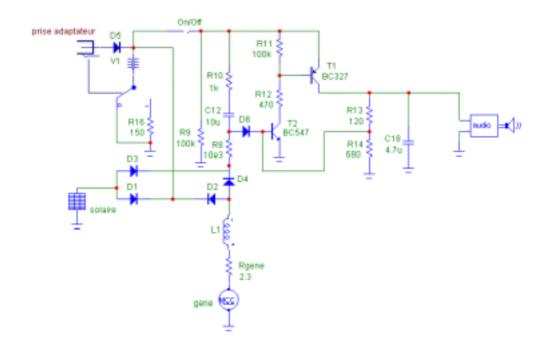


figure 14 : Schéma de l'électronique de l'alimentation de l'audio et recharge de la batterie.

La batterie est directement (absence de régulation) chargée par l'intermédiaire de la diode D2 (1N4148) qui provoque une chute de tension de l'ordre de 0.4 V.

La self L1en série avec la génératrice permet de filtrer le courant fourni par celle ci.

Les transistors T1 et T2 servent à couper l'alimentation de la partie Radio Fréquence lorsque la tension batterie descend en dessous d'une certaine valeur. Lorsque le potentiel aux bornes de R14 est insuffisant, T2 se bloque, bloquant à son tour T1. Le circuit audio n'est plus alimenté, donc plus de son, et plus de décharge de la batterie.

A la fermeture de l'interrupteur ON/OFF, T2 est mis en conduction par R12-C12-D6. T1 conduit alors et si la tension batterie est suffisante, maintient la conduction de T2.

Connaissant la tension et le courant aux bornes de la génératrice et ayant déterminé les courbes caractéristiques de fonctionnement de la génératrice, on en déduit le lieu des points de fonctionnement (figure 15) lors du déroulement, ainsi que les résultats du tableau 2.

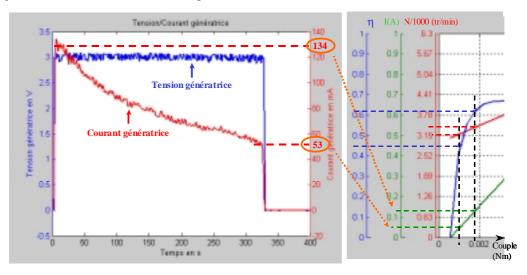


figure 15 : Détermination des caractéristiques de fonctionnement de la génératrice

tableau 2 : Points de fonctionnement de la génératrice

	Ugene (V)	Igene (mA)	Cgene (mN.m)	Ngene (tr/min)	ηgene (%)
Début déroulement	2.97	134	1.8	3399	62
Fin déroulement	2.99	53	1.1	3194	45

On remarque que la génératrice ne travaille pas à son point de rendement maximum. En outre, l'accumulateur reçoit un courant relativement modéré eu égard à sa capacité (environ $1/10^{\text{ème}}$ à $2/10^{\text{ème}}$ de sa capacité).

Connaissant le couple fourni au ressort ramené à la génératrice C'_{ressort} et le couple fourni à la génératrice, on en déduit le couple de pertes dans le train d'engrenage (tableau 3) :

tableau 3 : Bilan des couples mécaniques

	C'ressort (mN.m)	Cgene (mN.m)	Cpertes (mN.m)
Début rembobinage	2.6	1.8	0.8
Fin Rembobinage	1.3	1.1	0.2

L'énergie maximale que peut stocker la batterie est de l'ordre de 5200 J (E=C.U_{bat}) soit 24 remontages du ressort sachant qu'un remontage complet prend environ 1 minute, le déroulement du ressort met environ 6 minutes et que 60 tours de manivelle offrent environ un quart d'heure d'écoute !L'énergie restituée par la génératrice et l'énergie stockée dans la batterie n'est pas identique (figure 16), la différence est perdue dans le circuit électronique, principalement dans la diode. Le rendement énergétique électrique est donc de 88 %.

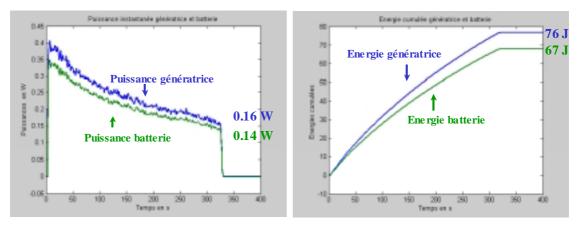


figure 16 : Puissances instantanées et énergies

7. BILAN ENERGETIQUE GLOBAL ET CONCLUSION.

De ces différents essais, nous en déduisons le rendement approximatif de la partie conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique de la radio (figure 17).

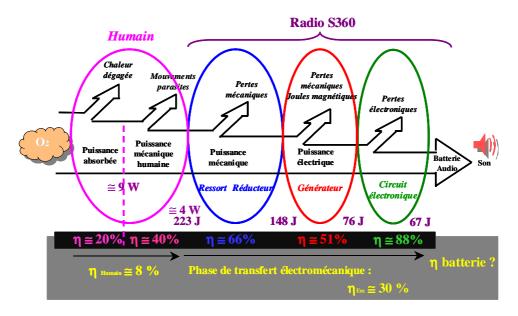


figure 17 : bilan énergétique global de la radio Freeplay

Notons les avantages d'un système à ressort :

- il permet d'emmagasiner l'énergie avec une puissance plus élevée que celle de décharge (rapport 6 environ en considérant un remontage à 1 tr/s), ce qui permet de réduire le dimensionnement en puissance du système électrique ;
- il encaisse d'éventuels sauts de puissance dus à la manipulation;
- l'accumulateur reçoit une puissance relativement faible, plus favorable à sa durée de vie.

Mais une rupture de la manivelle lors d'un remontage rapide a montré que la fiabilité n'était pas excellente (bien que le ressort ne soit pas en cause). Et nous pouvons considérer que le rendement de la chaîne de conversion électromécanique de 30% est très faible. On peut alors s'interroger sur l'utilité d'un ressort lourd, encombrant et bruyant s'il s'agit de stocker l'énergie dans un accumulateur, avant son utilisation. Il est donc nécessaire de rechercher de meilleures architectures de générateurs électromécaniques, associés aux mouvements considérés afin d'optimiser l'aspect ergonomie-conversion d'énergie.

Une structure mécanique plus simple permettrait un gain de rendement et de poids. On peut ainsi envisager une structure voisine, éventuellement plus rapide au niveau de la génératrice (afin de ne pas augmenter la masse) et avec un convertisseur sensiblement amélioré entre cette dernière et l'accumulateur. On peut également envisager, à condition de concevoir un générateur spécial, une génération directe (sans multiplication mécanique de la vitesse) avec, là aussi, un convertisseur électronique plus évolué. Dans ce dernier cas, il est nécessaire de concevoir une génératrice à haut rendement malgré une très basse vitesse (60 tr/mn) et un couple relativement élevé (0,8 N.m).

En tout cas, il ne semble pas envisageable de recharger à une puissance plus élevée pour des raisons de fatigue musculaire.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[TURRI_02B] TURRI S., MULTON B., BEN AHMED H., MILLER D., MULTON F., DELAMARCHE P.

Caractérisation d'un générateur portable : de l'énergie humaine à l'électricité. Colloque GEVIQ'2002, Marseille 12-13 juin 2002, page 11-16.

- PARTIE D -

PREDIMENSIONNEMENT D'UNE MAQUETTE DE GENERATEUR FONCTIONNANT A PARTIR DE LA MARCHE

1. CARACTERISATION DES MOUVEMENTS A LA HANCHE DURANT LA MARCHE.

Si l'on considère le buste en 3 dimensions (figure 1), délimité par des marqueurs infrarouges (cf partie C), on peut relever les mouvements selon les trois composantes x,y etz.

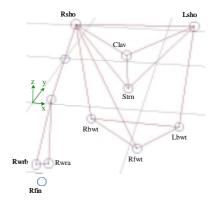


figure 1 : positions des marqueurs sur la partie supérieure du corps pour la mesure des composantes du mouvement pendant la marche

Le mouvement selon la composante z (mouvements verticaux) est le plus significatif (figure 2) lorsqu'un individu marche et c'est d'abord sur cette composante que nous envisageons une conversion électromécanique d'énergie. Notons qu'il existe une composante intéressante en y lors d'une marche rapide.

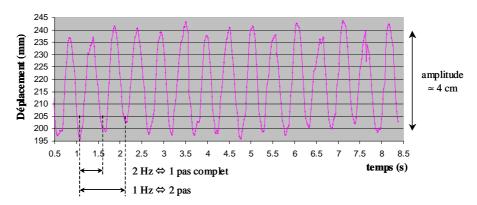


figure 2 : mouvements verticaux (composante z) au niveau de la hanche droite lors de la marche à 5 km/h

On peut considérer les mouvements verticaux de la hanche comme une source de mouvement sinusoïdale telle que :

$$h(t) = X_M.cos(\omega_{pas}.t)$$
 avec $X_M=2.10^{-2} \text{ m}$ et $f_{pas}=2 \text{ Hz}$

Plusieurs générateurs électromécaniques sont envisageables en fonction du type de mouvement exploité :

- translation (sur la composante z)
- rotation (permettrait d'exploiter mieux les 2 composantes y et z),

- ...

C'est la première solution que nous envisageons car, bien qu'elle pose plus de difficultés sur le plan des performances, elle nous semble avoir deux avantages en termes de fiabilité (entraînement direct permettant la

suppression d'une mécanique complexe) et scientifique (conception d'un générateur de structure originale bien adaptée à cette application).

2. PREDETERMINATION D'UN GENERATEUR LINEAIRE.

En ce qui concerne le système complet, plusieurs questions de base se posent :

- Le système doit-il accumuler l'énergie ou le transférer directement à un appareil portable ?;
- Quel sera la forme et l'encombrement du boîtier ?

La première peut être reportée car elle peut, dans un premier temps, être découplée de la génération d'énergie proprement dite. Dans tous les cas, nous considérerons que le générateur (parties électromécanique et électronique de puissance) débitera sur une source de tension modérément variable du type accumulateur électrochimique.

Pour la seconde, on choisira arbitrairement un boîtier parallélépipède contenant une masse libre en translation et dont on récupère une partie de l'énergie obtenue lors de la marche.

2.1. Structure mécanique proposée.

On considère un boîtier solidaire du corps humain (figure 3), placé au niveau de la hanche. Une masselotte, supportant la partie mobile du générateur électromécanique, se déplace verticalement entre deux ressorts sous l'action du déplacement du boîtier et peut ainsi entrer en résonance avec le mouvement.

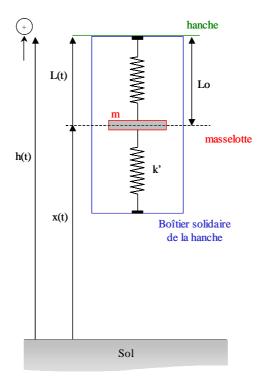


figure 3 : générateur linéaire

Ce schéma élémentaire permet une approche mécanique simplifiée du dispositif soumis à des déplacements verticaux. Par commodité, nous avons représenté une masselotte extra-plate sachant qu'elle sera, en réalité, parallélépipédique.

2.1.1. Mise en équations mécaniques.

Nous ne considérons donc qu'une seule dimension à la fois pour l'excitation et pour le mouvement de la masselotte. Les forces qui s'exercent sur la masselotte sont :

- son poids : P = -m.g
- traction ou répulsion des ressorts : si la longueur du ressort supérieur diminue, il repousse la masselotte vers la bas, et réciproquement : $F_R = k.(L-Lo)$ avec k=2.k'.
- une force qui correspond au transfert d'énergie et à la charge électrique, que l'on peut traduire, en toute première approximation, par un frottement visqueux. Si la longueur du ressort supérieur diminue, sa dérivée est négative et la force est bien vers le bas et réciproquement donc : $F = \lambda . \frac{dL}{dt}$

On peut écrire l'équation fondamentale de la dynamique :

$$\sum F = m.\ddot{x}$$

$$m.\ddot{x} = -m.g + k.(L - Lo) + \lambda.\dot{L}$$

avec

$$x(t) = h(t) - L(t)$$

soit finalement:

$$m.\ddot{L} = m.\ddot{h} - m.g - \lambda.\dot{L} - k.L + Lo$$

En posant
$$L_1(t) = L(t) - Lo - \frac{m}{k}.g$$
, on peut écrire finalement : $m.\ddot{L_1} = m.\ddot{h} - \lambda.\dot{L_1} - k.L_1$

2.1.2. Equations électriques.

Afin de récupérer le maximum de puissance, nous cherchons à accorder la résonance du système sur la fréquence d'excitation (fréquence de la marche) soit $\omega_{res} = \sqrt{\frac{k}{m}}$.

Si l'on considère une masselotte de 50 g, le coefficient de raideur du ressort à la résonance vaut :

$$k_{res} = (2.\pi.2)^2.50.10^{-3} \quad \text{ soit } \quad k_{res} = 7.89 \text{ N/m}$$

$$F = \lambda \dot{L}(t)$$

$$P = F.v$$
 soit $P(t) = \lambda \left[\dot{L}(t) \right]^2$

Pour une longueur de boîtier de 8 cm, on obtient les courbes $P(\lambda)$ paramétrées en k, obtenues par simulation (figure 4) :

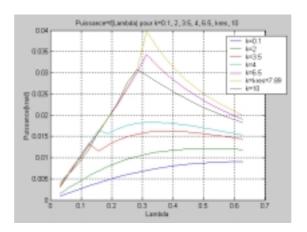


figure 4 : Puissance moyenne paramétrée en k en fonction de λ

Le but est de chercher à avoir k et λ pour maximiser la puissance récupérée.

Compte tenue de la structure proposée ci dessus (boîtier de 8 cm de long, masselotte de 50 g) et en considérant une amplitude des mouvements verticaux de la hanche de 2 cm à 2 Hz, la figure 4, nous permet d'observer que le maximum de puissance change selon les constantes de raideur des ressorts et lambda. Nous pouvons donc récupérer une puissance maximale de 40 mW en régime permanent.

Les travaux, qui seront menés dans la suite de ce travail, concernent la recherche de l'influence des différents paramètres de conception de ce système notamment :

- l'amplitude du mouvement de la masselotte à l'intérieur du boîtier ;
- la masse de la masselotte.

Cela permettra d'évaluer la puissance maximale récupérable à partir d'un objet de masse et d'encombrement donnés...

2.2. Structure électromagnétique proposée.

Diverses architectures de générateur linéaires sont envisageables, nous avons retenu dans un premier temps celle de la figure 5, car elle permet d'éviter d'avoir des contacts mobiles (les bobinages sont fixes) et d'éliminer les efforts de détente (aucune encoche) qui pourraient nuire à l'excitation du système. Mais il faudra pousser les travaux de recherche pour optimiser ce choix car cette architecture, si elle élimine quelques inconvénients, en présente d'autres comme un bobinage de grande longueur, donc plus résistif.

En outre, il est indispensable de considérer l'association avec un convertisseur électronique pour étudier et optimiser le comportement de l'ensemble. Une attention particulière devra être portée à l'électronique de contrôle dont la consommation devra rester extrêmement faible de façon à ne consommer qu'une faible part de l'énergie produite.

aimants = masselotte

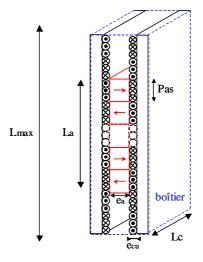


figure 5 : générateur linéaire à aimants permanents

3. CONCLUSIONS.

Cette étude a permis de montrer qu'il était envisageable, en prélevant une infime partie de l'énergie de la marche, de produire une quantité suffisante d'énergie électrique pour faire fonctionner ou recharger des dispositifs électroniques portatifs tels que les téléphones mobiles.

Après la présentation de cet avant-projet d'un générateur linéaire fonctionnant sur le principe de récupération d'énergie de la marche, nous allons surtout citer les perspectives :

- Coupler les simulations du système complet avec des dispositifs de conversion innovants pour rechercher une solution optimale qui satisfera au mieux à cette application (nous envisageons l'alimentation d'un téléphone mobile)
- Choisir et modéliser et optimiser un générateur électromécanique associé à son électronique de conversion ;
- Rechercher à récupérer l'optimum de puissance par une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) basse consommation ;