



MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION
NATIONALE

EAE PHC 2

SESSION 2018

AGRÉGATION CONCOURS EXTERNE

Section : PHYSIQUE-CHIMIE
Option : CHIMIE

COMPOSITION DE PHYSIQUE

Durée : 5 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : *La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.*

Tournez la page S.V.P.

A

I N F O R M A T I O N A U X C A N D I D A T S

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1500B	102	0385

Récupération d'énergie dans l'environnement humain

« La récupération d'énergie dans l'environnement et sa conversion en électricité a pour vocation d'alimenter des appareils électroniques portables ou fixes, pouvant être communicants, dans un souci de les rendre autonomes énergétiquement. Les puissances mises en jeu dans ce cas sont faibles, de l'ordre du microwatt au watt. Cette auto-alimentation est d'autant plus envisageable que les nouvelles technologies électroniques disponibles sont de plus en plus sobres en énergie. À cela s'ajoutent les progrès réalisés sur les dispositifs de stockage qui sont en outre nécessaires pour suppléer les intermittences ainsi que l'inadéquation production-consommation. Dans un contexte d'alimentation par pile ou par le réseau, l'objectif de la récupération d'énergie ambiante est d'être moins contraignante et moins coûteuse en investissement et en fonctionnement.¹

Cependant, il n'existe pas, dans ce domaine, de solution unique capable de s'adapter à tous les environnements caractérisés par les ressources énergétiques disponibles, mais autant de solutions que d'environnements différents. L'énergie récupérée peut en fait provenir de diverses ressources telles que mécaniques (vibratoires, mouvements...), thermiques (êtres vivants, machines...), photovoltaïques (lumière solaire ou artificielle) et électromagnétiques hautes fréquences (ondes ambiantes ou dédiées)...». Extrait de [1].

Dans ce sujet, l'ordre de grandeur de ressources énergétiques ambiantes est évalué en partie 1. La récupération d'énergie ambiante dans l'environnement humain est ensuite étudiée à travers deux systèmes : un dispositif de récupération de l'énergie mécanique de la marche (partie 2) et un dispositif de récupération de l'énergie échangée par transferts thermiques entre le corps humain et l'air ambiant (partie 3). L'énergie ainsi récupérée peut permettre par exemple d'alimenter :

- des capteurs de surveillance de paramètres physiologiques (température, rythme cardiaque, sudation, taux d'oxygène, taux de sucre dans le sang, ...)
- des dispositifs implantés dans le corps humain comme un pacemaker ;
- un système de communication entre des capteurs implantés sur le corps humain et une station de base de surveillance connectée au réseau électrique. La partie 4 étudie un dispositif de communication radiofréquence (Radio Frequency Identification ou RFID) que l'alimentation autonome permet de rendre plus performant.

- Table des matières

Documents	2
Partie 1. Évaluation de quelques ressources en énergie dans l'environnement humain.....	5
Partie 2. Récupération de l'énergie de la marche	6
Partie 3. Récupération de la puissance thermique émise par le corps humain.....	10
Partie 4. Dispositifs de communication RFID	20
Bibliographie.....	24

¹ Cela permet aussi de limiter le nombre de batteries ou piles communément utilisées qui sont des éléments polluants pour l'environnement

Documents

Données numériques

Constante de Stefan-Boltzmann

$$\sigma = 5,6780 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

Distance Terre-Soleil

$$d_{TS} = 149,6 \cdot 10^6 \text{ km}$$

Rayon du Soleil

$$R_s = 695700 \text{ km}$$

Permittivité diélectrique du vide

$$\epsilon_0 = 8,85418782 \times 10^{-12} \text{ m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$$

Perméabilité magnétique du vide

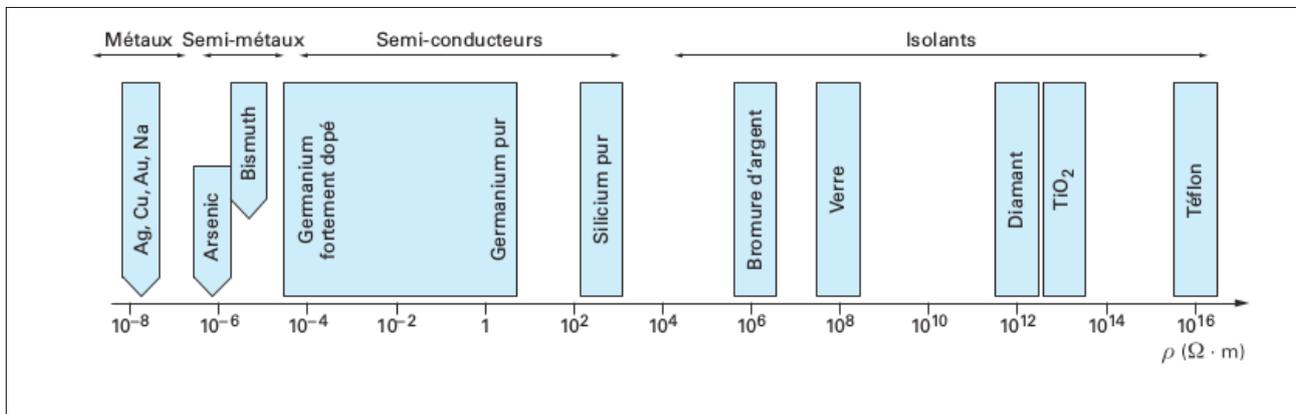
$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$$

Célérité de la lumière

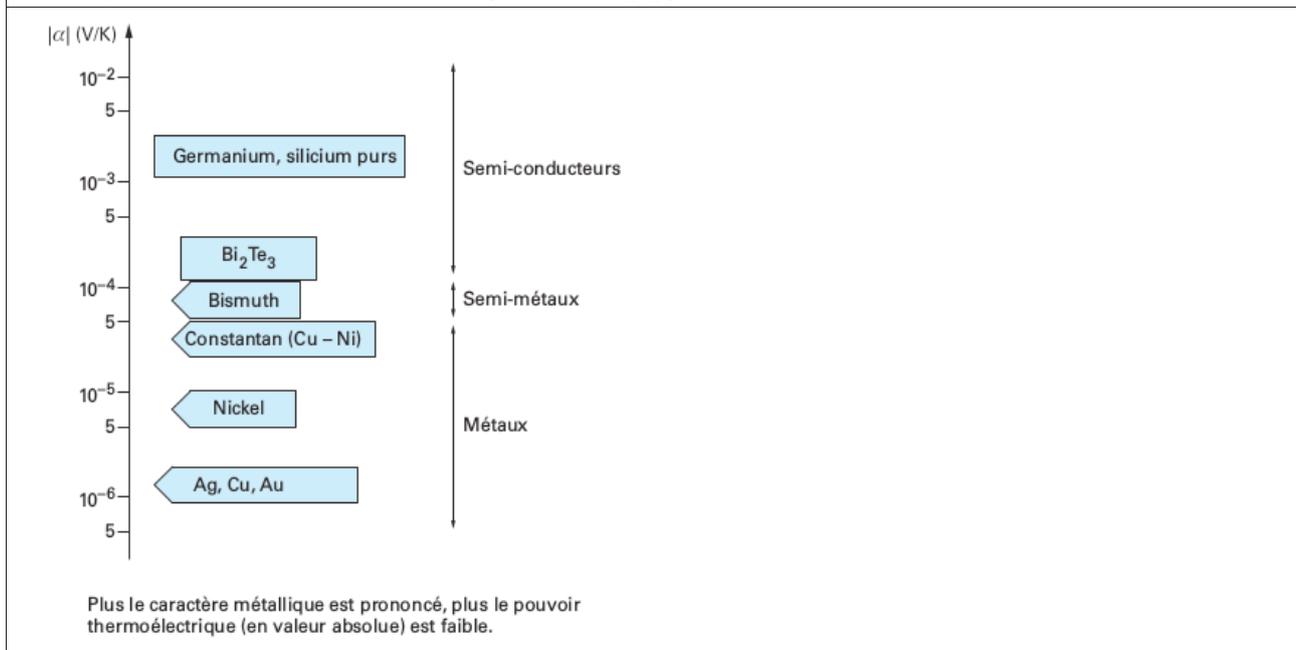
$$c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Document 1 : données expérimentales

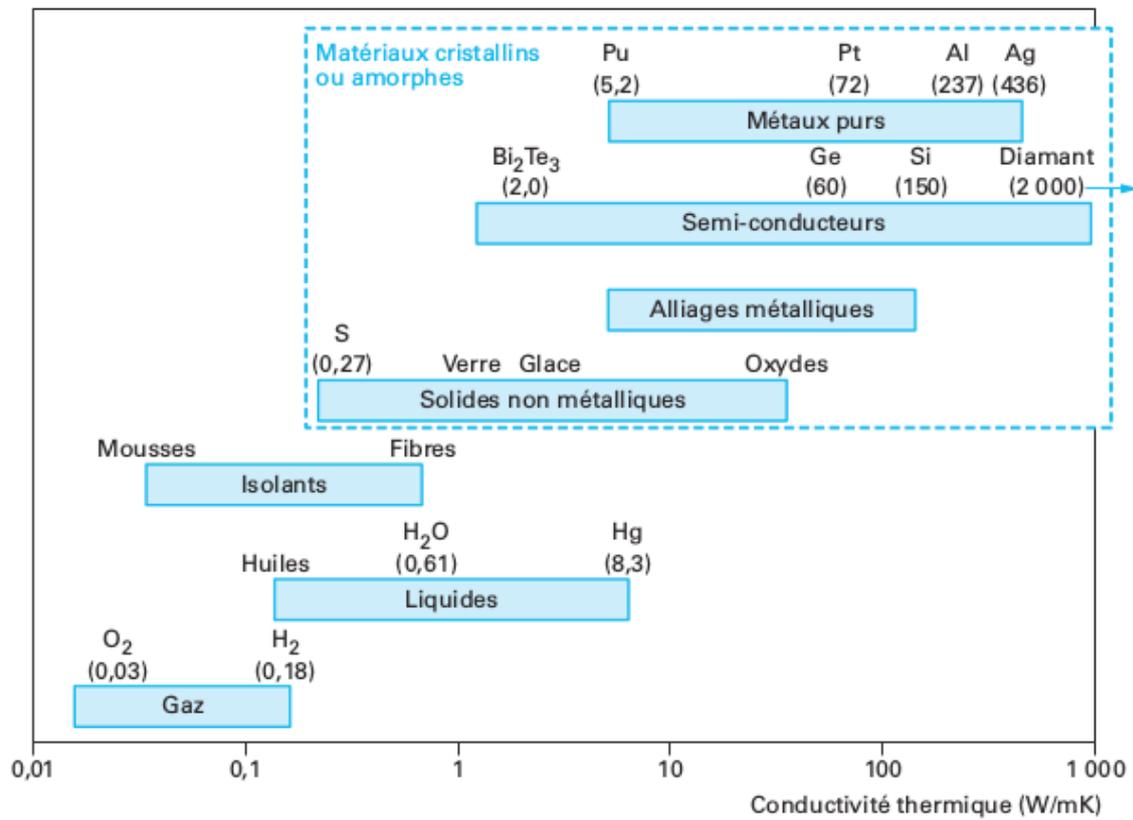
Résistivité électrique, conductivité thermique et pouvoir thermoélectrique de quelques matériaux.



Résistivité électrique à température ambiante de quelques matériaux appartenant à la classe des métaux, semi-conducteurs et isolants (extrait de [2]).



Ordre de grandeur du pouvoir thermoélectrique de quelques matériaux à température ambiante (extrait de [2]).

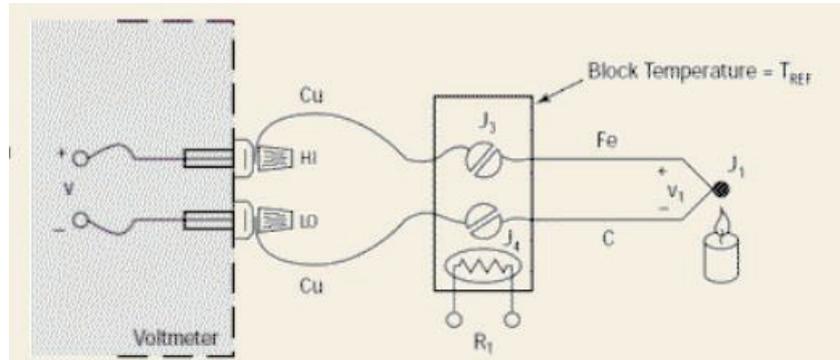


Pour les matériaux cristallins ou amorphes, la conductivité thermique s'étend sur quatre ordres de grandeur

Conductivité thermique typique de matériaux se présentant sous diverses formes à température ambiante (extrait de [2]).

Document 2 : mesure de température par thermocouple (Extrait de [3])

Le montage représenté ci-dessous illustre le principe de la mesure de température à l'aide d'un thermocouple avec jonction de référence (ou jonction froide). La relation $V = \alpha(T_{J_1} - T_{REF})$ est vérifiée.



Les étapes de la mesure sont les suivantes :

1. Mesure de la valeur de la température T_{REF} .
2. Mesure de la tension V pour déterminer la température T_{J_1} .

Pourquoi alors utiliser un thermocouple qui nécessite la mesure d'une température de référence par un autre dispositif (une RTD (Resistor Température Detector), une thermistance ou un capteur intégré) ? En fait, les thermistances, sondes de platine ou circuits intégrés ont des plages de mesure de température limitées alors que celles des thermocouples sont très étendues. Les thermocouples sont utilisés dans des atmosphères explosives ou nocives et peuvent, par ailleurs, être fixés sur le métal dont on veut mesurer la température.

Partie 1. Évaluation de quelques ressources en énergie dans l'environnement humain

Cette partie propose de comparer, en ordre de grandeur, les apports potentiels des différentes ressources énergétiques ambiantes dans l'environnement humain.

<u>Les ressources mécaniques</u>	<u>Les ressources thermiques</u>
<p>Les ressources mécaniques peuvent provenir des mouvements du corps humain, naturels ou volontaires, mais également de vibrations ambiantes dues aux machines environnantes ou aux bruits acoustiques.</p> <ul style="list-style-type: none">- On peut par exemple estimer l'ordre de grandeur de la puissance mécanique que peut fournir en « tâche de fond » un être humain adulte en considérant qu'il transporte une charge de 3 kg sur 1000 m de dénivelé en 3 h.- Dans le cas des bruits acoustiques, le niveau sonore maximal de 100 dB permet d'estimer le flux surfacique énergétique. Le seuil d'audibilité, I_0, est égal à $1,0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$.	<p>La température interne du corps humain est régulée à environ $T_H = 36^\circ\text{C}$. Ainsi, si la température de l'air ambiant est plus faible, un flux thermique se crée de la source chaude vers l'air extérieur ambiant tel que la puissance surfacique échangée est $P_S = h(T_H - T_a)$.</p> <p>Le coefficient h est un coefficient d'échange thermique estimé à $8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.</p>

Les ressources électromagnétiques

La lumière

La principale source d'énergie ambiante est le rayonnement solaire. La température, T_S , de la surface du Soleil est de $5,77 \times 10^3 \text{ K}$. On suppose que le soleil se comporte comme un corps noir.

Les rayonnements hyperfréquences

Les dispositifs de communication sans fil (téléphones portables, wifi...) communiquent par l'intermédiaire d'un champ électromagnétique haute-fréquence (entre 80 MHz et 19 GHz).

Afin de limiter l'échauffement potentiel du corps humain lors d'une exposition à un champ haute fréquence, des normes de l'OMS fixent la valeur maximale du champ électrique entre 28 et $61 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ selon la fréquence.

1. Évaluer et comparer les puissances surfaciques, potentiellement disponibles, des différentes ressources énergétiques présentées ci-dessus. Les modèles utilisés sont à préciser et la surface corporelle, S , est estimée à $2,5 \text{ m}^2$.

Partie 2. Récupération de l'énergie de la marche

Lorsqu'une personne marche, le mouvement de la hanche suivant la composante verticale (figure 1) peut être considéré comme une source d'énergie mécanique. Le système mécanique permettant la récupération de l'énergie est constitué d'un boîtier rendu solidaire du corps humain par une ceinture fixée autour de la taille. À l'intérieur du boîtier se déplace une masselotte de masse m qui peut entrer en résonance avec le mouvement de la hanche. Un tel dispositif peut aussi se placer dans un sac à dos.

Un prototype a été conçu avec une masse mobile $m = 25\text{ g}$ qui se déplace de quelques centimètres [4].

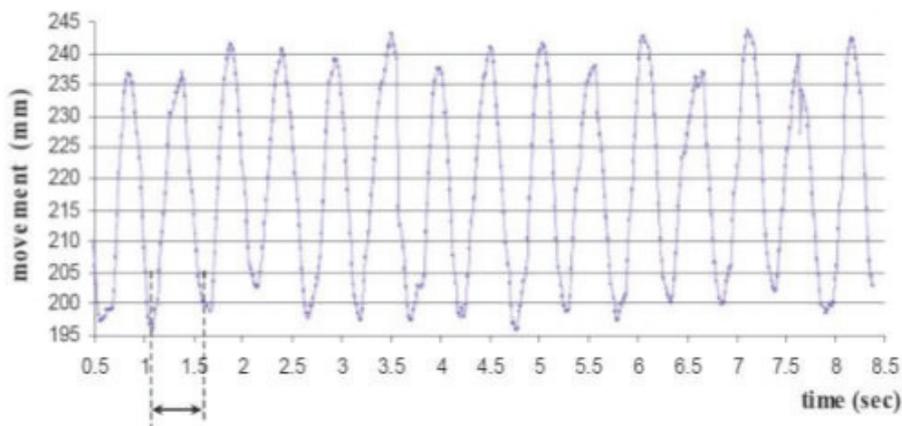


Figure 1 : mouvement de la hanche lors d'une marche à 5 km/h (d'après [4]).

2. Qu'est-ce qu'une résonance ? Donner quelques exemples de systèmes pouvant entrer en résonance dans différents domaines de la physique.
3. Caractériser le mouvement de la hanche supposé sinusoïdal suivant la composante verticale.

Toutes les structures résonantes de récupération d'énergie vibratoire peuvent être modélisées de la façon suivante : un objet mobile M de masse m est maintenu dans un boîtier par un ressort de constante de raideur k (figure 2). Les vibrations du milieu ambiant, donc du boîtier, d'amplitude $y(t)$, induisent un déplacement relatif $z(t)$ de l'objet M par rapport au boîtier. Si \vec{v} est la vitesse de l'objet dans le référentiel du boîtier, son mouvement est amorti par une force de frottement $\vec{f} = -(d_m + d_e)\vec{v}$.

L'amortissement a deux composantes :

- une partie de l'énergie cinétique de la masse mobile est perdue du fait d'amortissements mécaniques (par exemple liés aux frottements dans l'air) caractérisés par le coefficient d_m ;
- l'autre partie est convertie en électricité et caractérisée par le coefficient d'amortissement d_e .

On note d le coefficient d'amortissement total tel que : $\vec{f} = -d\vec{v}$.

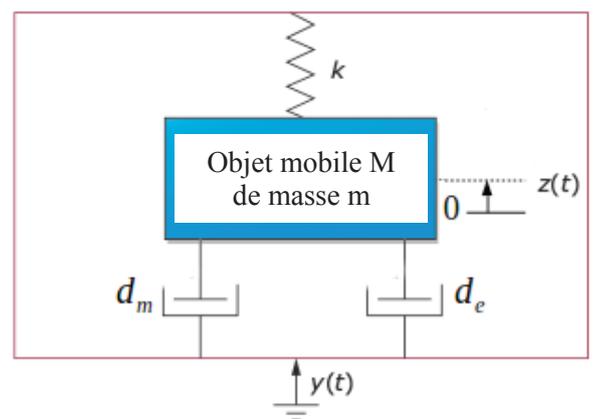


Figure 2 : modélisation de structures résonantes pour la récupération d'énergie mécanique (d'après [5]).

Cette structure de type masse-ressort permet de tirer parti d'un phénomène de résonance afin d'amplifier l'amplitude des vibrations du milieu ambiant perçues par la masse mobile.²

Au boîtier est associé le référentiel R de centre O (position de repos du barycentre de l'objet en l'absence de vibrations) et d'axe vertical ascendant \vec{u}_z . Le mouvement de l'objet M est uniquement vertical dans le référentiel R. Il est repéré par son déplacement relatif $z(t) = l_{eq} - l(t)$ où $l(t)$ est la longueur du ressort à l'instant t et l_{eq} sa longueur à l'équilibre en l'absence de vibration.

On suppose que :

- le boîtier est soumis à une vibration extérieure verticale et sinusoïdale d'amplitude $y(t) = Y\cos(\omega t)$;
- le référentiel terrestre est galiléen ;
- la personne se déplace avec une vitesse horizontale constante \vec{v}_{marche} .

On note respectivement k et l_0 la constante de raideur et la longueur à vide du ressort.

4. Préciser la nature du référentiel du boîtier dans lequel l'étude sera réalisée.
5. Déterminer l'équation du mouvement de la masse, caractérisé par son déplacement relatif $z(t)$ dans le référentiel du boîtier, en précisant bien les étapes du raisonnement.
6. En déduire, en justifiant toutes les étapes de la démarche, le déplacement relatif de la masse $z(t) = Z(\omega)\cos(\omega t + \varphi(\omega))$ en régime forcé du fait de l'excitation sinusoïdale de la marche. On introduira $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ et on utilisera le formalisme complexe qui associe à une grandeur réelle $g(t) = G_0\cos(\omega t + \varphi)$ la grandeur complexe $\underline{g}(t) = G_0 \exp(i(\omega t + \varphi))$.
7. Que représente physiquement ω_0 ?
8. Déterminer la puissance électrique moyenne récupérable $P_e(\omega)$.
9. On admet que la puissance électrique récupérable est maximale pour une pulsation d'excitation $\omega = \omega_0$. Montrer alors que la puissance électrique maximale P_{max} s'exprime par la relation : $P_{max} = \frac{m^2 d_e Y^2 \omega^4}{2d^2} = mY\omega^3 \frac{Z_{max} d_e}{2d}$ avec Z_{max} l'amplitude maximale du mouvement de la masse lorsque $\omega = \omega_0$.
10. Estimer l'ordre de grandeur de la puissance moyenne maximale récupérable pour un boîtier accroché à la hanche d'un marcheur qui progresse à 5 km.h^{-1} (figure 1) sachant que l'amplitude maximale du mouvement de la masse vaut $Z_{max} = 3 \text{ cm}$. Préciser les hypothèses réalisées et les conditions selon lesquelles cette puissance moyenne maximale pourrait être obtenue.

² L'inconvénient majeur de ces systèmes résonants est qu'ils sont bien adaptés uniquement si la fréquence d'excitation est quasi-constante, ce qui n'est pas toujours le cas.

L'amortisseur, caractérisé par son coefficient d'amortissement d_e convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Il existe trois principes de conversion électromécanique mais pour les systèmes avec un déplacement important de l'objet résonant (de l'ordre du centimètre) sont principalement utilisés des convertisseurs comme celui présenté sur la figure 3.

11. À partir du schéma présenté sur la figure 3, expliquer précisément à des étudiants, sans calcul, pourquoi ce convertisseur permet de convertir de l'énergie mécanique en énergie électrique. Énoncer la loi physique mise en jeu dans cette conversion.

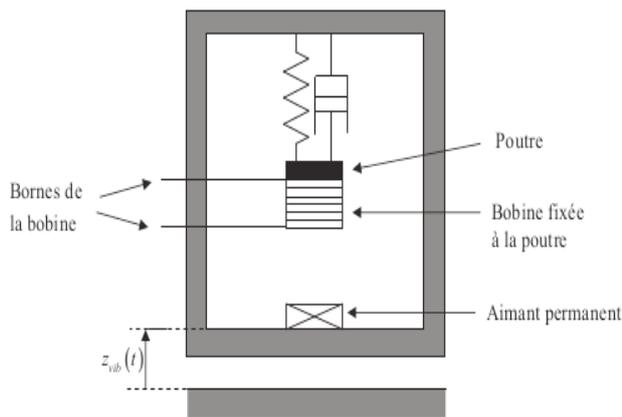


Figure 3 : schéma de principe d'un convertisseur électromagnétique (extrait de [6]).

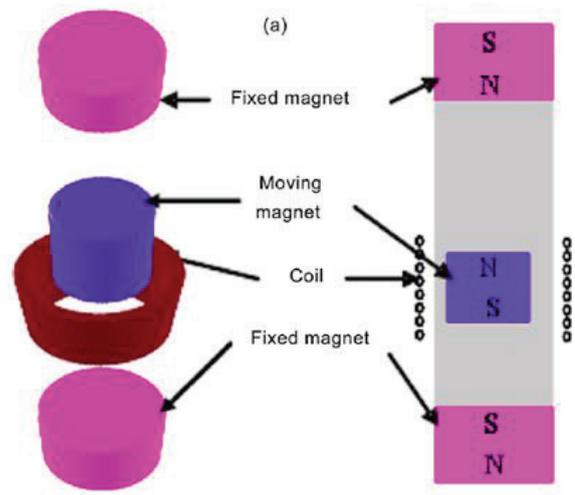


Figure 4 : autre convertisseur électromagnétique (extrait de [7]).

12. Un tel convertisseur représenté sur la figure 4 a déjà été conçu. Il récupère une puissance finale P_{fin} de $0,2 \text{ mW}$. Déterminer le rendement de ce dispositif. Quelles peuvent être les causes des pertes de puissance ?

Principe de fonctionnement d'un générateur électrostatique

Il existe aussi des dispositifs de récupération d'énergie mécanique lors de la marche humaine qui se placent au niveau du genou et exploitent les mouvements de son articulation. De faible épaisseur, ces convertisseurs insérés dans des genouillères font partie de la famille des générateurs électrostatiques. Ces systèmes de récupération d'énergie sont des condensateurs dont l'une des armatures se déplace par rapport à l'autre grâce aux vibrations du milieu ambiant, ce qui fait varier leurs capacités et permet ainsi une conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. La pliure du genou est à l'origine d'une variation de la distance entre les armatures selon un cycle représenté sur la figure 5.

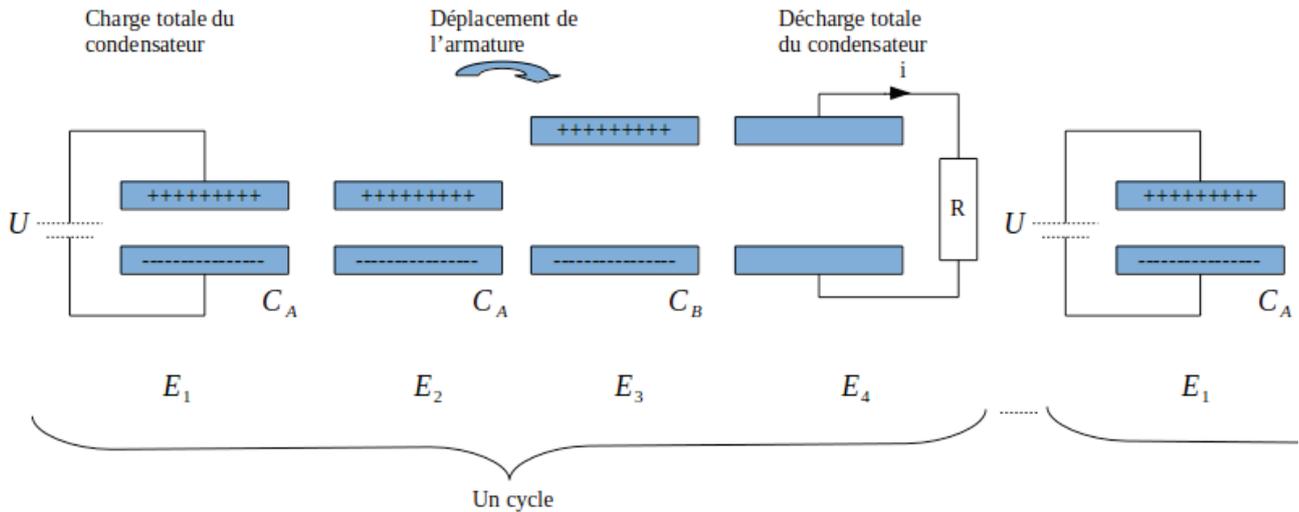


Figure 5 : cycle à charge constante. R modélise la charge de conversion et de stockage.

Un dispositif de ce type a été réalisé avec des polymères électro-actifs comme diélectrique inter-armatures [8] :

- la capacité totale de la structure varie entre 1,9 nF et 4,1 nF ;
- la tension de polarisation est de 170 V.

On rappelle que la capacité C d'un condensateur plan s'écrit $C = \frac{\epsilon_0 S}{e}$ avec e la distance interarmature et S la surface des armatures en regard.

- Décrire qualitativement l'évolution de la tension aux bornes du condensateur au cours d'un cycle.
- Estimer l'ordre de grandeur de la puissance effectivement récupérée par le dispositif présenté ci-dessus lors d'un mouvement de marche.
Dans le cadre de cette résolution de problème, prendre soin d'explicitier la démarche, même si le raisonnement n'aboutit pas.
- Comment choisir la résistance R de la charge pour que la décharge du condensateur soit complète et ainsi récupérer le maximum d'énergie ?
- D'autres convertisseurs utilisent le phénomène de piézoélectricité. Expliquer en quoi le phénomène de piézoélectricité permet de réaliser la conversion souhaitée.

Partie 3. Récupération de la puissance thermique émise par le corps humain

« La thermoélectricité a été découverte puis modélisée au cours du XIX^{ème} siècle grâce aux travaux de Thomas Seebeck, Jean-Charles Peltier ou encore Lord Kelvin. L'effet thermoélectrique est un phénomène physique présent dans certains matériaux où :

- un transfert thermique est associé au courant électrique les traversant ;
- une différence de potentiel peut apparaître si le matériau est soumis à un gradient de température.

Cet effet est utilisé pour la mesure de température dans les thermocouples, pour la réfrigération dans les modules Peltier et pour la génération électrique dans les générateurs thermoélectriques (TEG). »

Ce dernier point est ici plus spécifiquement étudié et notamment la faisabilité de la réalisation d'un thermogénérateur qui fonctionne à partir du corps humain pour produire de l'énergie électrique. Un TEG est donc soumis à de faibles écarts de température (36°C de température interne corporelle et 22°C en température extérieure ambiante).

Des données numériques sur les caractéristiques électrique, thermique et thermoélectrique de divers matériaux sont présentées dans le document 1.

Modèle électrique et thermique d'un module Seebeck

Étude de l'effet Seebeck

Il est possible de générer un champ électrique si l'on soumet le barreau uniquement à un gradient de température. En régime stationnaire, la relation entre ces deux grandeurs s'écrit sous forme locale :

$$\vec{E}(M) = \epsilon \overrightarrow{\text{grad}}(T(M)) \text{ où :}$$

- ϵ est le coefficient de Seebeck du matériau ou pouvoir thermoélectrique (PTE) absolu du matériau ; ϵ peut être positif ou négatif ;
- $\vec{E}(M)$ est le champ électrique au point M ;
- $T(M)$ la température au point M.

17. Citer les propriétés électriques d'un métal.
18. Interpréter l'effet Seebeck dans le cas d'un barreau de métal dont les extrémités sont à des températures différentes. En déduire, qu'en régime stationnaire, il apparaît un champ électrique orienté de l'extrémité chaude vers l'extrémité froide. Quel est alors le signe du coefficient de Seebeck pour un métal ? *Une réponse qualitative (sans calcul) est attendue.*
19. Que se passe-t-il si on considère maintenant un semi-conducteur où les porteurs de charge constituent un gaz de trous de charge positive ? Quel est alors le signe du coefficient de Seebeck ?

On considère un barreau (figure 6) réalisé dans un matériau thermoélectrique de coefficient de Seebeck ϵ . On suppose que les températures aux extrémités, respectivement $T(0)$ et $T(L)$, sont maintenues constantes.

20. Quelle est l'unité courante du coefficient de Seebeck ?
21. Montrer que la tension U aux bornes du barreau s'exprime par la relation : $U = \epsilon (T(L) - T(0))$.

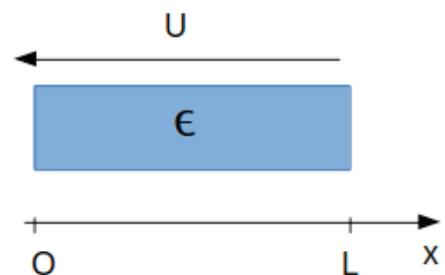


Figure 6 : barreau de coefficient de Seebeck ϵ .

En pratique, on mesure cet effet en reliant les deux extrémités du barreau à un voltmètre avec deux fils conducteurs identiques et constitués d'un matériau différent de celui du barreau (figure 7).

22. Exprimer la tension U' mesurée par le voltmètre et montrer qu'elle est proportionnelle à la différence de température entre les deux extrémités du barreau (figure 7). Qu'en serait-il si les fils conducteurs étaient constitués du même matériau que le barreau ?

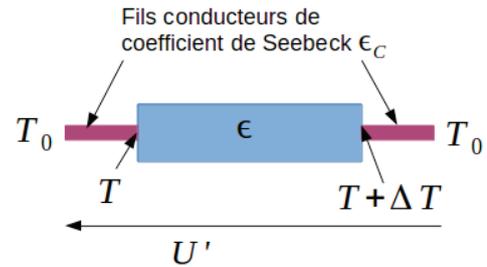


Figure 7 : mesure de la tension U' aux bornes d'un barreau de coefficient de Seebeck ϵ .

Il n'est donc pas possible d'accéder directement au PTE ou coefficient de Seebeck d'un matériau mais à des différences de coefficients de Seebeck.

23. L'effet Seebeck a été mis en évidence par le physicien allemand Thomas Johann Seebeck en 1821. Celui-ci a observé la déviation d'une aiguille aimantée placée au centre d'une boucle formée par deux fils constitués de matériaux conducteurs et thermoélectriques différents dont les deux jonctions étaient portées à des températures différentes. Pour interpréter ces observations, considérons l'association de deux fils conducteurs de matériaux de coefficients de Seebeck différents mis en contact et dont la jonction n'est pas à la même température que les deux autres extrémités (figure 8).

- Déterminer la tension à vide e qui apparaît.
- Interpréter les observations de Seebeck à la lumière des résultats ci-dessus.

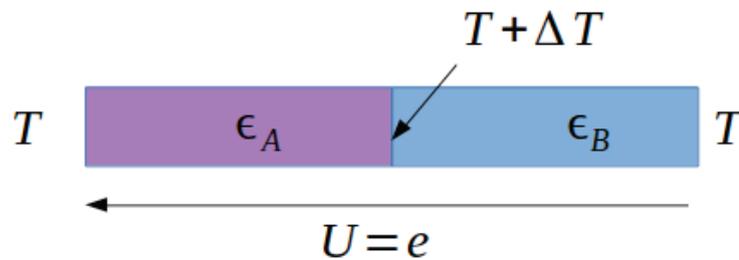


Figure 8 : montage réalisé pour interpréter les observations expérimentales historiques de l'effet Seebeck.

24. L'effet Seebeck est exploité dans les thermocouples (document 2 et figure 9).

- Quels sont les avantages d'un thermocouple pour la mesure des températures ?

- b) Expliquer le principe de la mesure de températures par un thermocouple en vous appuyant sur le document 2 et la figure 9.
- c) Proposer des hypothèses pour expliquer pourquoi la soudure froide n'est pas directement au niveau du voltmètre.
- d) Calculer l'ordre de grandeur d'une différence de potentiel qui peut être mesurée aux bornes d'un thermocouple de votre choix. Comment peut-on augmenter la sensibilité de la mesure ?

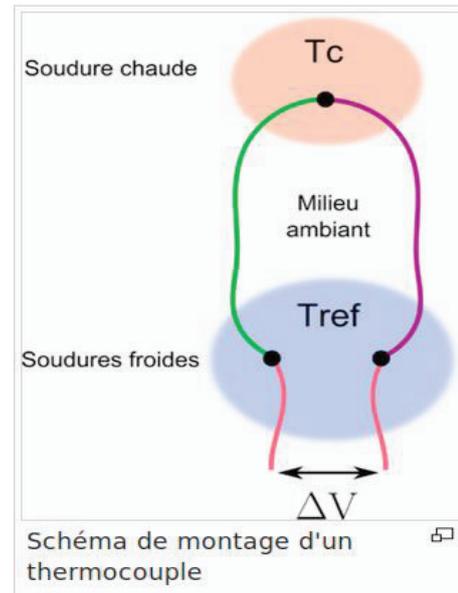


Figure 9 : principe de mesure avec un thermocouple (d'après wikipedia).

On admet pour la suite que l'expression de la tension (ou, ici, tension à vide) générée par l'effet Seebeck n'est pas modifiée lors du passage d'un courant dans les matériaux thermoélectriques.

Le champ électrique en un point M du matériau s'écrit donc : $\vec{E}(M) = \rho \vec{J}_{el}(M) + \epsilon \vec{grad}(T(M))$ avec ρ la résistivité électrique du matériau et ϵ son coefficient de Seebeck.

Présentation d'un thermogénérateur (TEG)

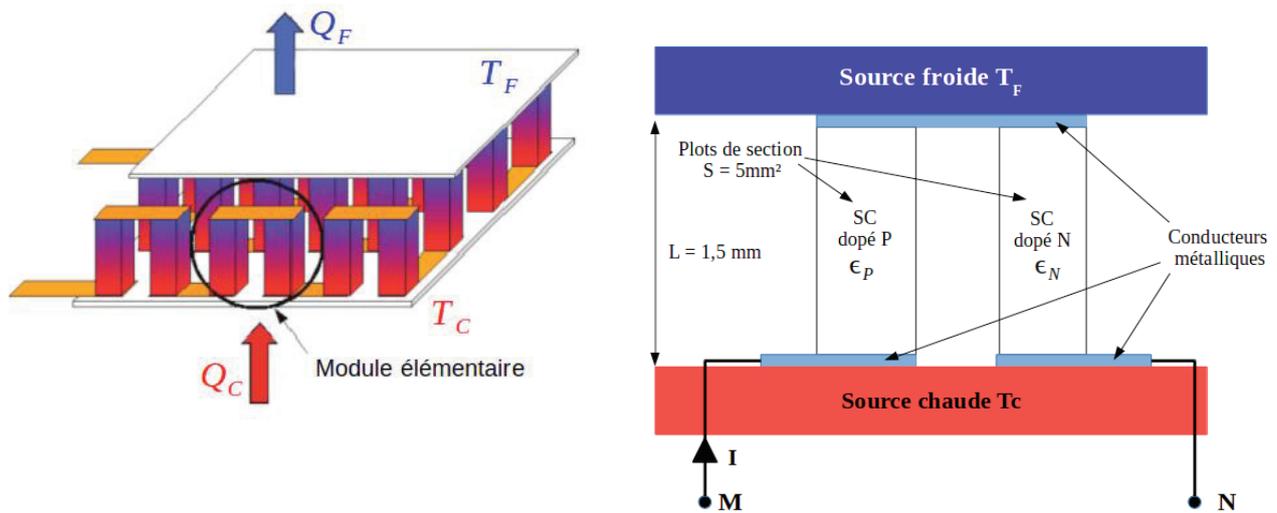
Un thermogénérateur est composé d'un ensemble de modules élémentaires de Seebeck comme présenté sur la figure 10 ci-après. Ce thermogénérateur fonctionne entre une source chaude de température T_C et une source froide de température T_F .

Dans un premier temps, on étudie un module élémentaire de Seebeck constitué de deux barreaux de matériaux différents (semi-conducteurs SC ; l'un dopé P et l'autre dopé N) de longueur L et de section S . Ces barreaux sont reliés par des conducteurs métalliques parfaits de résistance ohmique considérée comme nulle.

Les températures des sources chaude, T_C , et froide, T_F , comme celles des conducteurs métalliques, sont uniformes et constantes. Par contre, un gradient de température existe dans chacun des barreaux semi-conducteurs.

	Semi-conducteur de type P	Semi-conducteur de type N	Conducteurs métalliques
Conductivité électrique	γ_P	γ_N	infinie
Conductivité thermique	λ_P	λ_N	λ_C
Coefficient de Seebeck	$\epsilon_P > 0$	$\epsilon_N < 0$	ϵ_C

L'étude est effectuée en régime stationnaire.



a) Schéma de principe d'un thermogénérateur b) Schéma d'un module élémentaire de Seebeck
 Figure 10 : principe de fonctionnement d'un thermogénérateur.

Modèle électrique d'un thermogénérateur

25. Rappeler le modèle de Thévenin d'un générateur électrique. Donner les caractéristiques du modèle de Thévenin équivalent au module élémentaire de Seebeck de tension U_{NM} représenté sur la figure 10 b et le schématiser en convention générateur en précisant toutes les grandeurs utilisées. On introduira $\alpha = (\epsilon_P - \epsilon_N)$.
26. La puissance électrique fournie par un module est maximale quand la résistance de charge aux bornes de celui-ci est égale à la résistance interne du module. En déduire l'expression de la puissance maximale produite par ce module élémentaire.
27. Donner un ordre de grandeur de la tension à vide et de la puissance maximale fournie pour un module élémentaire en Tellure de Bismuth Bi_2Te_3 (représenté figure 10) pour un écart de température ΔT entre la source chaude et la source froide égal à $5^\circ C$.
28. Justifier la disposition des modules élémentaires pour la réalisation d'un générateur thermoélectrique (figure 10 a) et donner la représentation électrique d'un TEG composé de N modules identiques en précisant toutes les grandeurs utilisées.

Étude de l'effet Peltier

Dans les matériaux thermoélectriques qui sont aussi conducteurs électriques, un flux thermique est associé au passage d'un courant électrique. Dans un TEG, l'effet Seebeck s'accompagne donc aussi de l'effet Peltier.

En un point M d'un matériau thermoélectrique de coefficient de Seebeck ϵ et de conductivité thermique λ , le vecteur densité de flux thermique dans le matériau, **dû au déplacement des porteurs de charge**, s'exprime, en régime stationnaire, par la relation $\overrightarrow{J_{th,Peltier}}(M) = \epsilon T(M) \vec{j}(M)$ avec $\vec{j}(M)$ le vecteur densité de courant électrique et $T(M)$ la température en ce point.

29. Vérifier l'homogénéité de la relation $\overrightarrow{J_{th,Peltier}}(M) = \epsilon T(M) \vec{j}(M)$.

30. Expliquer qualitativement qu'un courant électrique circulant entre des zones de températures différentes puisse être à l'origine d'un transfert thermique.

Le vecteur densité de flux thermique total dans le matériau, $\overrightarrow{J_{th}}$, est donné par la relation :

$$\overrightarrow{J_{th}} = \epsilon T(M) \vec{j}(M) - \lambda \overrightarrow{grad}(T(M)).$$

Le barreau de section S de la figure 11 est parcouru par un courant électrique d'intensité I . On néglige les effets de bord et on suppose la densité de courant \vec{j} uniforme en tout point du barreau.

On considère comme système un petit volume de faible épaisseur, de part et d'autre de la jonction où la température peut être considérée comme constante.

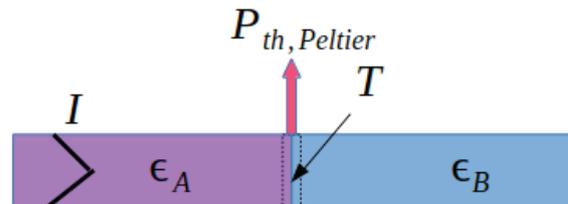


Figure 11 : jonction entre deux matériaux thermoélectriques

31. À l'aide d'un bilan de puissance appliqué au système défini ci-dessus, déterminer la puissance $P_{th,Peltier}$ cédée thermiquement par le système au milieu extérieur. Commenter le résultat obtenu sachant que $P_{th,Peltier}$ est une grandeur algébrique. Que se passe-t-il si on inverse le sens du courant ?

32. Montrer que $P_{th,Peltier}$ peut se mettre sous la forme $P_{th,Peltier} = \Pi I$. Exprimer Π et donner son unité.

Π est appelé le coefficient de Peltier de la jonction entre deux matériaux thermoélectriques différents.

33. Expliquer, à partir de cette étude, le principe de fonctionnement d'un réfrigérant par module Peltier.

En pratique, comme la température de la jonction est constante, cette puissance thermique échangée avec l'extérieur est générée au sein de la jonction par le passage des électrons de valence qui perdent (ou gagnent) de l'énergie lors du passage entre deux milieux de coefficient de Seebeck différent, le réseau gagnant (ou perdant) ainsi cette énergie perdue (ou gagnée) par les électrons. Tout se passe comme si l'énergie thermique était créée en interne³ au niveau de la jonction.

³ Si la puissance générée $P_{th,Peltier}$ est négative, cela signifie qu'elle est absorbée au niveau de la jonction.

Modèle thermique du thermogénérateur

Un module élémentaire de Seebeck est parcouru par un courant d'intensité I . Les échanges thermiques avec l'extérieur sont négligés en dehors des échanges, au niveau des jonctions, avec les sources chaude et froide. Dans cette étude, les transferts thermiques par conduction, qui s'ajoutent aux transferts thermiques dus à l'effet Peltier, sont pris en compte.

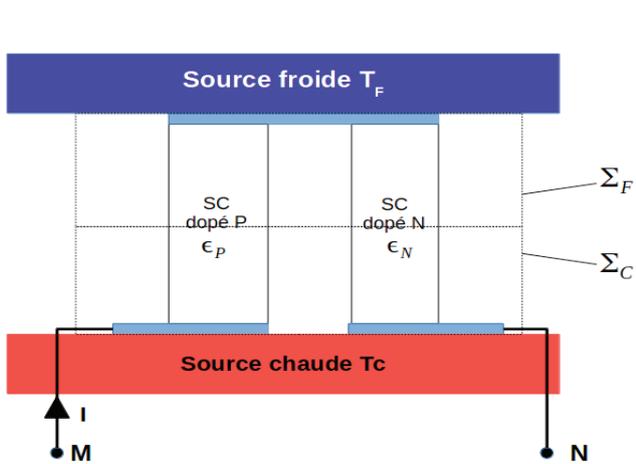


Figure 12a : définition des systèmes pour l'étude thermique d'un module élémentaire de Seebeck

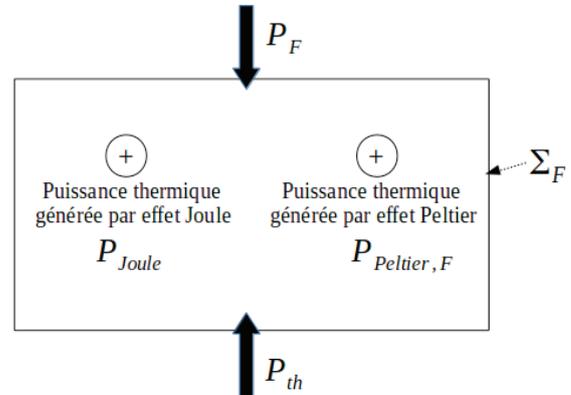


Figure 12 b : bilan de puissance pour le système Σ_F

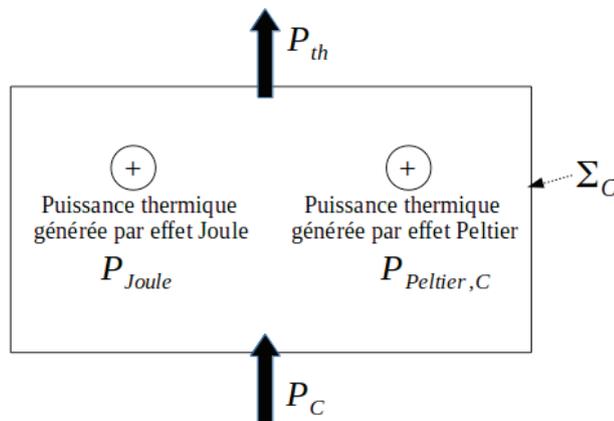


Figure 12 c : bilan de puissance pour le système Σ_C

34. Montrer que le flux thermique P_{th} transféré par conduction thermique de la source chaude vers la source froide par l'intermédiaire des barres de longueur L peut se mettre sous la forme :

$$P_{th} = K\Delta T = K(T_C - T_F). \text{ Exprimer la grandeur } K \text{ en fonction des données du problème.}$$

35. Déterminer la puissance thermique algébrique générée par effet Peltier $P_{Peltier,F}$ au niveau de la jonction froide du système Σ_F .

36. Que se passe-t-il au niveau de la jonction « chaude » ?

Un échauffement par effet Joule a lieu lors du passage du courant d'intensité I dans le module de

résistance ohmique R_{MN} . On suppose que les parties chaude Σ_C et froide Σ_F du module reçoivent de façon égale cette puissance thermique due à l'effet Joule. On pose $\alpha = \epsilon_P - \epsilon_N$.

37. À l'aide d'un bilan de puissance thermique appliqué à Σ_C (figure 12c), déterminer la puissance thermique P_C reçue par le module de la part de la source chaude, en fonction de $K, R_{MN}, \alpha, I, T_F$, et T_C .
38. Comment sont modifiées ces relations lorsque l'on considère un TEG constitué d'un ensemble de N modules élémentaires de Seebeck ?
39. Justifier que le modèle thermique, représenté sur la figure 13, correspond bien à celui du TEG. Préciser notamment les grandeurs utilisées dans le modèle représenté ci-dessous.

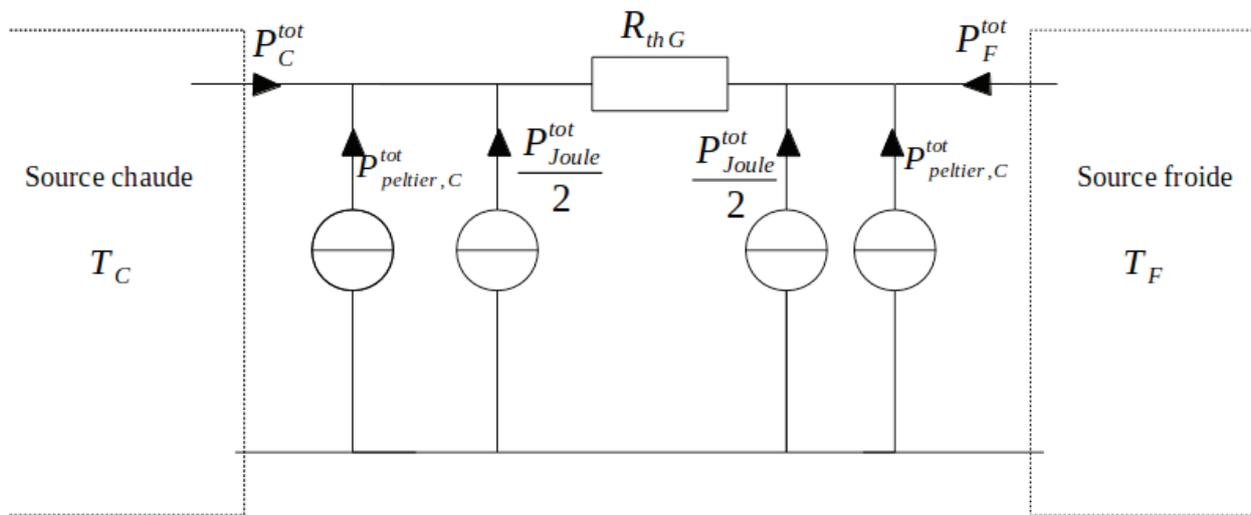


Figure 13 : modèle thermique d'un TEG

Rendement d'un TEG

40. En utilisant les résultats de l'étude électrique et ceux de l'étude thermique, définir le rendement pour un générateur thermoélectrique (TEG) qui, à partir d'une faible différence de température, fournit de l'énergie électrique. Ce générateur est composé de N modules élémentaires. Exprimer ce rendement en fonction de $\alpha, T_C, T_F, R_{MN}, K$ et I .

Si les températures des sources chaude T_C et froide T_F sont proches (ce qui sera valable dans le cas d'un générateur thermoélectrique utilisé dans le contexte humain) et si le TEG est branché sur une charge résistive adaptée au générateur thermoélectrique, on peut montrer que le rendement η_{TE}

s'exprime par la relation : $\eta_{TE} = \frac{\Delta T \sqrt{1+M}-1}{T_C \sqrt{1+M}+1}$

$M = \frac{\alpha^2 (T_C+T_F)}{\rho \lambda \frac{2}{2}}$ est appelé facteur de mérite du thermogénérateur (où ρ est la résistivité électrique moyenne et λ la conductivité thermique moyenne).

41. Justifier que le facteur de mérite M est bien une grandeur adimensionnée.
42. À partir des documents et d'un raisonnement qualitatif, préciser comment choisir des matériaux afin de rendre ce rendement maximal (les températures des sources étant imposées par les situations expérimentales).
43. Quel serait le rendement théorique maximal ? Commenter le résultat obtenu, notamment en le rapprochant d'un théorème de la thermodynamique.

Étude d'un TEG en situation

La suite de l'étude propose de chercher à estimer l'énergie récupérable pour un TEG qui fonctionne à partir des transferts thermiques dont le corps humain, à une température interne de 36 °C, est à l'origine. Le TEG sera donc en contact avec la peau. La source froide est l'air extérieur à la température ambiante de 22 °C.

On considère un thermogénérateur en tellure de bismuth (connu pour avoir le meilleur facteur de mérite pour une température d'environ 300 K) dont les caractéristiques sont précisées ci-dessous.

Nombre de modules élémentaires de Seebeck	$N_{th} = 450$
Épaisseur totale du TEG	$E = 3,4 \text{ mm}$
Longueur de jambe des modules élémentaires	$L = 1,5 \text{ mm}$
Longueur de côté du TEG (carré)	$a = 54 \text{ mm}$
Conductivité thermique moyenne	$\lambda \approx 0,77 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
Résistivité moyenne	$\rho \approx 20 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{m}$
Taux de remplissage des cellules	$k = 0,8$
Température de la source chaude (corps humain)	$T_C = 36 \text{ } ^\circ\text{C}$
Température de la source froide (air extérieur)	$T_F = 22 \text{ } ^\circ\text{C}$
Tableau 1 : caractéristique du TEG au tellure de bismuth étudié.	

Étude expérimentale d'un thermogénérateur

Pour mesurer expérimentalement le coefficient $\alpha = \epsilon_P - \epsilon_N$ appelé aussi coefficient de Seebeck du TEG, le montage présenté sur la figure 14 (ci-après) est réalisé.

44. Expliquer simplement pourquoi ce montage permet la mesure expérimentale du coefficient $\alpha = \epsilon_P - \epsilon_N$ du TEG. Quel est selon vous l'utilité de la plaque en aluminium ?

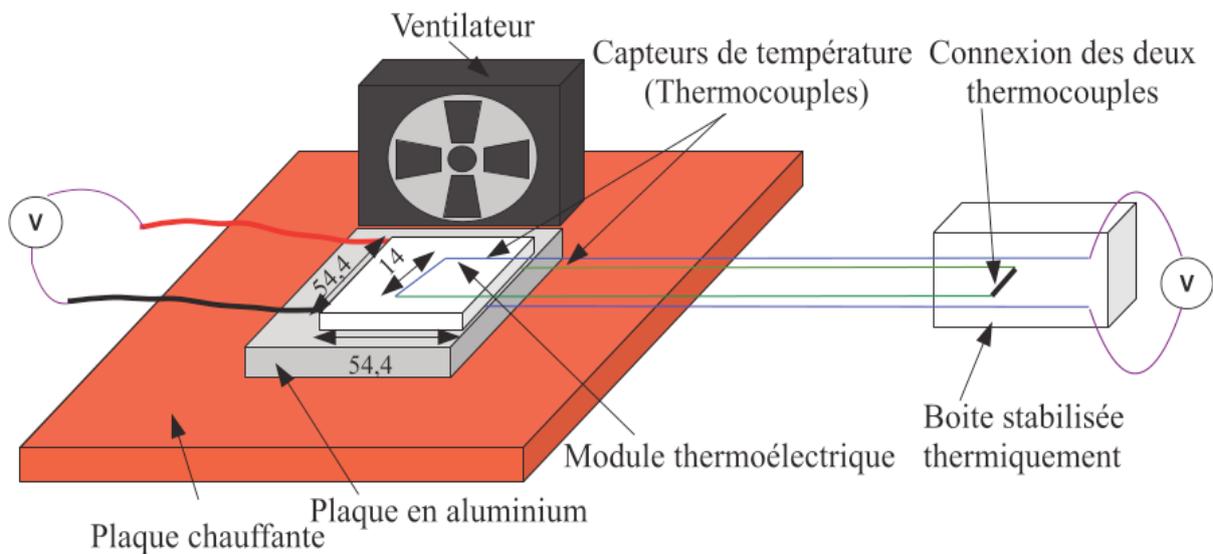


Figure 14 : montage expérimental pour la mesure du coefficient α d'un TEG (extrait de [1]).

Les résultats obtenus expérimentalement sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Différence de température (K)	Tension à vide (V)
0,7	$8,4 \cdot 10^{-2}$
1,3	0,17
1,8	0,21
2,5	0,32
3,2	0,38
3,5	0,41

45. En déduire le coefficient α du thermogénérateur.

46. Proposer un montage permettant de mesurer la résistance thermique globale du TEG.

Expérimentalement, les valeurs obtenues par la mesure des résistances électrique et thermique du TEG sont les suivantes :

- résistance électrique $R_{tot} = 14 \Omega$
- résistance thermique $R_{th,G} = 1,1 K \cdot W^{-1}$

En pratique, le modèle utilisé est amélioré par l'ajout de deux résistances thermiques R_{thA} et R_{thB} représentées sur la figure 15a. D'autre part, des estimations permettent de montrer que les contributions thermiques de l'effet Peltier et de l'effet Joule sont négligeables devant les flux thermiques P_C^{tot} et P_F^{tot} :

$$|P_{peltierC}^{tot}| \ll P_C^{tot}, \quad \frac{P_{joule}^{tot}}{2} \ll P_C^{tot} \quad \text{et} \quad |P_{peltierF}^{tot}| \ll P_F^{tot} \quad \text{et} \quad \frac{P_{joule}^{tot}}{2} \ll P_F^{tot}$$

Le modèle simplifié utilisé est donc présenté sur la figure 15b.

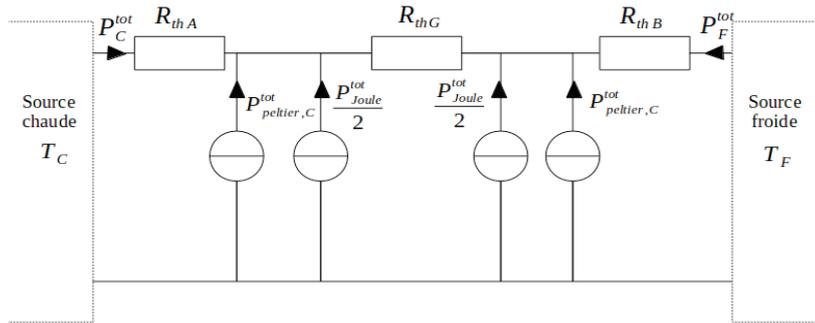


Figure 15a : modèle thermique des transferts thermiques avec un TEG.

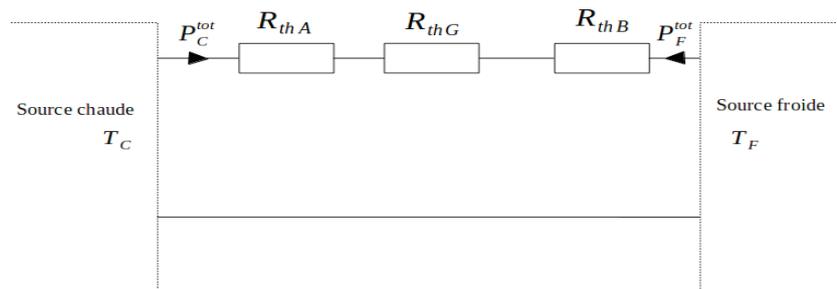


Figure 15b : modèle thermique simplifié d'un TEG.

47. Justifier la présence de deux résistances thermiques supplémentaires sur le modèle thermique du TEG présenté sur la figure 15 positionnées entre d'une part la source chaude (corps humain à 36 °C) et le TEG et, d'autre part, entre le TEG et la source froide (air extérieur à 22 °C). Quels phénomènes modélisent-elles ?

48. Quel est l'impact de ces résistances thermiques supplémentaires sur la génération thermoélectrique ? Quel est alors l'expression de la tension à vide du générateur ?

On mesure expérimentalement la tension à vide aux bornes du TEG : $E_G = 120 \text{ mV}$.

49. En déduire le gradient de température aux bornes du TEG, la puissance électrique récupérable maximale et la densité de puissance surfacique. Commenter ces résultats.

Associé à un amplificateur de tension, le TEG peut permettre :

- soit d'alimenter un capteur effectuant des mesures corporelles (température, sudation ...) qui sont ensuite transmises à une base de données grâce à une puce RFID ;
- soit d'alimenter directement la puce d'une étiquette RFID afin d'augmenter la distance de communication entre celle-ci et le lecteur.

C'est un dispositif de ce type qui est étudié dans la dernière partie.

Partie 4. Dispositifs de communication RFID [Adapté de [9]]

Pour transmettre des informations à un interrogateur appelé aussi « lecteur », une étiquette RFID est munie d'une puce électronique associée à une antenne ; l'ensemble ainsi formé est appelé « étiquette ». La figure 16 représente les éléments d'un système RFID : l'étiquette, le lecteur et le système hôte constitué d'un récepteur et d'un ordinateur.

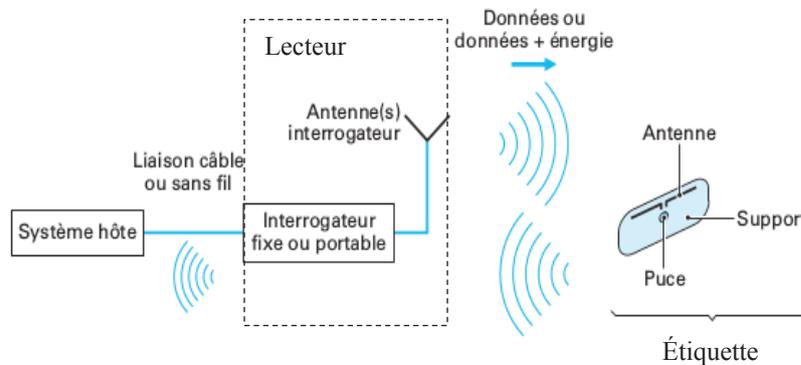


Figure 16 : éléments d'un système RFID.

Si, l'interrogateur fixe possède sa propre source d'énergie électrique (batterie ou branchement sur le secteur), il faut par contre alimenter la puce électronique car, dans bon nombre d'applications, le simple fait— d'ajouter une source d'énergie (pile ou batterie) est simplement inconcevable, l'étiquette serait alors trop volumineuse, trop onéreuse et une maintenance deviendrait nécessaire pour recharger la batterie ou changer la pile. Les étiquettes RFID doivent donc tirer leur énergie d'une autre source et c'est naturellement l'interrogateur qui va la leur fournir. L'antenne de l'étiquette sert à communiquer avec le lecteur et à capter l'énergie radiofréquence issue de ce dernier. On parle alors de **téléalimentation** ou d'alimentation à distance.

Pour répondre aux commandes de l'interrogateur ou lui transmettre des informations, soit la puce de l'étiquette possède un émetteur radiofréquence capable de générer son propre signal (**RFID actives**), soit elle modifie ses caractéristiques propres (impédance, surface équivalente radar). Dans ce second cas, les caractéristiques (amplitude et/ou phase) du signal réfléchi par l'étiquette vers le lecteur sont modifiées ; cette technique, appelée **rétromodulation** est la base de communication des étiquettes **RFID passives** (sans émetteur RF propre). Développée pour des applications radar dans les années 1930, cette technique de communication a été appliquée pour des communications par Harry Stockman dès 1949.

Si l'application le permet ou le requiert, il est toujours possible d'embarquer dans ces étiquettes RFID passives une source d'énergie propre. Celle-ci sert alors à alimenter des « périphériques » à l'étiquette RFID, comme des capteurs, ou sert à améliorer ses performances globales. La méthode de communication vers le lecteur restant basée sur la rétro-modulation, on est toujours dans le cas de étiquettes passives, elles sont simplement assistées d'une source propre d'énergie. On parle alors de **RFID BAP (Battery Assisted Passive)**.

Dans cette partie, nous allons étudier un système RFID passif utilisé sur un être humain pour communiquer des données de surveillance corporelle telles que la température, le rythme cardiaque... Le générateur thermoélectrique peut donc être une source d'énergie pour l'étiquette.

Le système RFID, réalisé avec des antennes boucles, fonctionne à la fréquence de 866 MHz [10].

Dans le cas d'une antenne boucle, de rayon b petit devant la longueur d'onde du signal, de surface A , parcourue par un courant électrique dont la valeur $i(t)$ varie sinusoïdalement avec le temps $i(t) = I_{eff}\sqrt{2}\cos(\omega t)$, les champs électrique $\vec{E}(M, t)$ et magnétique $\vec{B}(M, t)$ rayonnés sont aussi représentés par des fonctions sinusoïdales.

On note $\underline{\vec{E}}(\vec{r}, t)$ (respectivement $\underline{\vec{B}}(\vec{r}, t)$) le champ électrique (respectivement magnétique) complexe associé tel que $\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re}(\underline{\vec{E}}(\vec{r}, t))$ (respectivement $\vec{B}(\vec{r}, t) = \text{Re}(\underline{\vec{B}}(\vec{r}, t))$).

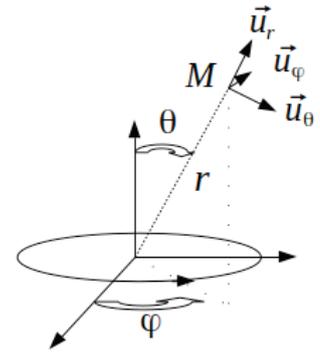


Figure 17 : coordonnées sphériques

L'expression approchée du champ électromagnétique rayonné par l'antenne au point M, caractérisé par ses coordonnées sphériques (r, θ, φ) , s'écrit, en notations complexes :

$$\underline{\vec{E}}(r, \theta, \varphi) = \alpha \sin\theta \frac{e^{-j\beta r}}{r} e^{j\omega t} \vec{u}_\varphi$$

$$\underline{\vec{B}}(r, \theta, \varphi) = \frac{-\alpha \beta \sin\theta}{\omega r} e^{-j\beta r} e^{j\omega t} \vec{u}_\theta$$

Avec $\beta = \frac{\omega}{c}$ et $\alpha = \frac{\omega \mu_0 \beta A I_{eff} \sqrt{2}}{4\pi}$

50. Quelle est la longueur d'onde des ondes électromagnétiques échangées entre la station de base et l'étiquette ?
51. Définir le vecteur de Poynting associé à cette onde électromagnétique rayonnée par l'antenne. Préciser sa signification et son unité.
52. Déterminer la valeur moyenne temporelle du vecteur de Poynting. Cette antenne est-elle isotrope ?
53. En déduire la puissance totale rayonnée par cette antenne et montrer qu'elle peut se mettre sous la forme $P_{ray} = R_{ray} I_{eff}^2$ avec $R_{ray} = 31171 \left(\frac{A}{\lambda^2}\right)^2$.

Données pour cette question :

- $\int_0^\pi \sin^3\theta d\theta = \frac{4}{3}$
- Le déplacement élémentaire en coordonnées sphériques s'écrit : $d\vec{OM} = dr \vec{u}_r + r d\theta \vec{u}_\theta + r \sin\theta d\varphi \vec{u}_\varphi$

La valeur de la capacité propre d'une antenne boucle étant assez faible, elle est principalement inductive. Ainsi, on peut modéliser électriquement une antenne par un résistor en série avec une bobine. L'impédance équivalente de l'antenne peut alors s'écrire :

$$\underline{Z}_{em} = R_{em} + j X_{em}$$

La résistance R_{em} est considérée comme approximativement égale à la résistance de rayonnement R_{ray} . Cette antenne est alimentée par un générateur de tension à vide sinusoïdale d'amplitude E_G et d'impédance $\underline{Z}_G = R_G + j X_G$ (figure 18).

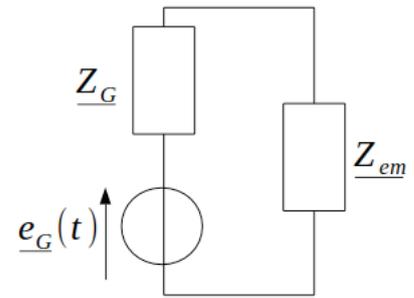


Figure 18

On cherche les conditions pour lesquelles la puissance transférée par le générateur à l'antenne est maximale : on parle alors d'adaptation d'impédance. On rappelle que la puissance moyenne reçue, en régime sinusoïdal forcé, par un dipôle d'impédance $\underline{Z}_u = R_u + j X_u$ parcouru par un courant d'intensité efficace I_{eff} s'écrit $P_{moy} = \text{Re}(\underline{Z}_u) I_{eff}^2$.

54. Montrer que la puissance moyenne fournie à la charge par le générateur, d'impédance \underline{Z}_G et de tension à vide d'amplitude E_G fixées, est maximale lorsque $\underline{Z}_{em} = \underline{Z}_G^*$ (avec \underline{Z}_G^* , complexe conjugué de \underline{Z}_G).

La « charge » est ici l'antenne d'impédance \underline{Z}_{em} . On suppose, pour toutes les questions suivantes, que l'adaptation d'impédance est réalisée.

55. Exprimer la puissance fournie par le générateur et la puissance reçue par l'antenne en fonction de E_G et R_G .
56. Déterminer la valeur de la puissance P_G fournie par le générateur et la puissance rayonnée P_{ray} par l'antenne, pour une antenne boucle émettrice de rayon $b = 5 \text{ cm}$ parcourue par un courant d'intensité efficace $I_{eff} = 0,18 \text{ A}$. Cette puissance est la puissance maximale autorisée par les normes de sécurité sanitaire.

Dans l'étiquette RFID, l'antenne boucle, composée d'une seule spire de rayon $a = 1 \text{ cm}$, est réceptrice. Elle permet la récupération de l'énergie transportée par l'onde émise depuis l'émetteur. On admettra que cette antenne est équivalente à un circuit constitué d'un générateur de tension idéal, de tension à vide sinusoïdale d'amplitude E_{ant} en série avec une impédance $\underline{Z}_{ant} = R_{ant} + j X_{ant}$, R_{ant} modélisant la résistance de rayonnement de l'antenne. Lorsque celle-ci est parcourue par un courant électrique sinusoïdal d'intensité efficace $I_{eff,etiq}^2$, la puissance moyenne re-rayonnée ou rétromodulée, P_{retro} , s'exprime par la relation : $P_{retro} = R_{ant} I_{eff,etiq}^2$.

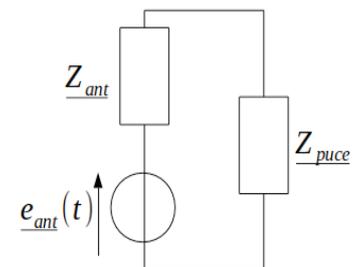


Figure 19

57. La puissance fournie à la puce par l'antenne est de $10 \mu\text{W}$. Quelle est la valeur de la puissance re-rayonnée ? En déduire alors l'ordre de grandeur de l'intensité efficace du courant circulant dans le circuit électrique de l'étiquette RFID.

On montre que le coefficient de transmission en énergie T entre l'antenne de l'étiquette RFID et la puce, et le coefficient de re-rayonnement K peuvent s'écrire :

- $T = 1 - |\Gamma|^2$ avec $\Gamma = \frac{Z_{puce} - Z_{ant}^*}{Z_{puce} + Z_{ant}}$,
- $K = |\Gamma|^2$

58. Dresser un tableau présentant les valeurs de T et K lorsque :

- la puce est court-circuitée ;
- la puce est remplacée par un circuit ouvert ;
- la puce vérifie les conditions d'adaptations d'impédance.

59. Préciser comment réaliser ces trois conditions avec des interrupteurs commandables.

60. En déduire comment la puce délivre une information au lecteur.

Du fait de la propagation de l'onde rayonnée par l'antenne émettrice jusqu'au récepteur sur une distance d , on observe une perte de puissance appelée « Path Loss ». Cette perte dans la propagation en espace libre, notée L_P , s'écrit :

$$L_P = \frac{(4\pi d)^2}{\lambda^2} = \frac{\text{puissance rayonnée par l'antenne émettrice de l'interrogeur}}{\text{puissance électromagnétique reçue par l'antenne réceptrice de l'étiquette}}$$

Elle est souvent exprimée en décibel : $L_P(dB) = 10 \log_{10}(L_P)$.

Par ailleurs, dans les notices descriptives des systèmes RFID, les puissances reçues ou émises sont généralement exprimées en dBm : $P(dBm) = 10 \log_{10}\left(\frac{P(mW)}{P_0}\right)$ avec $P_0 = 1 mW$ (puissance de référence) et P la puissance reçue exprimée en mW .

Dans le système réel étudié, l'antenne du lecteur émet une puissance de $36 dBm$ (le maximum légal autorisé). Le fonctionnement en mode passif de l'étiquette nécessite une puissance de $16 dBm$ (sans ajout du TEG) et le fonctionnement en mode semi passif nécessite une puissance de $-4 dBm$ (avec l'apport énergétique du TEG).

61. Déterminer la distance maximale possible (ou portée d'alimentation) entre le lecteur et l'étiquette RFID dans les deux cas : passif et semi-passif. Conclure.
62. Présenter de façon synthétique le principe de fonctionnement d'une étiquette RFID et l'intérêt de la coupler avec un TEG.

Bibliographie

[1] M. Lossec. Systèmes multisources de récupération d'énergie dans l'environnement humain : modélisation et optimisation du dimensionnement. Thèse de doctorat, École Normale Supérieure de Cachan, 2011. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00618233/document>.

[2] Bertrand LENOIR, Jean-Pierre MICHENAUD, Anne DAUSCHER. Thermoélectricité : des principes aux applications. Techniques de l'ingénieur, K730, 2010.

[3] <http://aviatechno.net/thermo/thermo03.php>.

[4] M. Ruellan, S. Turri, Hamid Ben Ahmed and B. Multon. Electromagnetic resonant generator. IEEE IAS annual meeting, Hong Kong, CDRom proc., 2-6 oct. 2005.

[5] WILLIAMS (C.B.) et YATES (R.B.). – Analysis of a micro-electric generator for Microsystems. Sensors and Actuators A, vol. 52, p. 8-11 (1996).

[6] Épreuve de physique (PC) CCP 2015.

[7] C.R Saha, T O Donnell, N Wang, and P McCloskey. Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion. Sensors and Actuators A : Physical , 147(1) :248–253, September 2008.

Lisible sur

https://www.researchgate.net/publication/236026416_C_R_Saha_T_O'Donnell_N_Wang_and_P_McCloskey_Electromagnetic_generator_harvesting_energy_from_human_motion_Sensors_and_Actuators_-_A_Physical_volume_147_Issue_1_2008

http://fondation.cetim.fr/pages/projets/fondationCetim_RecuperationEnergieVibrationsAmbiantes.pdf

[8] Claire Jean-Mistral. Récupération d'énergie mécanique par polymères électroactifs pour microsystèmes autonomes communicants, Thèse de doctorat, Université J. Fourier, 2008 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00356265/document>.

[9] Claude Tetelin. Systèmes et techniques RFID , Techniques de l'ingénieur, E1470, 2015.

[10] Données fournies par C. Loussert, vice-président de TAGSYS, RFID Integration.