

**Projet de recherche Bibliographique (2E102) :**

**Source d’énergie et capteurs (2E102) - Récupération d’énergie pour des applications biomédicales**

*Duvivier Valentin - Ferradj Imane - Makolo Namba Tabitha*

Formation cursus master en Ingénierie - 2è année

2018/2019

**Introduction** :

Les technologies médicales sont en constant développement et ce afin d’être toujours à la pointe des avancés scientifiques et de prodiguer aux patients les meilleurs soins possibles. Ainsi, les innovations biomédicales ont pour but de répondre à une demande de la part des patients et se doivent d’être à jour en ce qui concerne les techniques médicales et biomédicales.

Un exemple de domaine biomédicale en développement est celui des récupérateurs d’énergie. Ce domaine met en jeu des dispositifs de récupérateurs d’énergies, afin notamment de répondre aux problèmes de coûts, d’autonomie, de risques médicaux, et de rendement des technologies biomédicales actuelles. Or, les avancées médicales se devant être le fleuron des innovations technologies, et afin de pallier à ce problème, des recherches et des études sont faite pour trouver des solutions sur le long terme. C’est dans ce sens que

/\*------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------\*/

**JE SAIS PAS**

Dans un premier temps, nous aborderons l’aspect technique de cette technologie : composants et confection. Puis, nous étudierons notre dispositif selon 3 sources : une source web et une revue scientifique traitants toutes deux de la mise en place d’une expérimentation scientifique ; ainsi qu’un chercheur de Sorbonnes Université. Enfin, nous mettrons en opposition différentes solutions apportés au problème de longévité des pacemakers et d’autres sources venant en contradiction avec les données déjà exploitées.

Pour conclure nous ferons le bilan des données récoltés et en remettant ce dispositif dans le contexte actuel et en étayant avec des suppositions sur le future de cette technologie.

/\*------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------\*/

Le plan de cette recherche est le suivant :

1. Introduction
2. Chapitre 1 : Présentation, composants et fonctionnement
3. Chapitre 2 : Interview de 2 chercheurs de l’UPMC
4. Chapitre 3 : Etudes en laboratoire et résultats expérimentaux ; cas du convertisseur piézoélectrique
5. Chapitre 4 : Points négatifs, limites et alternatives : mise en contradiction ou en lien avec d’autre source et d’autre systèmes en développement
6. Chapitre 5 : Autre
7. Conclusion et ouverture : que tire-t-on de nos recherches sur ce projet
8. Note et avis personnels
9. Bibliographie
10. **Chapitre 1 : Présentation, composants et fonctionnement**

La récupération d'énergie est une notion qui traduit l’utilisation de l'énergie ambiante présente dans l'environnement pour l’alimentation de dispositifs électroniques, et ce dans l’objectif de prolonger leur durée de fonctionnement, voire de les rendre totalement autonomes. Il existe différents types de capteurs et donc différents types d’énergies récupérables : thermique, magnétique, biochimique, mécanique (capteur piézoélectrique par exemple).

Ainsi, de nombreuses sources d'énergie présentes dans l'environnement de l'Homme peuvent être exploitées : le soleil, une différence de température entre la peau et l'extérieur, la déformation des vêtements, les battements du coeur, etc.

Appliquée au cas de l'Homme, la récupération d'énergie peut atteindre des puissances de plusieurs milliwatts voire de plusieurs watts permettant d'alimenter des systèmes complexes tels que des lecteurs MP3, ou des systèmes de localisation GPS. Il est à noter que même si les systèmes de récupérateurs sont encore en développement aujourd’hui, cela ne les empêche pas d’être disponibles dans le commerce (panneaux solaires, montres autonomes) et dans de nombreuses applications médicales (DIA, pacemaker) [1].

Avant de débuter notre étude, nous allons distinguer la récupération de la production d'énergie :

* l'idée de la récupération d’énergie consiste à récupérer une partie de l’énergie perdue lors d’un mouvement, d'un déplacement, ou d'une action usuelle de l’utilisateur. On retrouve dans ce thème l’idée de médicalisation intelligente : réduire les coûts et créer des dispositifs qui permettent de faire des économies et de sauver des vies à long terme. L’idée de récupération d’énergie est non pas de prendre de l’énergie vitale à l’Homme mais de récupérer de l’énergie destinée à être perdue. Cette énergie doit être renouvelable pour convenir au cadre d’utilisation.
* la production d’énergie quand à elle se distingue en 2 possibilités pour les technologies biomédicales (dans le corps ou à l'extérieur) :
  + A l’extérieur on retrouve des systèmes filaires tel que les panneaux solaires ou des dispositifs récupérant l’énergie créée par les mouvements d’une personne. On aura en sommes une grande majorité de systèmes nécessitant un apport important d’énergie.
  + A l’intérieur on retrouve surtout des dispositifs miniaturisés et qui font un compromis entre le confort de la marche et la puissance récupérée ; le système n’est plus complètement anodin vis-à-vis de l'utilisateur.

Cette distinction va nous permettre de bien faire la différence entre les différents composants des dispositifs étudiés. En effet, la production d’énergie est ici “naturelle” dans le sens où l’on ne cherche pas à la produire directement mais on l’exploite ; tandis que la récupération d’énergie se fait par notre capteur et le récupérateur adapté.

Pour ce qui est des récupérateurs, ils sont notamment caractérisés par des convertisseurs qui vont convertir une énergie interne ou externe en énergie électrique. Il existe trois principaux types de convertisseurs électromécaniques permettant de transformer une énergie mécanique, issue des mouvements humains, en énergie électrique, qui pourra ensuite être utilisée pour alimenter un système autonome [1] :

- Les convertisseurs piézoélectriques (Fig 1a) : ils exploitent les propriétés piézoélectriques de certains matériaux, tels que le PZT, l'AlN, le PVDF, à générer de l'énergie électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique.

- Les convertisseurs électromagnétiques (Figure 1b): ils sont constitués d'un aimant toujours polarisé, se déplaçant à l'intérieur d'une bobine et exploitent la loi de Lenz. Le déplacement de l'aimant induit une variation du flux magnétique traversant les spires de la bobine, ce qui génère un courant électrique.

- Les convertisseurs électrostatiques (Figure 1c) : ils utilisent une “capacité variable polarisée par un électret ou par un cycle de charge/décharge” pour convertir le déplacement d'une électrode par rapport à la seconde (ou plus généralement toute variation de capacité en électricité) [1].

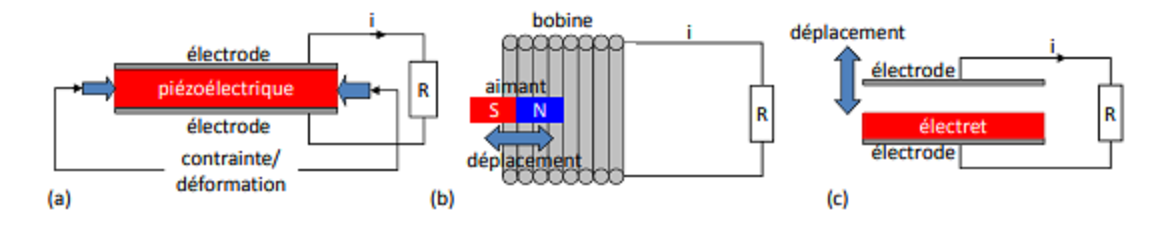


Fig 1: a) Convertisseur piézoélectrique, b) Convertisseur électromagnétique et c) Convertisseur électrostatique. [1] URSI (consulté le 5 Décembre 2018)

Ces 3 moyens de conversion sont à la base de tous les systèmes que nous verrons par la suite soit sous leur forme basique, soit couplés à d'autres convertisseurs tels que des systèmes résonants masse-ressort, pour devenir des récupérateurs d'énergie. Ainsi, à l’aide d’un système masse-ressort (Figure 2) notre dispositif va être capable de générer un mouvement relatif entre deux éléments à partir de vibrations (mouvements lors de la marche, battements du coeur…) ou de chocs (chaussures,…).

Ainsi, en complétant le premier extracteur avec un des autres mentionnés ci-dessus, il est possible de récupérer de l’énergie et de la transformer en énergie électrique exploitable.

Nous avons ci-dessous un exemple schématique de chaîne de conversion (figure 3) (ici on a le montage pour un processus HBS (Pacemaker miniaturisé et sans pile) mais le système est généralisable à celui de notre étude).

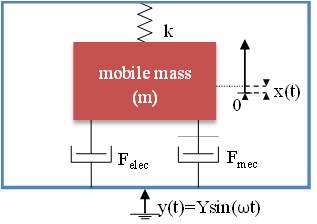
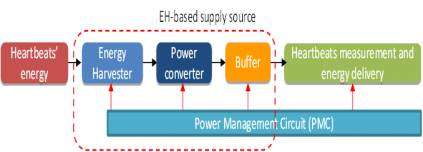


fig 3 : Power conversion chain for HBS energy harvesters. [2] fig 2 : general model of a vibration Equipe EE Times, (consulté le 14 Octobre 2018) energy harvester [2] Equipe EE Times, (consulté le 14 Octobre)

Dans le chapitre suivant nous allons étudier en détail un récupérateur : le récupérateur d'énergie mécanique.

**II. Chapitre 2 : Etudes et résultats expérimentaux : cas du convertisseur piézoélectrique**

Ce chapitre se focalise sur la récupération d'énergie mécanique. Nous allons voir en détail différentes études faites sur le développement des récupérateurs d’énergies de type mécanique interne et externe. Nous verrons ainsi plusieurs sources développant leurs hypothèses et expliquant leur démarche expérimentale sur les avancées biomédicales des récupérateurs d’énergie.

Dispositif externe [1] (source majeure) :

Pour ce type de dispositif, il existe 2 catégories, dont nous allons distinguer les champs d’applications : les chaînes de conversions inertielles et les chaînes de conversions directes.

La conversion électromagnétique a été très largement plébiscitée pour les systèmes inertiels externes. [3] Le premier système inertiel de récupération d'énergie mécanique adapté aux mouvements humains et commercialisé fut la montre Seiko (1988). Elle était capable de convertir les mouvements du poignet en électricité à l'aide d'un système à masse excentré couplé à un convertisseur électromagnétique.

Les puissances de sortie étaient de l'ordre de 5µW en moyenne (1mW en mouvement forcé) ce qui était suffisant pour alimenter la montre. A noter qu’il existe également d'autres systèmes de récupération d'énergie qui sont plutôt au niveau de la recherche : par exemple, un sac à dos récupérateur d'énergie utilisant une conversion électromagnétique est capable de récupérer jusqu'à 7W lors de la marche [1].

Dans l’introduction nous avions vu des exemples de dispositifs fonctionnant par récupération d’énergie comme les panneaux solaires. Ici, nous avons des exemples de technologies à une plus petite échelle, mais qui sont bien plus utilisés. Petit point de vue personnel, il semble que plus l’on cherche à miniaturiser un dispositif, plus il tient un rôle majeur dans son domaines d’application ; même si des systèmes comme les panneaux solaires restent d’une importance majeure pour le développement des énergies renouvelables par exemple.

Concernant les systèmes de récupération d'énergie à conversion directe, tous les principes de conversions (électromagnétiques, piézoélectriques et électrostatiques) ont été mis en place avec des puissances avoisinant les dizaines de watts. Selon une autre source [5], “de nombreux chercheurs se sont également intéressés à la récupération d'énergie pour les chaussures et ont notamment montré que la puissance maximale disponible dans une chaussure est de l'ordre de 2W. Ainsi, dès 1998, le MIT s'est intéressé à cette récupération d'énergie à l'aide de systèmes piézoélectriques et électromagnétiques.”

On voit ici qu’il y a plusieurs types de récupérateur possible pour une même application car il y a plusieurs types de convertisseur possible. Il faut simplement distinguer lequel des récupérateurs est le plus efficace et dans quel cas. Pour celui des chaussures, les puissances générées atteignent 8.4mW pour la structure piézoélectrique et 60mW pour la structure électromagnétique [6].

En sommes, il faut savoir adapter le capteur à chaque problématique. Dans le cas d’un récupérateur d’énergie cardiaque de type DIA, on aura par exemple le circuit piézo PZT qui sera le plus efficace [4]. Par ailleurs, même si un système est plus performant qu’un autre, ce ne sont pas les seuls caractéristiques à prendre en compte. Par exemple, la place que le système occupe reste une caractéristique majeure. En pratique, il s’agit de faire un compromis entre le confort de la marche et la puissance récupérée ; “au-delà de 100mW le système n’est plus complètement anodin vis-à-vis de l'utilisateur”. [5]

Dispositifs internes [1],[4] (sources majeures) :

La recherche s'oriente aujourd'hui vers les systèmes de récupérations d'énergie biomécanique internes, qui peuvent être une formidable opportunité pour l'alimentation d'implants médicaux (pacemakers, pompes à médicaments,…), les rendant ainsi totalement autonomes. Les récupérateurs d'énergie biomécaniques internes sont aujourd'hui, pour la plupart, encore à l'état d'étude même si des phases de tests cliniques ont d’ores et déjà débutées. [4]

On utilise l’énergie et la mécanique corporelle interne afin de créer une tension exploitable. Pour cela, les technologies biomécaniques sont une solution aux déficits énergétiques. Un des cas étudiés par les chercheurs de NCBI [4] est celui de l’exploitation des battements du coeur pour l’autosuffisance d’un récupérateur d’énergie ultra-flexible (UFEH Ultra Flexibles Energy Harvester). En effet, les battements du coeur sont une source illimitée d’énergie mécanique, et grâce à des mécanismes piézoélectriques on va convertir cette énergie en énergie exploitable.

Le fonctionnement du système est le suivant : des matériaux piézoélectriques sont appliqués sur des zones particulières du coeur et ces matériaux vont transformer les battements du coeur, qui sont de l’énergie mécanique, en énergie électrique à l’aide d’un convertisseur.

A cela s’ajoute donc un convertisseur : les dispositifs piézoélectriques et électrostatiques qui définissent notre objet d’étude délivrent une tension de sortie qui ne peut pas directement être utiliser pour subvenir aux besoins électriques du dispositif ; c’est pourquoi un circuit de gestion de puissance, comprenant des transistors et des circuits de détection, est requis. [4]

En sommes, par cette étude on voit en quoi la distinction entre récupérateur d’énergie et producteur d’énergie était nécessaire : les composants d’un récepteur sont multiple et dépendent du type de production d’énergie. On voit ici que les battements du coeur nécessite un convertisseur et un circuit de gestion de puissance pour être exploitable. Ainsi, le fait que ces thèmes soient directement liés nous amène à les distinguer pour mieux mettre en lumière les liens existant entre systèmes biomédicaux et producteurs d’énergie.

Enfin, il faut savoir que l'énergie qui dérive du mouvement cardiaque est faible et que pour pallier à ce problème on utilise donc des matériaux piézoélectriques pour lesquels nous avons un très bon coefficient de rendement. Ainsi, concernant les systèmes de récupération d'énergie à conversion directe, nous pouvons évoquer le système de récupération d'énergie piézoélectrique souple adapté à la récupération d'énergie des déformations du cœur, du diaphragme ou des poumons. [4] Ce type de dispositif met en avant l’utilisation de matériaux ultra-flexibles. Dans une optique de rendre les dispositifs biomédicaux de plus en plus petit, il a fallu trouver des alternatives aux matériaux actuels.

Chacun de ces composants étant implantés dans le corps humain et très proche du coeur, il est nécessaire qu’ils soient le plus petit et fiable possible. La taille du dispositif doit être inférieures à 1cm³ (pour le DIA). Pour ce qui est de la fiabilité de ce type de système, il y a encore beaucoup d’incertitude quand à leur efficacité. Le développement des nanotechnologies pose le problème suivant : dans une optique de rendre les dispositifs biomédicaux de plus en plus petit et flexible, est-il possible de les rendre en même temps plus performant en terme de récupération d’énergie ?

Il a été énoncé précédemment que la puissance nécessaire pour faire fonctionner un dispositif miniature interne est de quelques dizaines de milliWatts. Or, dans le cas des capteurs autonomes communicants, il a été montré par les chercheurs de l’URSI [1] que l'énergie nécessaire pour faire une mesure complète est comprise entre 50µJ et 500µJ. Ainsi, même avec un système de récupération d'énergie ne récupérant que 10µW, le capteur autonome communicant peut fonctionner toutes les 10 secondes environ [7], ce qui est suffisant pour de nombreuses applications.

Pour conclure, la proposition des extracteurs d’énergie peut répondre aux besoins en énergie des stimulateurs cardiaques, et être une bonne solution pour résoudre le problème de la chirurgie régulière. Avec leur développement ultérieur, les dispositifs proposés devraient fournir suffisamment d’énergie, permettant l’autonomie des systèmes biomédicaux, et pourraient être de bons candidats pour la prochaine génération de récupérateurs d’énergie.

On a pu voir que les systèmes les plus développés actuellement sont ceux en lien avec des applications internes et mettant sans cesse au défi la science et ses champs de recherches.

D’ailleurs, ce type de dispositif pourrait avoir de nombreuses autres applications biomédicales tel que les implants cochléaires, les pompes à insuline, les capteurs de glucose, etc. Parce qu’il existe différents types de dégénérescence cardiaque il faut, non pas chercher une méthode équivalente pour tous les cas, mais chercher à s’adapter aux différents cas étudiés.

Conclusion :

La récupération d'énergie biomécanique offre des possibilités intéressantes pour alimenter ou pour prolonger la durée de vie des dispositifs biomédicaux. De nombreux dispositifs sont testés selon différents domaines d’applications et différentes technologies utilisées ; certains d'entre eux étant par ailleurs déjà commercialisés. On notera l'importance de la vision "système" prenant en compte tous les paramètres et toutes les contraintes de l'ensemble de la chaîne : production d’énergie, conversion de l’énergie primaire en énergie électrique, stockage de l’énergie, récupération intelligente de l’énergie.

La récupération d'énergie peut être une formidable opportunité permettant d'offrir l'autonomie énergétique aux objets, capteurs, vêtements, de l'Homme connecté; et sera sans aucun doute un des piliers des objets intelligents futures [8].

**III. Note et avis perso**

**Valentin Duvivier**

Ce projet m’a permis d’appuyer le cours d’électronique et ma familiarisation avec cette matière. N’ayant pas suivis la première année de CMI, je n’avais fait de l’électronique qu’au lycée.

Cette recherche bibliographique m’a permis de bien mieux assimiler l’approche des capteurs dans le cours d’électronique. Pour la réaliser nous avons décidé de répartir les thèmes de recherches selon les affinités de chacun. Ainsi, ayant le plus de lacune dans l’application de l’électronique à des fins expérimentales, j’ai décidé de me pencher sur ce sujet afin de mieux le comprendre.

En sommes, le fait d’avoir privilégié une répartition de la recherche en thème m’a permis à la fois d’étudier le sujet dans sa globalité mais aussi et surtout d’avoir pu étudier en détail l’aspect capteur et récupérateur d’énergie. Ce fut donc une expérience qui m’a beaucoup apporté et qui m’a permis de découvrir un aspect de l’électronique que je n’avais encore jamais étudié.

**VIII. Bibliographie**

**Valentin Duvivier :**

fig 1 : [fichier web] : Sébastien Boisseau, Pierre Gasnier, Ghislain Despesse, Jerome Willemin, Jean-Jacques Chaillout, et al.. Récupération d’Energie Biomécanique et Systèmes Autonomes. URSI - Journées Scientifiques 2014 - L’Homme connecté, Mar 2014, France. 2014.

Disponible à l’adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00959773/document>

(consulté le 5 Décembre 2018)

fig 2 : [fichier web] : Power conversion chain for HBS energy harvesters.

Equipe de chercheurs : S. Boisseau, J.J. Chaillout, M. Deterre and R. Dal Molin

1. CEA-LETI, Minatec Campus, Grenoble, France

2. Sorin CRM SAS, Clamart, France

Disponible à l’adresse : <https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1280031&page_number=2>

(Consulté le 14 octobre 2018)

fig 3 : [fichier web] : general model of a vibration energy harvester.

Équipe de chercheurs : S. Boisseau, J.J. Chaillout, M. Deterre and R. Dal Molin

1. CEA-LETI, Minatec Campus, Grenoble, France

2. Sorin CRM SAS, Clamart, France

Disponible à l’adresse : <https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1280031&page_number=2>

(Consulté le 14 octobre 2018)

[1] Sébastien Boisseau, Pierre Gasnier, Ghislain Despesse, Jerome Willemin, Jean-Jacques Chaillout, et al.. Récupération d’Energie Biomécanique et Systèmes Autonomes. URSI - Journées Scientifiques 2014 - L’Homme connecté, Mar 2014, France. 2014.

Disponible à l’adresse : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00959773/document>

(Consulté le 5 Décembre 2018)

[2] EE Times : Toward pacemakers powered by heartbeats, par l’équipe de EE Times, le 17 Octobre 2012

Disponible à l’adresse : <https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1280031&page_number=2>

(Consulté le 14 octobre 2018)

[3] L. Rome et al., "Generating Electricity While Walking with Loads," Science, 9 Septembre 2005

vol. 309, issue 5741, pp. 1725-1728. DOI : 10.1126/science.1111063

disponible à l’adresse : http://science.sciencemag.org/content/309/5741/1725

(Consulté le 13 Octobre 2018)

[4] NCBI : Ultra-flexible Piezoelectric Devices Integrated with Heart to Harvest the Biomechanical Energy, par [Bingwei Lu](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Lu%20B%5BAuthor%5D&cauthor=true&cauthor_uid=26538375), [Ying Chen](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Chen%20Y%5BAuthor%5D&cauthor=true&cauthor_uid=26538375), [Dapeng Ou](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Ou%20D%5BAuthor%5D&cauthor=true&cauthor_uid=26538375), [Hang Chen](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Chen%20H%5BAuthor%5D&cauthor=true&cauthor_uid=26538375), [Liwei Diao](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Diao%20L%5BAuthor%5D&cauthor=true&cauthor_uid=26538375), [Wei Zhang](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Zhang%20W%5BAuthor%5D&cauthor=true&cauthor_uid=26538375), [Jun Zheng](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Zheng%20J%5BAuthor%5D&cauthor=true&cauthor_uid=26538375), [Weiguo Ma](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Ma%20W%5BAuthor%5D&cauthor=true&cauthor_uid=26538375), [Lizhong Sun](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Sun%20L%5BAuthor%5D&cauthor=true&cauthor_uid=26538375), and[Xue Feng](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/?term=Feng%20X%5BAuthor%5D&cauthor=true&cauthor_uid=26538375)a ; le 5 Novembre 2015

Disponible à l’adresse : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4633610/>

(Consulté le 16 octobre 2018)

[5] Niu et al, "Evaluation of motions and actuation methods for biomechanical energy harvesting," Proc. Power Electronics Specialists Conference, 2004.

Disponible à l’adresse : <https://www.researchgate.net/publication/4103735_Evaluation_of_Motions_and_Actuation_Methods_for_Biomechanical_Energy_Harvesting>

(Consulté le 8 Décembre 2018)

[6] N. shenck, "demonstration of useful electric energy generation from," master of science, mit, 1999.

Disponible à l’adresse : <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/9800>

(Consulté le 8 décembre 2018)

[7] A. Mathieu, B. Aubry, E. Chhim, M. Jobe, and M. Arnaud, “Powering Pacemakers from Heart Pressure Variation with Piezoelectric Energy Harvesters”, Feb. 2016. [Article web]

Disponible en lecture à distance à l’adressse : <https://zenodo.org/record/1112274#.XABDi9tKiM8>

(Consulté le 30 Octobre 2018)

[8] Bao Research : [Engineers Make World’s Fastest Organic Transistor.](https://baogroup.stanford.edu/index.php/research-highlights/261-engineers-make-worlds-fastest-organic-transistor)

Etude des nouveaux matériaux d'ingénierie, en association avec Stanford, par Tom Abate, Jinsong Huang et *Carole Wilbeck ; publiée dans Nature Communications volume5, Article number: 3005 (8 Janvier 2014)*

[article de revue scientifique]

[Disponible](https://baogroup.stanford.edu/index.php/research-highlights/261-engineers-make-worlds-fastest-organic-transistor) en lecture à distance [à l’adresse : https://baogroup.stanford.edu/index.php/research-highlights/261-engineers-make-worlds-fastest-organic-transistor](https://baogroup.stanford.edu/index.php/research-highlights/261-engineers-make-worlds-fastest-organic-transistor)

(Consulté le 29 Octobre 2018)