

L'électricité est-elle le vecteur énergétique de l'avenir pour la santé publique ?

Is electricity the energy vector of the future for public health?

Marcel JUFER¹

Résumé

La chaîne électrique, de la production au consommateur, implique conversion, transport et distribution. De façon générale, l'électricité joue un rôle de vecteur, équilibrant production et consommation, avec une quasi-impossibilité de stockage direct. Elle n'est en aucun cas une source directe de production d'énergie telle que pétrole, charbon, gaz, gaz de schiste, biogaz, bois, uranium, hydraulique et autres énergies renouvelables. L'électricité est seule à permettre de multiples formes finales de consommation de l'énergie : travail, électrochimie, chauffage, transport, traitement de l'information, etc. Énergie et communication jouent un rôle croisé.

L'électricité n'est que très peu stockable de façon directe (condensateurs) ou de façon indirecte (pompage-turbinage, électrochimie, chaîne du H₂) avec des rendements inférieurs à 80 %.

La détermination des densités d'énergie hydropneumatique, électromagnétique et électrostatique permet de comparer et de définir certaines limites dans l'usage de ces diverses formes. Les apports directs de l'électricité à la santé sont déjà nombreux : mesures, diagnostic, surveillance, rayons X, radiographie, RMN, IRM, appareillage de stimulation et prothèses, assistances, etc. Deux exemples sont développés : le cerveau avec le projet européen Human Brain Project et le cœur artificiel implantable.

Les apports indirects à la santé relèvent essentiellement de la possibilité de mieux maîtriser la pollution diffuse et les nuisances, en particulier dans le domaine des transports. De nouveaux composants sont décrits avec leurs potentialités, dont les supercondensateurs et le transfert d'énergie sans contact permettant un transport électrique souple. Des exemples concrets sont donnés sur des solutions futures dans les domaines du transport et de la santé.

Mots-clés

Électricité, stockage, batteries, super-condensateurs, énergie volumique, santé, cerveau, cœur artificiel, transmission sans contact, transport.

Abstract

Electrical chain, from the production to the consumer, involves conversion, transmission and distribution. Generally, electricity plays a role of vector, balancing production and consumption, with a near-impossibility of direct storage. It is not a direct source of energy production such as oil, coal, gas, shale gas, biogas, wood, uranium, hydro and other renewables. Electricity is only to allow multiple final forms of energy consumption: work, electrochemistry, heating, transport, processing, etc. The fields of energy and communication meet cross roles.

Electricity is only marginally storable in a direct way (capacitors) or indirectly (pump-turbines, electrochemistry, H₂) with less than 80% efficiency.

The determination of hydro-pneumatic, electromagnetic and electrostatic energy densities, allows comparison and limits in the use of these various forms.

The direct contributions of electricity to health are already numerous: measures, diagnosis, surveillance, x-ray, NMR, MRI, stimulation and prostheses, audience, etc. Two examples are developed: the brain with the European Human Brain Project and the implantable artificial heart.

The indirect contributions to health are essentially the ability to better control pollution and nuisance, especially in the field of transport. New components are described with their potential, including the super-capacitors and contactless energy transfer to a flexible electric transportation.

Concrete examples are given on future solutions in the fields of health and transport.

Keywords

Electricity, storage, batteries, super-capacitors, energy density, health, brain, artificial heart, contactless energy transfer, transport.

1. Électricité – vecteur énergétique

Pour mieux appréhender les éléments décrits par la suite, il est nécessaire de rappeler quelques éléments intrinsèques au domaine de l'électricité.

Il n'existe ni puits ni mines d'énergie électrique : à l'exception de la conversion photovoltaïque, elle résulte exclusivement de la conversion électromécanique d'énergie potentielle d'origine solaire (hydraulique, éolienne) ou de conversion thermomécanique (pétrole, charbon, gaz, nucléaire).

Ses atouts sont :

- sa facilité de transport et de distribution, en adaptant le niveau de tension ;
- son caractère propre et non polluant ;
- sa facilité de conversion en de nombreuses autres formes avec un bon rendement : travail,

chaleur, électrolyse, lumière, traitement de l'information, etc.

Outre l'inconvénient de ne pas exister naturellement de façon exploitable, elle est difficilement stockable de façon directe.

On a coutume de subdiviser son usage en deux grands domaines :

- l'énergie ;
- le traitement de l'information et la communication.

Les deux sont cependant fortement liés, le traitement de l'information consommant de plus en plus d'énergie, en particulier par les grands serveurs informatiques. Par ailleurs, les systèmes électroniques de mesure et de communication contribuent fortement à la gestion des réseaux et aux domaines tels que machines-outils et robotique.

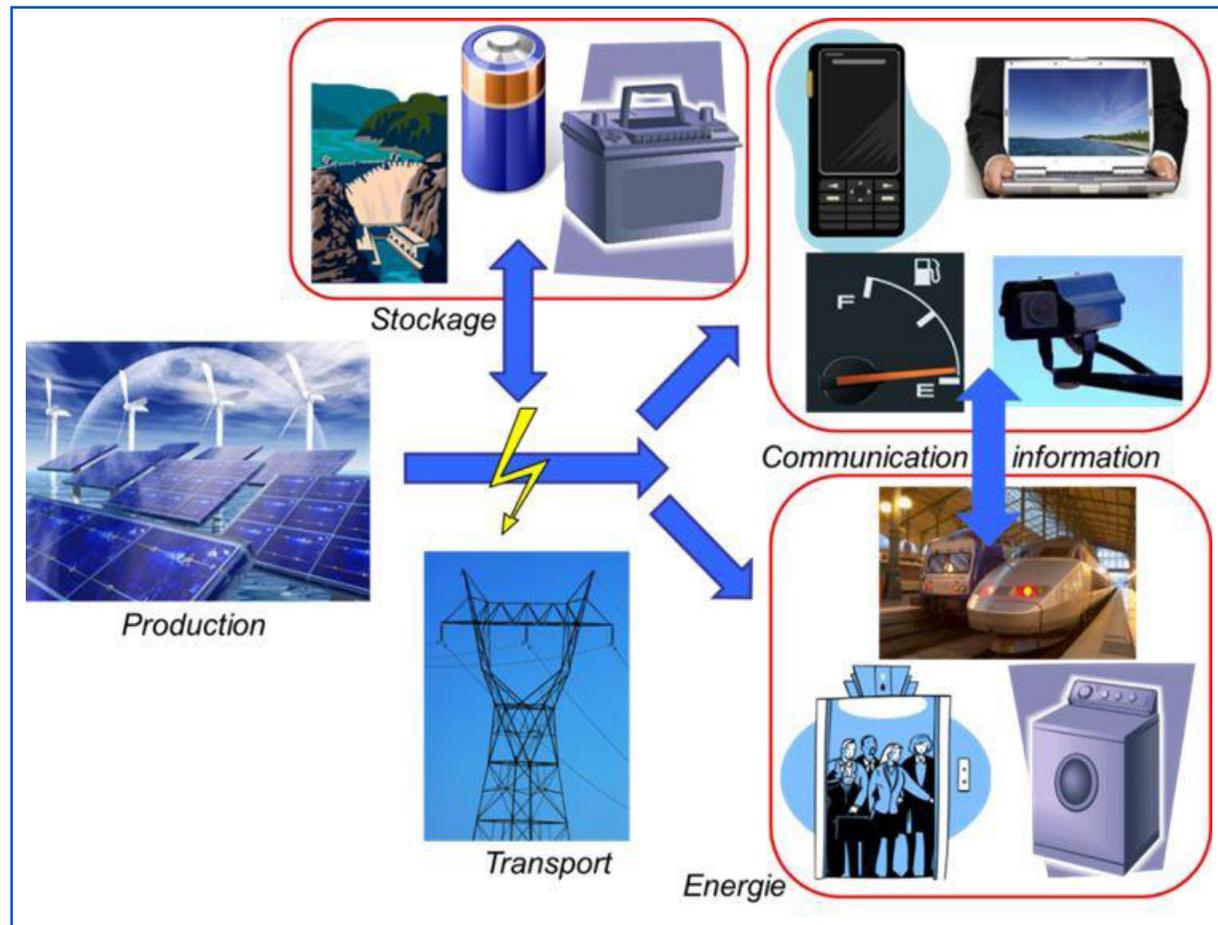


Figure 1

Électricité, vecteur entre production et utilisation comme énergie ou système de traitement de l'information (source : M. Jufer).

Electricity, vector between production and use as energy or information processing system.

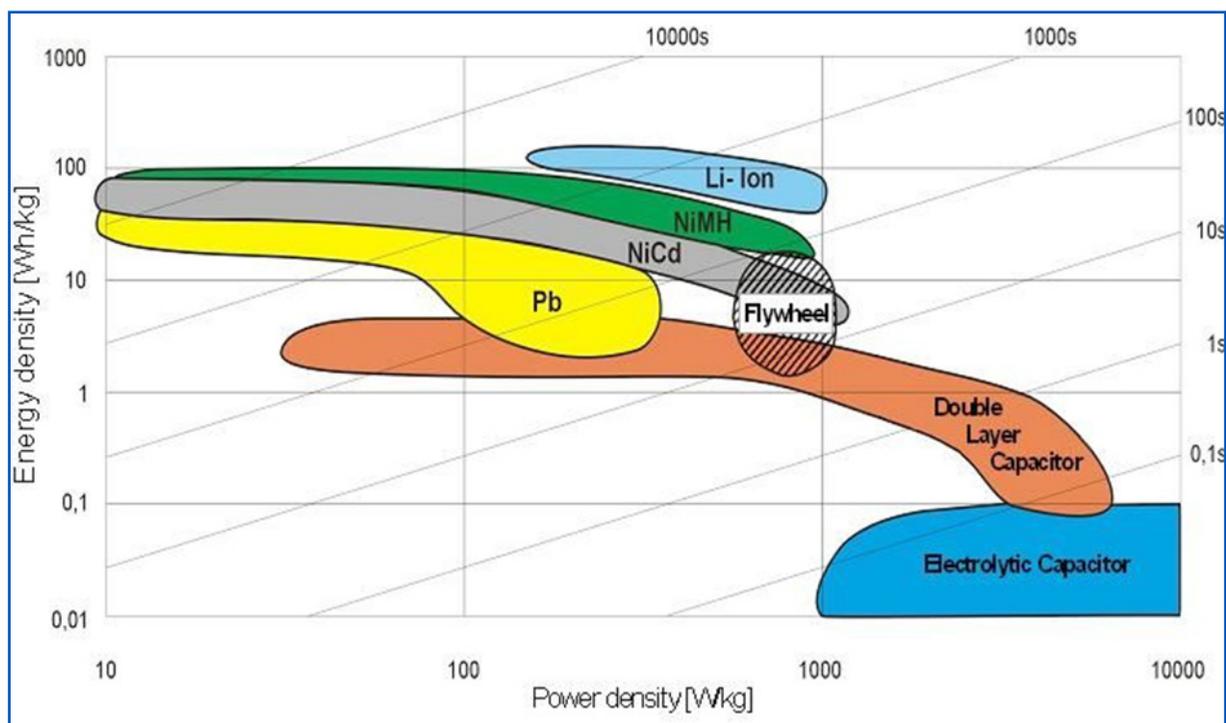


Figure 2

Comparaison des densités énergétiques et des puissances massiques des principales batteries et des supercondensateurs (source : ika.rwth-aachen.de).

Comparison of energy densities and mass powers of main batteries and super-capacitors.

L'énergie électrique ne conserve cependant pas l'exclusivité en matière d'application pratique par deux limites physiques et techniques :

- la difficulté et les limites du stockage direct et indirect ;
- les limites d'énergie volumique.

2. Stockage et énergie volumique

La seule possibilité de stockage direct de l'énergie électrique est la charge de condensateurs et plus particulièrement de supercondensateurs recourant à la nanotechnologie du carbone. Si les énergies volumiques ou massiques restent faibles comparées aux batteries, en revanche les puissances volumiques sont nettement plus élevées que pour les meilleures batteries, permettant des charges et décharges ultrarapides (figure 2).

Les principales possibilités de stockage indirect sont :

- le stockage sous forme potentielle de gravitation par le pompage-turbinage hydraulique. Les

rendements globaux actuels sont de l'ordre de 80 %, ce qui offre des potentialités intéressantes en termes d'heures de creux et heures de pointe. Un pays comme la Suisse est en train d'étendre son réseau dans ce domaine (figures 3 et 4) ;

- le stockage sous forme électrochimique dans des batteries (acide-Pb, Ni-Cd, Li-ions, etc.) ;
- la chaîne de stockage de l'hydrogène : Électrolyse de l'eau – H₂ – pile à combustible – électricité et eau.

Tout système de conversion permettant de générer un travail (moteur, vérin, piston, etc.) peut être caractérisé par son énergie volumique ou sa pression ($J/m^3 = N/m^2$). Pour fixer les ordres de grandeur, une comparaison peut être faite entre trois systèmes :

- hydropneumatique ;
- électrostatique ;
- électromagnétique.

La figure 5 en montre des dispositions possibles.

Le système hydropneumatique peut atteindre des pressions maximales de l'ordre de 400 bar, soit $w_p = 4 \cdot 10^7 J/m^3$.

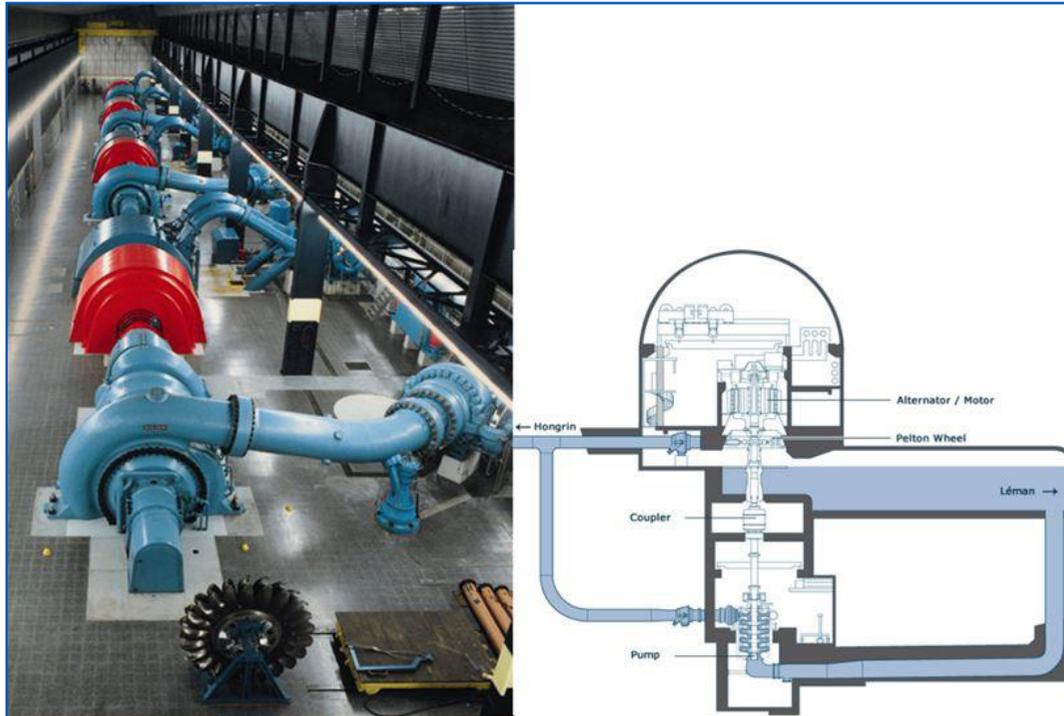


Figure 3

Centrale de 240 MW (1968). Extension de 240 MW (en cours).
 Centrale de pompage-turbinage de Veytaux entre les lacs Léman et de l'Hongrin. Différence de niveau de 870 m – Énergie potentielle de 8,5 kJ/kg ou 2,4 Wh/kg (source : Alpiq.com).
 240 MW power plant (1968) Extension of 240 MW (in progress). Pump-turbine power plant of Veytaux between Geneva's and Hongrin's lakes.
 Level difference of 870 m - energy 8.5 kJ/kg or 2.4 Wh/kg

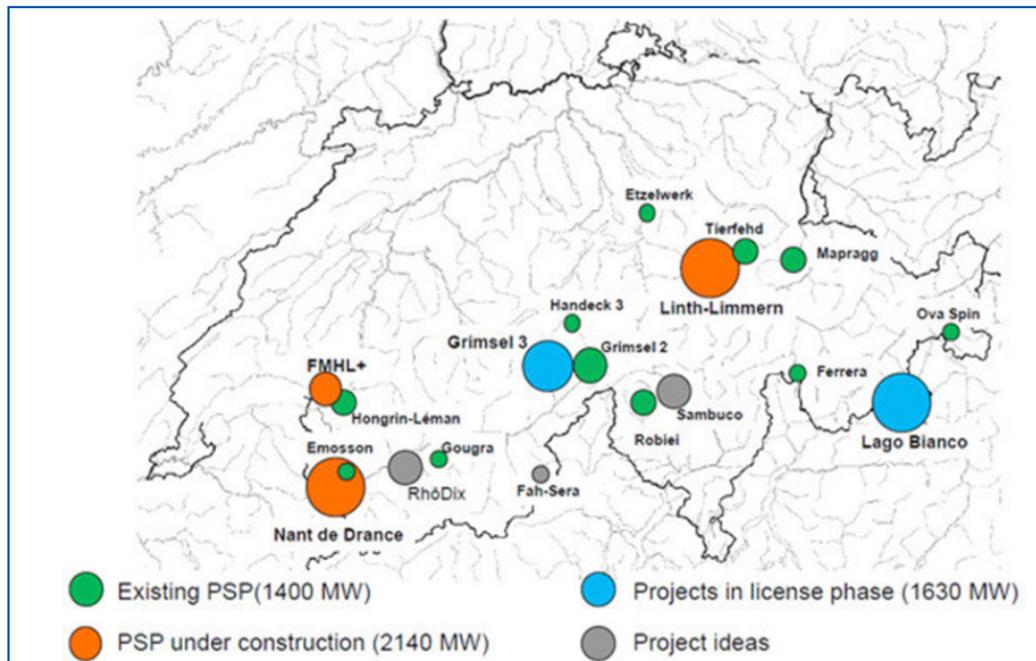


Figure 4

Sites de pompage-turbinage en Suisse, existants, en construction et en projet (source : Le matin.ch).
 Pump-turbine sites in Switzerland, existing, under construction and projected.

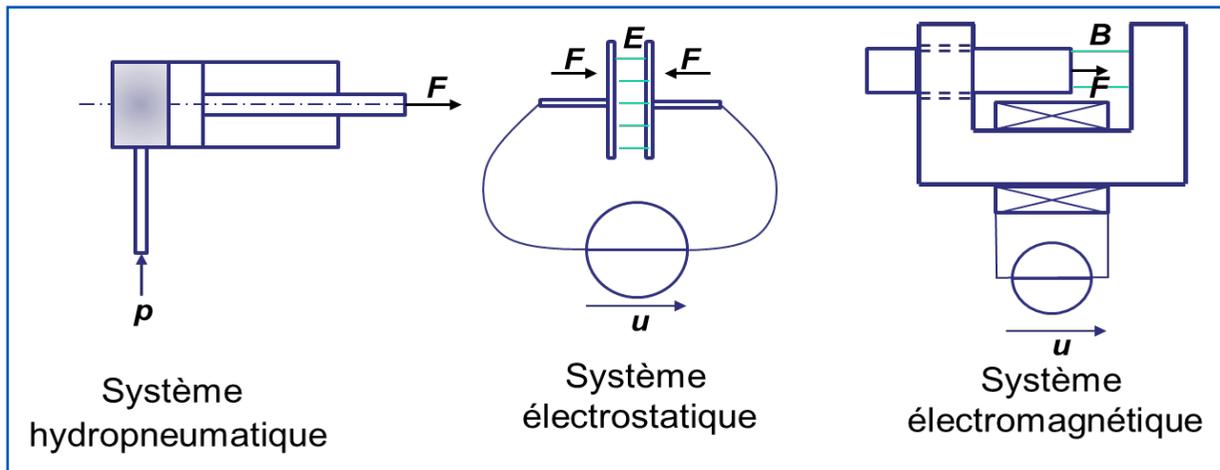


Figure 5

Composants élémentaires de génération de travail (source : M. Jufer).

Basic components of work generation.

3. Électricité et santé – Action directe

Pour un système électrostatique dans l'air, un champ électrique maximum de 3.106 V/m est une limite. Il en résulte l'énergie volumique suivante :

$$w_{es} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = 40 \frac{J}{m^3}$$

$$w_{es} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = 40 \frac{J}{m^3}$$

Pour un système électromagnétique, une induction de 1 à 1,5 T est courante. Il en résulte l'énergie volumique suivante :

$$w_{em} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} = 4 \text{ à } 9 \cdot 10^5 \frac{J}{m^3}$$

$$w_{em} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} = 4 \text{ à } 9 \cdot 10^5 \frac{J}{m^3}$$

Clairement, le système électrostatique ne convient pas à la conversion électromécanique. Si un système hydropneumatique peut être de 40 à 100 fois plus performant qu'un système électromagnétique, il souffre de l'inconvénient de la création de la pression par un combustible sur le système lui-même ou par un moteur électrique et une pompe.

L'analogie entre homme et système électrique est duale pour deux aspects (figure 1) :

- Le système nerveux, avec le cerveau comme serveur central, analogue à la communication et au traitement de l'information. Luigi Galvani a été le premier à mettre en évidence ces propriétés par ses expériences sur les grenouilles.

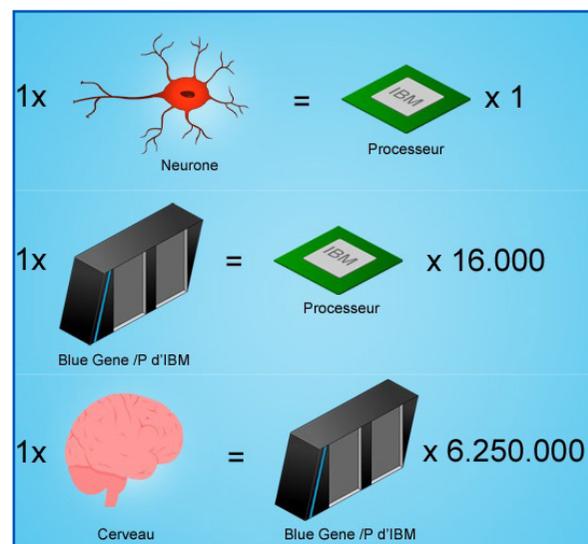


Figure 6

Modélisation d'un neurone, du projet européen Human Brain Project³ et du cerveau par des processeurs actuels (source : EPFL).

Modelling of a neuron by the European Human Brain Project and of the brain by current processors.

Il est logique que de nombreuses applications dans le domaine médical agissant sur le système nerveux recourent à l'électricité. C'est en particulier le cas pour la lutte contre la douleur et la stimulation musculaire. De nombreux recours au traitement de l'information permettent le diagnostic (rayons X, IRM, RMN), la mesure (capteurs implantés) et le monitoring (soins intensifs).

- Le système cardio-vasculaire, avec le cœur comme générateur et le sang comme vecteur, analogue à l'énergie électrique. C'est principalement pour suppléer aux déficiences physiques et permettre la rééducation que des aides électromécaniques offrent une contribution à la santé. On peut mentionner la robotique, l'exosquelette, des prothèses actives et de nombreuses aides chirurgicales.

Deux exemples de recherche de pointe permettent d'illustrer les potentialités.

Le projet européen Human Brain Project², dont l'EPFL est le leader avec 79 partenaires institutionnels en Europe, a pour but de modéliser des parties du cerveau. L'objectif est scientifique



Figure 7

Expérience de guidage d'un robot par le cerveau d'une personne handicapée (source : EPFL-24 Heures).

[Guiding experience of a robot by the brain of a person with a disability.](#)

et médical, en visant une meilleure connaissance des maladies dégénératives du cerveau telles qu'Alzheimer et Parkinson. La figure 6 illustre les potentialités respectives d'un neurone, du cerveau et des processeurs actuels. En parallèle avec ces développements, des expériences de guidage de chaises roulantes et de robots par la pensée pour des paraplégiques est en cours (figure 7).

Un projet de cœur artificiel (Jufer *et al.*, 1992 ; Hahn *et al.*, 1991) datant de plus de 20 ans, mais toujours actuel, permet d'illustrer les potentialités et les limites techniques et économiques de l'électricité. Au début des années 80, plusieurs cœurs artificiels ont fait leur apparition aux USA. Ils étaient tous composés de deux ventricules externes indépendants, activés par de l'air comprimé, assurant la circulation sanguine au moyen de quatre cathéters à travers la peau (figure 8). La qualité de vie en résultant était très faible. Ces systèmes n'ont été utilisés pratiquement que comme ponts à la transplantation. Un projet suisse a assuré le développement d'un

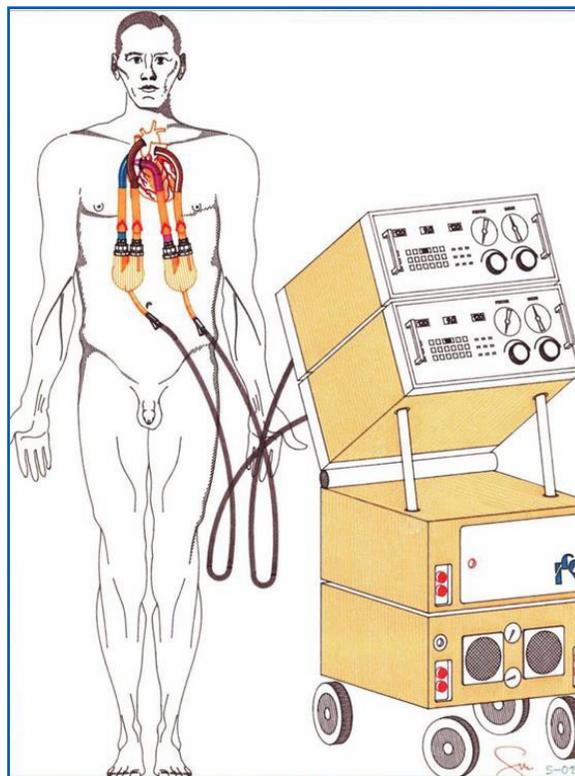


Figure 8

Ventricules artificiels externes activés par air comprimé (source : IRCV (fondation disparue)-EPFL, Sandrine Cabut, Le Monde).

[External artificial ventricles activated by compressed air.](#)

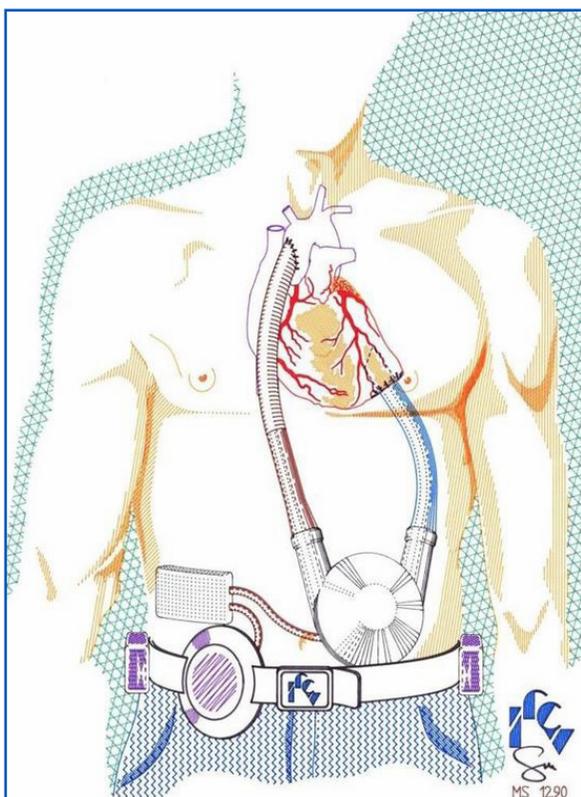


Figure 9

Ventricule artificiel électrique implanté alimenté sans contact à travers la peau (source : IRCV (fondation disparue)-EPFL).

Implanted electric artificial ventricle powered contactless through the skin.

ventricule (figure 9) et d'un cœur (figure 10) artificiels électromécaniques implantables, alimentés par une transmission d'énergie sans contact à travers la peau. La puissance électrique moyenne nécessaire pour activer un tel cœur pour un adulte est de l'ordre de 8 W, soit une énergie de 192 Wh par jour. Les meilleures batteries Li-ion ont des capacités de 100 à 250 Wh/kg. En conséquence, une batterie d'un kg suffirait pour une autonomie d'un jour.

Malgré les tests réussis *in vitro* et *in vivo*, le projet a finalement été abandonné en phase d'industrialisation, à cause des coûts de validation et d'implantation.

Récemment, le 18 décembre 2013, un patient a été doté d'un cœur artificiel dit Carmat, développé en France sous la direction du professeur Alain Carpentier depuis 1988 (Cabut, 2013a, 2013b). Il se différencie par l'usage d'un fluide hydraulique comprimant alternativement les ventricules gauche et droit au moyen de deux pompes intégrées. Aucune information n'a été

donnée concernant l'alimentation électrique.

4. Électricité et santé – Action indirecte

4.1 Énergie électrique et pollution

L'électricité, vecteur énergétique, ne pollue pas, et la plupart de ses formes de conversion sont peu bruyantes. À ce titre, elle est idéale quant à ses applications. En revanche, la production d'énergie électrique est souvent polluante, en particulier les centrales au fuel et au charbon. Cependant, il est plus facile de prévenir la part la plus nuisible pour la santé dans une grande centrale que pour des consommateurs de faible puissance en grand nombre, comme l'ensemble des moteurs diesel de camions, de voitures et de machines de service. Ceci plaide donc en faveur d'un usage accru de l'énergie électrique pour des applications utilisant actuellement des énergies directes polluantes.

4.2 Véhicules électriques

De nos jours, un véhicule électrique est principalement équipé avec des batteries (plomb, Ni-Cd, Li-ions, etc.), un moteur électrique avec transmission, une commande avec électronique de puissance et un système de charge de la batterie.

Les principaux avantages de cette technologie par rapport à un véhicule à moteur à essence ou diesel sont :

- pas de pollution locale et pratiquement aucun bruit ;
 - un couple de démarrage élevé (pas d'embrayage) et un moteur souple ;
 - des coûts énergétiques plus faibles et une économie d'énergie fossile
- Cependant, quelques inconvénients importants sont à considérer :
- le poids, le coût et la durée de vie limitée des batteries ;
 - l'autonomie faible comparée à un réservoir d'essence ;
 - le temps important de recharge des batteries.

Ces aspects limitent les possibilités d'une voiture électrique pour remplacer une voiture à essence ou diesel.

De nombreuses applications de transport ne

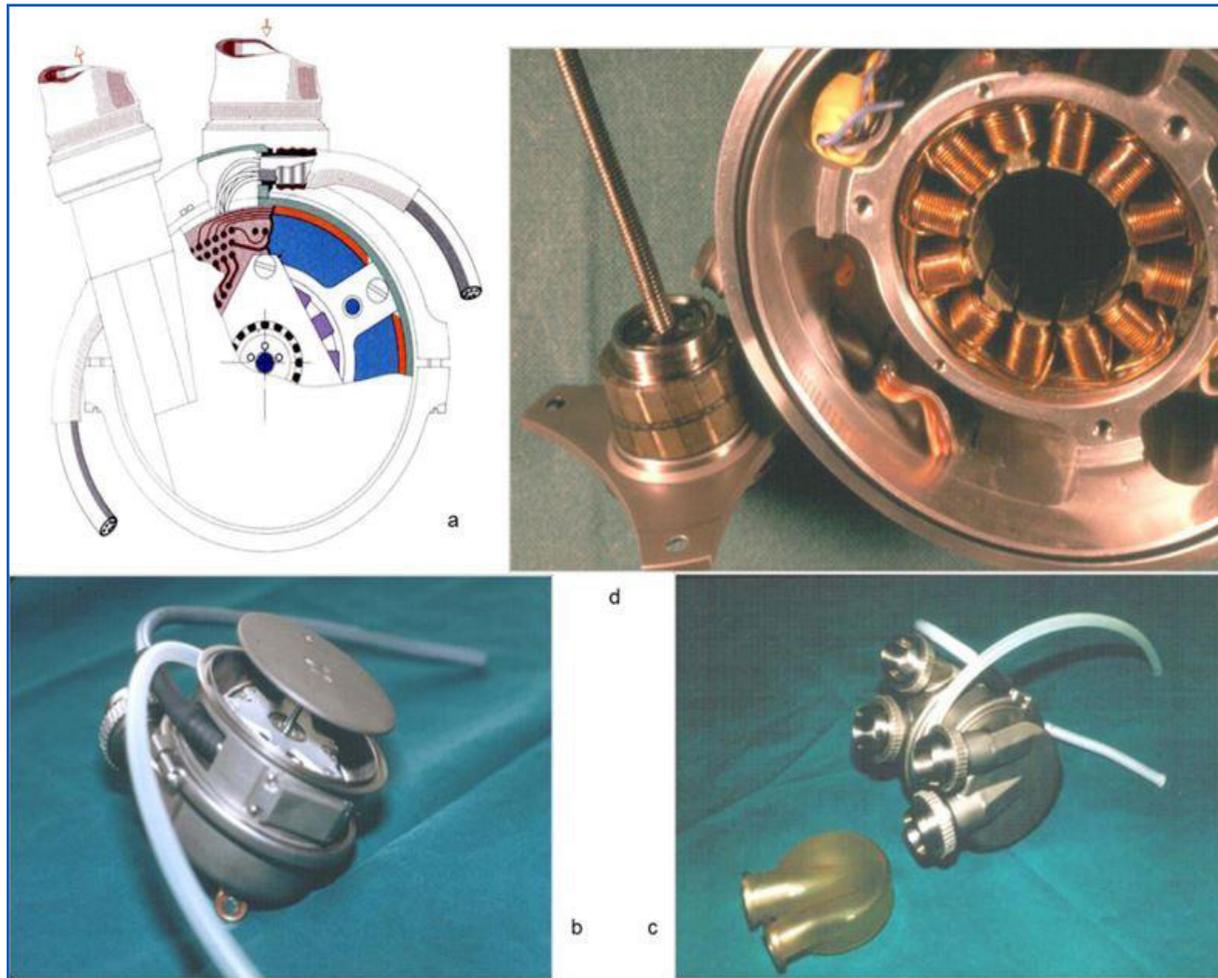


Figure 10

Cœur artificiel électromécanique implantable pour un veau
(source : IRCV (fondation disparue)-EPFL).

a. dessin – b. cœur et plateau activateur – c. cœur et ventricule –
d. stator et rotor du moteur et vis d'activation.

[Implantable electromechanical artificial heart for a calf.](#)

[a. drawing – b. heart and activator pusher plate – c. heart and ventricle –
d. motor stator and rotor with activation screw.](#)

nécessitent pas une autonomie importante avec de nombreux arrêts, généralement pour le transport de passagers et de marchandises dans les villes.

Les technologies proposées ci-après offrent la possibilité de réduire les problèmes les plus importants des véhicules électriques et ainsi d'accroître leur champ d'applications.

4.3 Nouvelles technologies et composants

Les principales propositions de nouvelles technologies et de composants sont :

- la transmission d'énergie électrique sans contact (Jufer, 2008 ; Jufer *et al.*, 1996), composée d'un bobinage fixe, sur ou dans le sol, alimenté par un convertisseur de fréquence élevée et d'un enroulement placé sous le véhicule. Ainsi, un véhicule peut être chargé sans raccordement de câble, simplement en étant positionné au-dessus de la bobine au sol (figure 11). Le rendement peut être élevé, de l'ordre de 95 % entre le réseau et le véhicule (figure 12). De tels systèmes existent déjà pour des applications spécifiques, tels que cuisinières électriques à induction ou recharge de brosses à dents électriques.

Avantages : aucune connexion n'est néces-

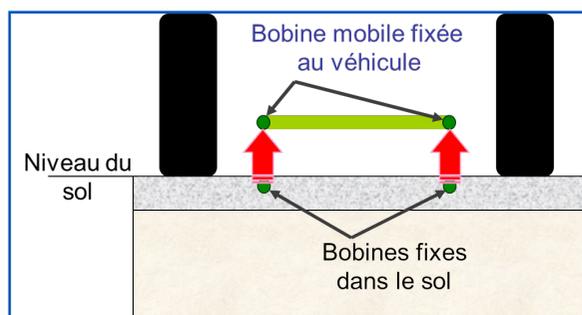


Figure 11

Principe de la transmission d'énergie électrique sans contact pour un véhicule (source : EPFL-Numexia (société disparue)).

Principle of contactless electrical energy transmission for a vehicle.

saire pour transférer l'énergie au véhicule, avec un rendement élevé ; bobine fixe dans ou sur le sol ; pas d'usure ni de maintenance.

Inconvénient : une telle transmission d'énergie s'accompagne d'un rayonnement électromagnétique. Celui-ci doit respecter les normes associées à sa fréquence. Si l'intensité dépasse le seuil prévu, un blindage magnétique associé au véhicule doit ramener les valeurs dans les limites (Parlement européen, 2013).

- les batteries électrochimiques dont l'énergie volumique croît progressivement, en particulier pour le Lithium-ions. Les chiffres donnés varient souvent selon qu'il s'agit de produits industriels ou de développements de laboratoires. Le principal inconvénient de ce type de batteries est leur mauvais fonctionnement au-dessous de 5 °C. Pour les batteries électrochimiques, l'énergie stockée est dans la plage de 40 à 250 Wh/kg. La puissance maximale réalisable est de 10 à 1 000 W/kg pour les batteries électrochimiques. Ces dernières valeurs correspondent à la puissance de crête de décharge et elles sont plus faibles pour la puissance de charge.

Avantage : stockage énergétique avec une autonomie de 50 à 200 km.

- les supercondensateurs (supercaps) dont l'énergie volumique est inférieure à celle d'une batterie, mais dont la puissance maximale est beaucoup plus élevée ; cela permet de charger en très peu de temps (5 à 30 s) une quantité importante d'énergie sur un véhicule. Ils sont déjà utilisés pour stocker de l'énergie électrique sur des bus. Une application est développée sur certaines voitures hybrides pour récupérer l'énergie en des-

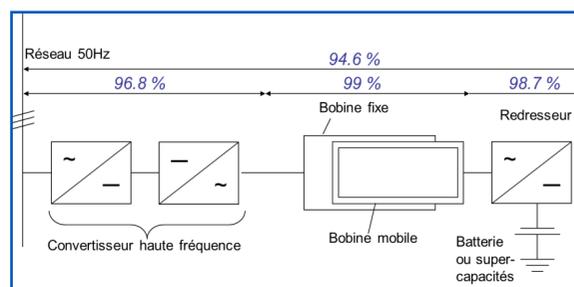


Figure 12

Composants et rendements d'une transmission d'énergie électrique sans contact de 120 kW (source : EPFL-Numexia (société disparue)).

Components and efficiencies of a 120 kW contactless electrical energy transmission.

cente ou au ralentissement. L'énergie stockée n'est que de 1 à 10 Wh/kg. En revanche, la puissance maximale disponible est importante : de 1 000 à 15 000 W/kg. Dans ce cas, les puissances de charge et de décharge sont les mêmes. Il est également important de préciser que les cycles de vie sont 10 à 100 fois supérieurs pour les supercaps.

Avantage : possibilité de stocker de l'énergie électrique en un temps très court (puissance élevée).

- moteurs roues qui peuvent être intégrés directement dans la jante, avec un rotor externe.

Avantage : plus de transmission avec des problèmes de maintenance ; plus de couple volumique ou massique (de 2 à 5 fois) par rapport à une solution à rotor interne ;

- intégration du moteur dans la jante.

Avantage : meilleure intégration et un guidage plus efficace.

Guidage automatique et localisation de véhicules, sans chauffeur. Le coût d'exploitation du véhicule repose principalement sur les salaires des chauffeurs. Pour des véhicules à basse vitesse, un guidage automatique et un système de positionnement, combinés avec une vision laser, peuvent être réalisés avec haute sécurité et fiabilité, jusqu'à 30 km/h.

Avantage : extension des possibilités d'application et de services ; économie des coûts d'exploitation.



Figure 15

Véhicule automatique de manutention de conteneurs
(source : EPFL-Numexia (société disparue)).
Automatic container handling vehicle – prototype.

- système de gestion de l'énergie, qui contrôle, transforme et adapte l'énergie électrique du véhicule au système de chargement, à la batterie, aux supercaps et aux moteurs. Il est composé de dispositifs de contrôle, de communication et d'électronique de puissance.

Avantages: souplesse et performances

À la figure 13, ces principaux nouveaux composants sont illustrés. Ils sont tous utilisables sur le même véhicule ou indépendamment. Toutefois, la transmission d'énergie sans contact doit être utilisée avec supercaps et/ou batteries. Il est également possible de combiner ces technologies avec des véhicules hybrides (moteurs électriques, Diesel + générateur).

4.4 Nouveaux véhicules

En utilisant principalement les technologies de stockage de l'énergie sur supercaps, (combinées ou non avec des batteries), chargées par une transmission d'énergie sans contact, il est possible d'imaginer différents véhicules avec assez d'autonomie entre le chargement à des stations éloignées de 100 m à 2 000 m en un temps de 10 à 30 s.

À la figure 14 (de la gauche, dans le sens horaire), différentes applications sont proposées :

- trolleybus sans caténaire sur toute la ligne, sur un prolongement de la ligne ou dans les centres historiques des villes ;
- tramways ;
- bus électriques ou hybrides ;

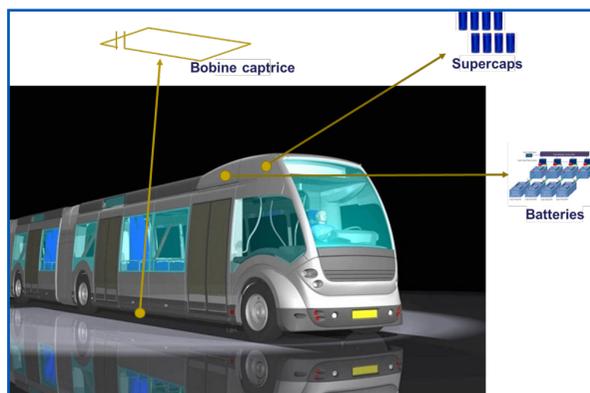


Figure 16

Bus électrique à recharge sans contact
(source : M. Jufer).

Electric bus with contactless loading system.

- véhicules de sécurité ;
- véhicules à guidage automatique pour manutention de conteneurs dans les ports ;
- monorails ;
- véhicules de livraison dans les villes (généralement hybrides) ;
- pousseurs d'avions ;
- véhicules électriques de service (nettoyage, maintenance, etc.) ;
- petits véhicules automatiques de transport de passagers.

4.5 Applications existantes ou en développement

Trois exemples en cours de développement sont décrits ci-après :

Véhicule automatique de manutention de conteneurs (figure 15). Prototype équipé de



Figure 17

Navette automatique Navia (photo : M. Jufer).
Automatic shuttle Navia.

supercaps avec recharge sans contact, destiné à de grands ports ; autonomie de 1 500 m.

Bus électrique (figure 16), intégrant une combinaison de batteries et de supercaps, rechargées avec ou sans contact en stations. Réalisations en Chine, prototypes en Allemagne et en Suisse.

Navette automatique (figure 17). Véhicules automatique NAVIA (Induct, <http://induct-technology.com/>) d'une capacité de 4 à 8 passagers, intégrant les principales technologies proposées, qui pourrait trouver une large gamme de domaines d'application :

- rues piétonnes et commerçantes ;
- campus universitaires ou de grandes entreprises ;
- liaisons entre terminaux aéroportuaires ;
- grands centres d'exposition ;
- grands parkings ;
- parcs d'attraction, etc.

Conclusion

L'électricité, par ses qualités intrinsèques, offre de nombreuses potentialités d'apport à la santé et à la qualité de vie. Outre ce qui existe, des développements en cours dans les domaines neurologiques, du diagnostic continu, des organes artificiels et de la rééducation sont déjà prometteurs.

Mais c'est aussi en matière de contribution indirecte de l'électricité, par réduction de la pollution et des nuisances, que la plus grande potentialité existe.

Comme l'ensemble des contributions à ce thème l'a montré, c'est par le recours à tout un ensemble de mesures préventives associées à un choix judicieux de technologies et en s'interdisant certaines d'entre-elles que l'on parviendra à l'objectif : l'amélioration de la qualité de vie sans altération du climat.

1. Professeur honoraire de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, marcel.jufer@epfl.ch
2. <https://www.humanbrainproject.eu/>
3. Jufer, 1998.

Références

- Cabut S. (2013a). Première implantation d'un cœur artificiel total, *Le Monde*, 20 décembre.
- Cabut S. (2013b). Cœur artificiel, une prouesse made in France, éditorial *Le Monde*.
- Hahn C., Galletti P-M., Jufer M. *et al.*, (1991). *Du cœur mystique au cœur mécanique*, Lausanne, Éditions 24 Heures.
- Jufer M. (1998, [1979, 1995]). *Electromécanique*, PPUR, 384 p.
- Jufer M., Pillon M., Odermatt R., (1992). *Technical aspects of a total electromechanical heart*, *Artificial Heart - The Development of Biomation in the 21st Century*, Yukiyasu Sezai, MD, FACS, Nihon University, Tokyo, p. 81-88.
- Jufer M. (2008). *Electric Drive System for Automatic Guided Vehicles Using Contact-free Energy Transmission*, EPE-PEMC, Poznan, 6 p.
- Jufer M., Perrottet M., Macabrey N. (1996). "Contactless Energy Transmission for Electric Drives", *EPE Chapter Symposium on Electric Drive Design and Applications*, Nancy, Juin, p. 7-12.
- Parlement Européen. (2013). Directive L 179 2013/35/UE du parlement européen et du Conseil du 26 juin concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (champs électromagnétiques), abrogeant la directive 2004/40/CE.