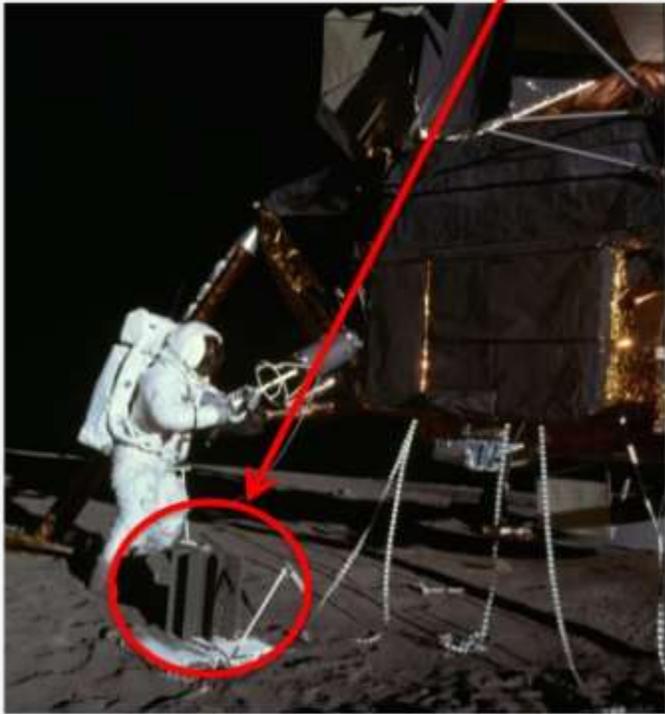


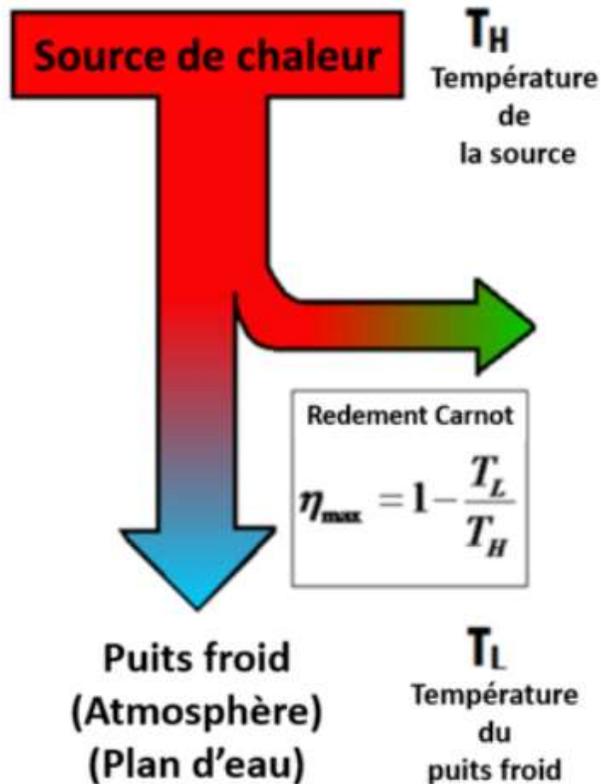
*BUT 3 – La thermoélectricité et les  
matériaux thermoélectriques*

# Introduction à la thermoélectricité

1971: Apollo 14 mission, SNAP RTG



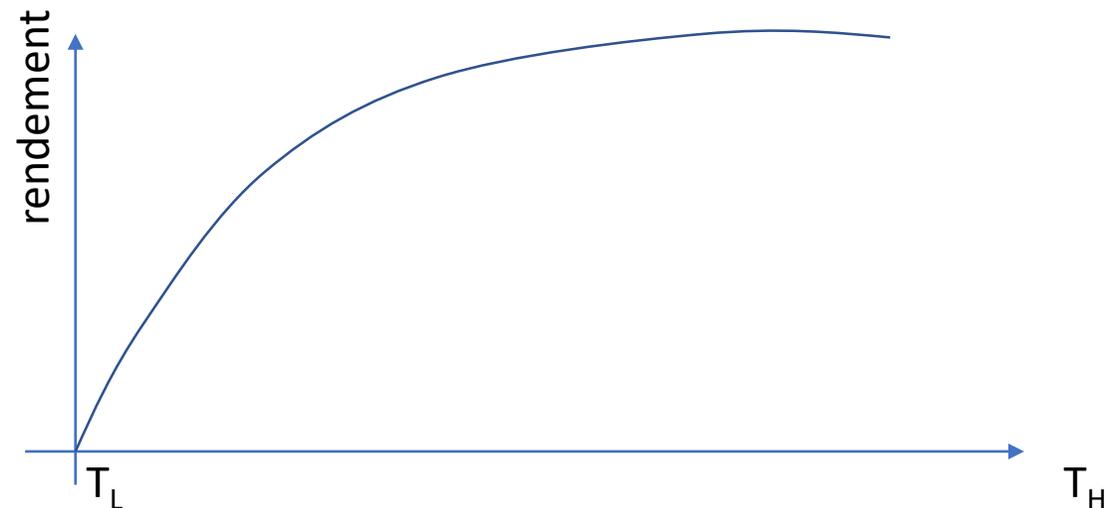
# La transformation d'énergie pour l'utilisation humaine - Rendement de Carnot



La plupart des systèmes énergétiques récupèrent l'énergie en passant par une forme thermique.

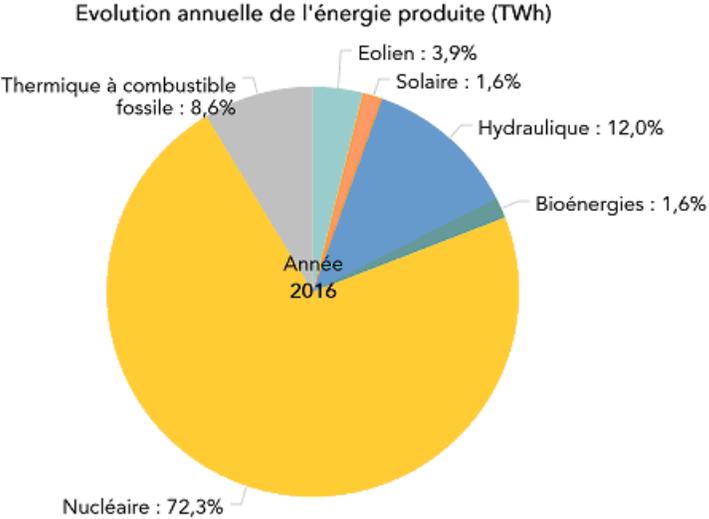
On transforme alors une différence de température entre un corps chaud et un corps froid en une énergie utilisable (énergie mécanique ou électrique)

Le rendement maximum qui est fixé par la thermodynamique est donné par le rendement Carnot



Examples?

# La production d'énergie électrique en France 2016 - 2024



Vent :

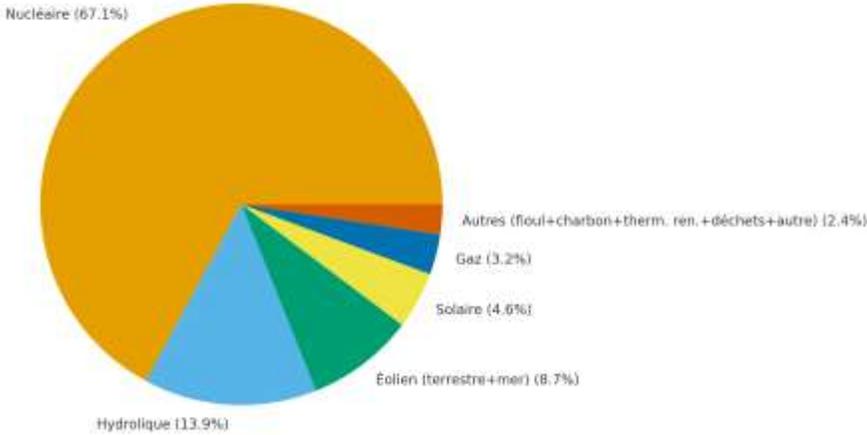
= indirectement du thermique  
(masses d'air chauffées par le soleil )

Hydraulique :  
= indirectement du thermique  
(humidité au sol chauffée par le soleil, qui retombe en pluie)

Nucléaire /Thermique/Biomasse

= Directement du thermique  
(machine thermique pour convertir)

Production électrique France — Répartition par filière (TWh) — 2024 (RTE)



**France**  
 agrégé 2 septembre 2023

**35 g**  
 Intensité carbone  
 gCO<sub>2</sub>eq/kWh

**96%**  
 Bas carbone

**24%**  
 Renouvelable

Consommation Électrique | Emissions

**Production électrique moyenne par source**

Source	Production (MWh)
nucéaire	~30000
géothermie	~100
biomasse	~100
charbon	~100
éolien	~1000
solaire	~1000
hydro	~10000
stockage hydro	~100
stockage batterie	~100
gaz	~100
fuel	~100
inconnu	~100

**Intensité en carbone du dernier mois**  
 ↳ Ombre historique et OAP de prévision + marginal

**Origine de l'électricité dans les derniers 30 jours**  
 ↳ Ombre historique et OAP de prévision + marginal

Temporarily disabled for consumption. Switch to production view.

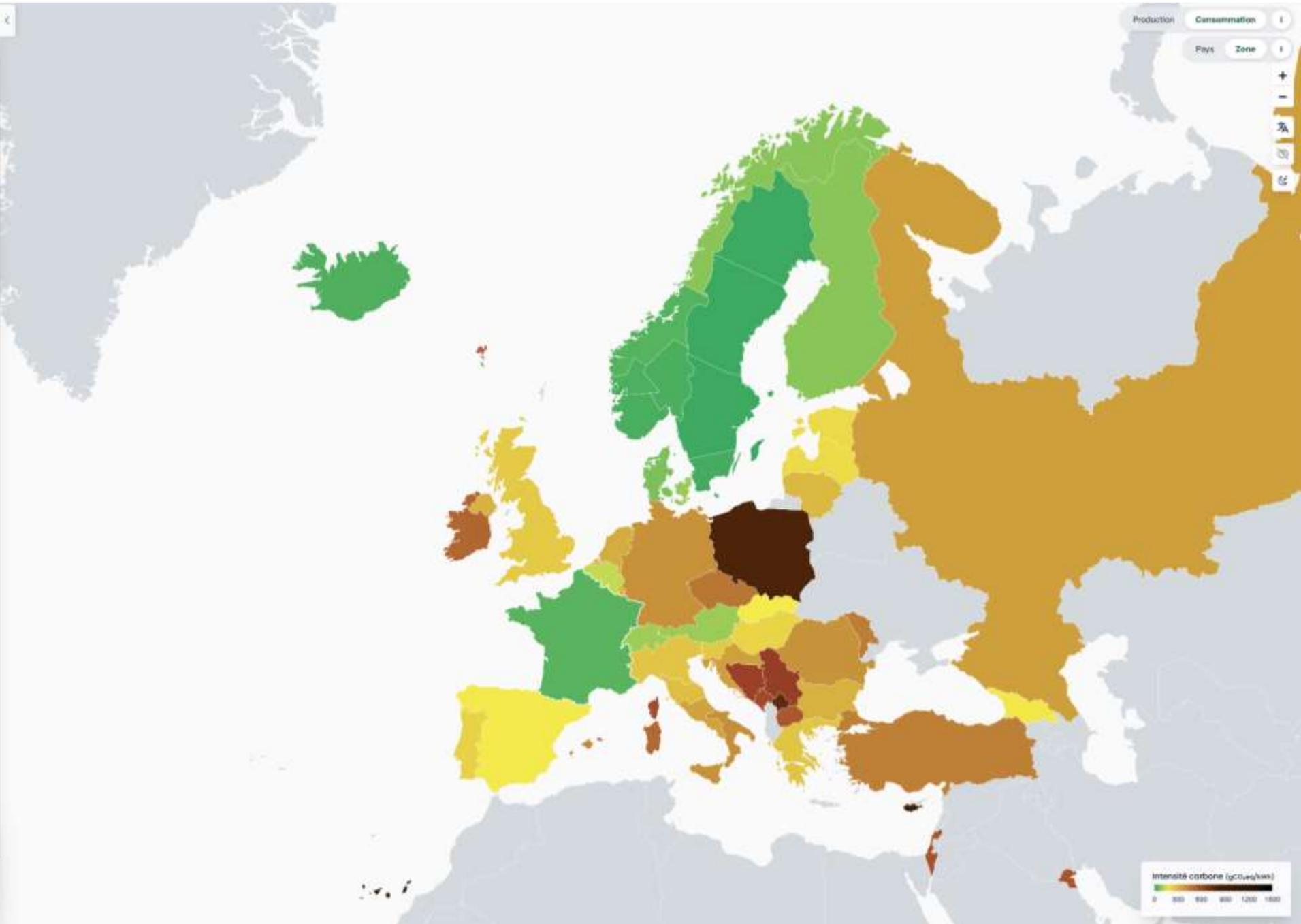
Les échanges sont pris en compte dans les calculs mais ne sont pas indiqués actuellement. En savoir plus sur notre agrégation historique.

**Prix de l'électricité dans les derniers 30 jours**  
 ↳ Ombre historique et OAP de prévision + marginal

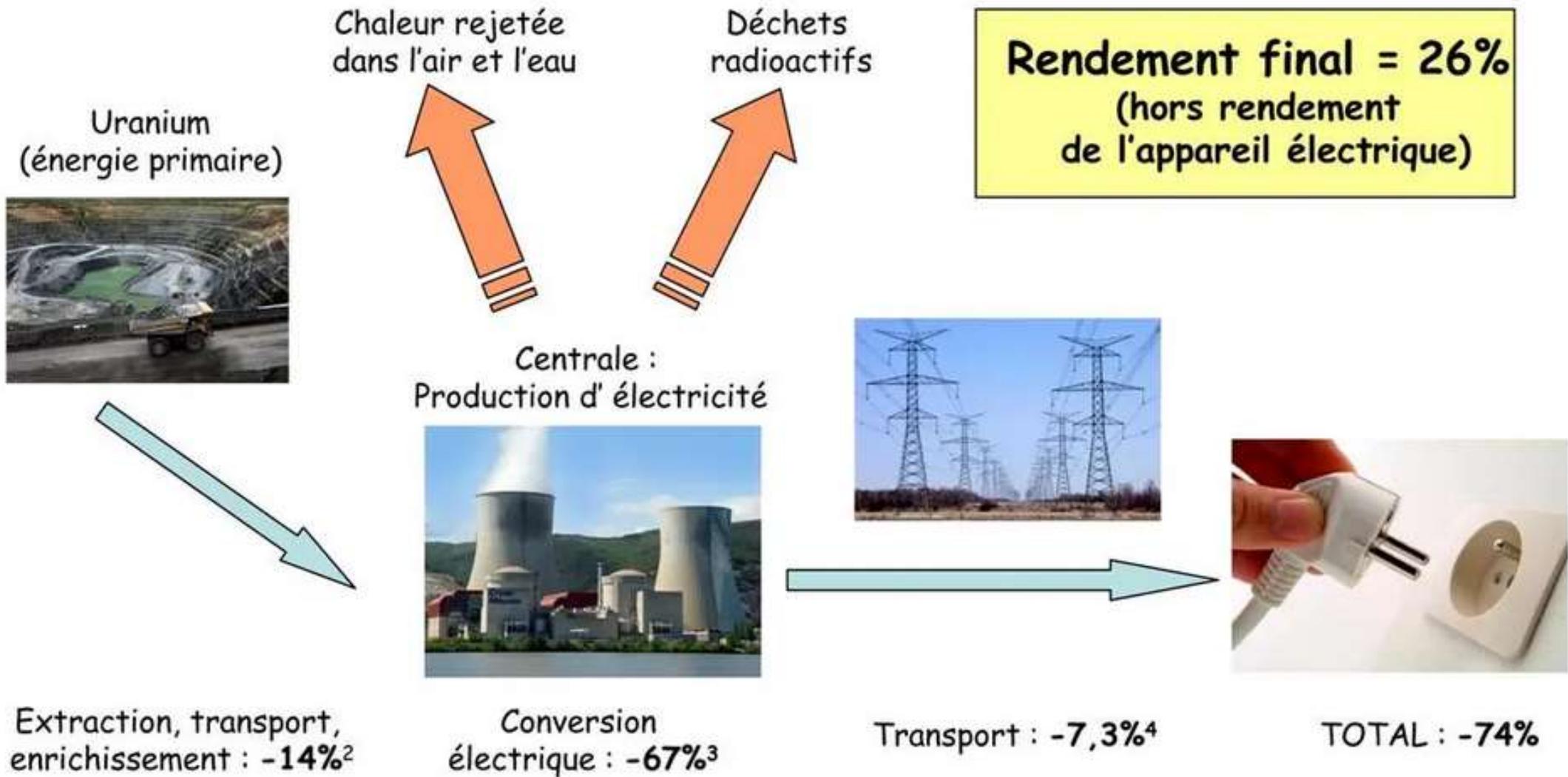
Pour des raisons de licence, les prix de l'électricité ne sont pas disponibles pour cette zone.

**Afficher les données passées** 2 septembre 2023

24 heures | 30 jours | 12 mois | 6 ans

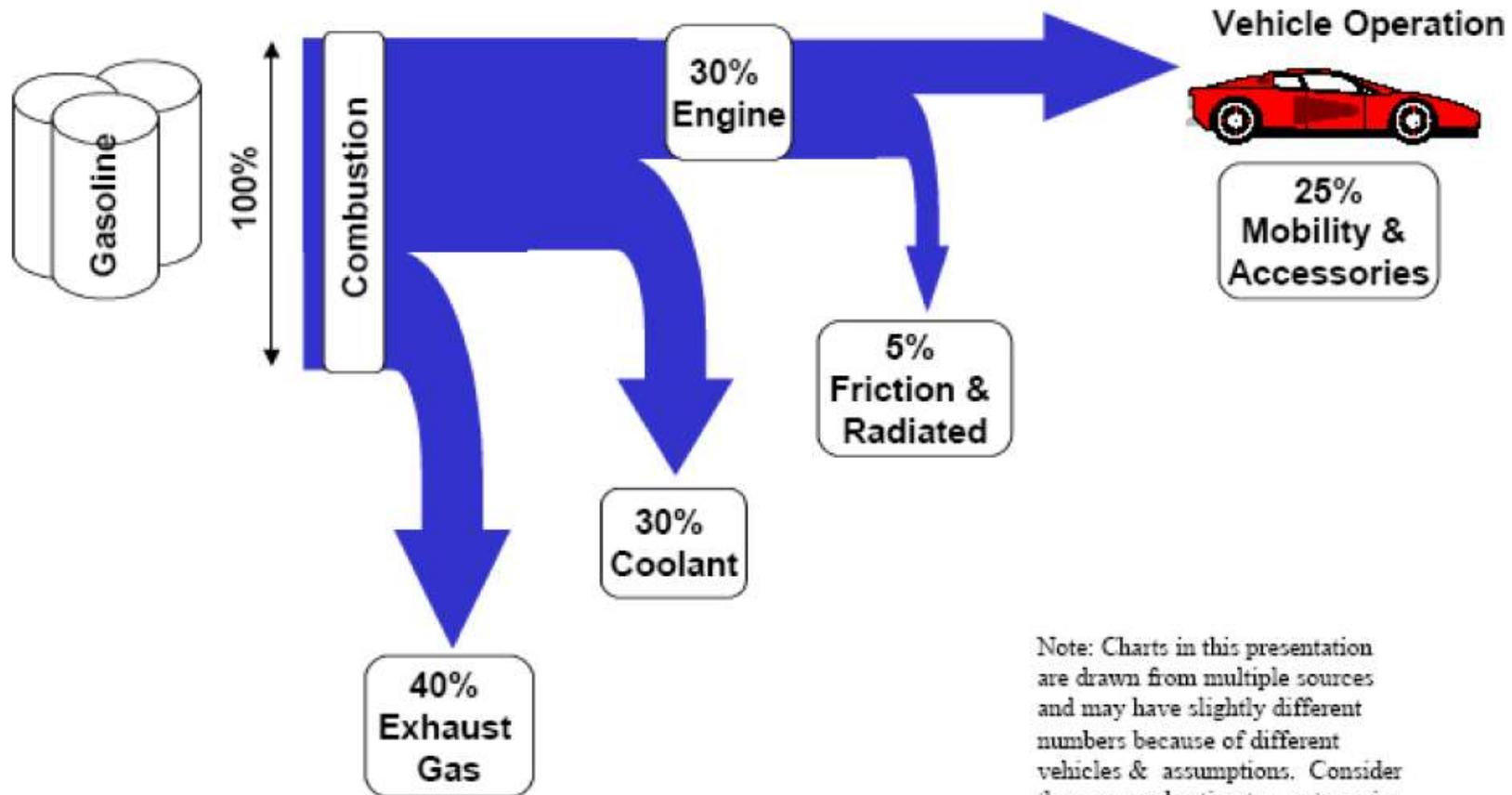


# Rendement de l'électricité thermique : exemple du nucléaire<sup>1</sup>



# Et les moteurs ?

## Typical Energy Path In Gasoline Fueled Internal Combustion Engine Vehicle



Note: Charts in this presentation are drawn from multiple sources and may have slightly different numbers because of different vehicles & assumptions. Consider them general estimates, not precise analysis.

# L'Hydrogène comme vecteur énergétique

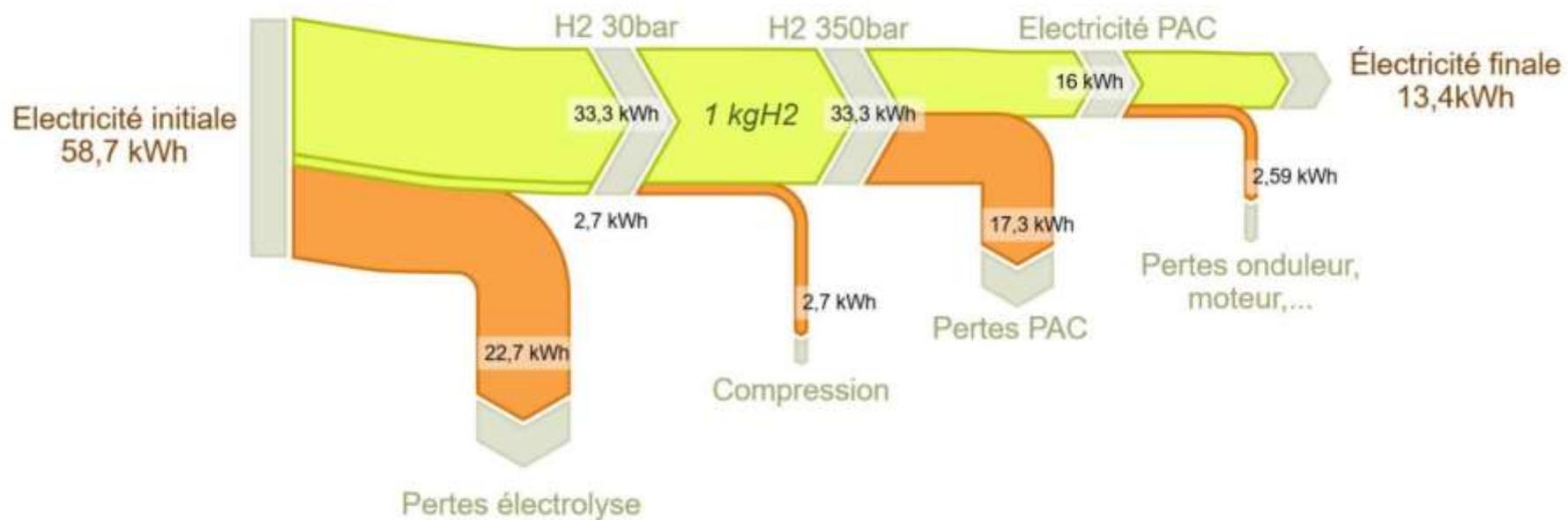
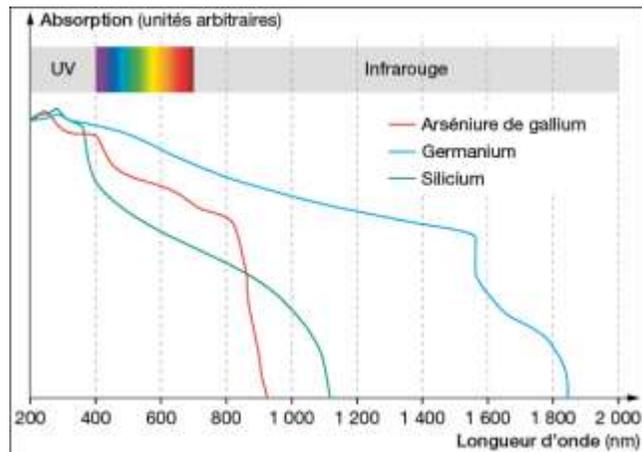
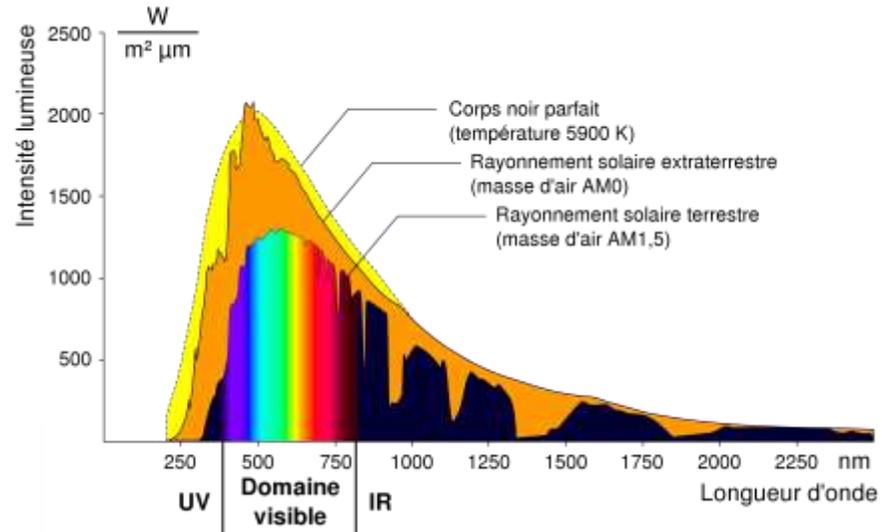


Figure 2 : Diagramme de Sankey, exprimant l'énergie nécessaire pour produire un kg d'hydrogène, ainsi que l'énergie électrique résultante.

# Rendement du photovoltaïque

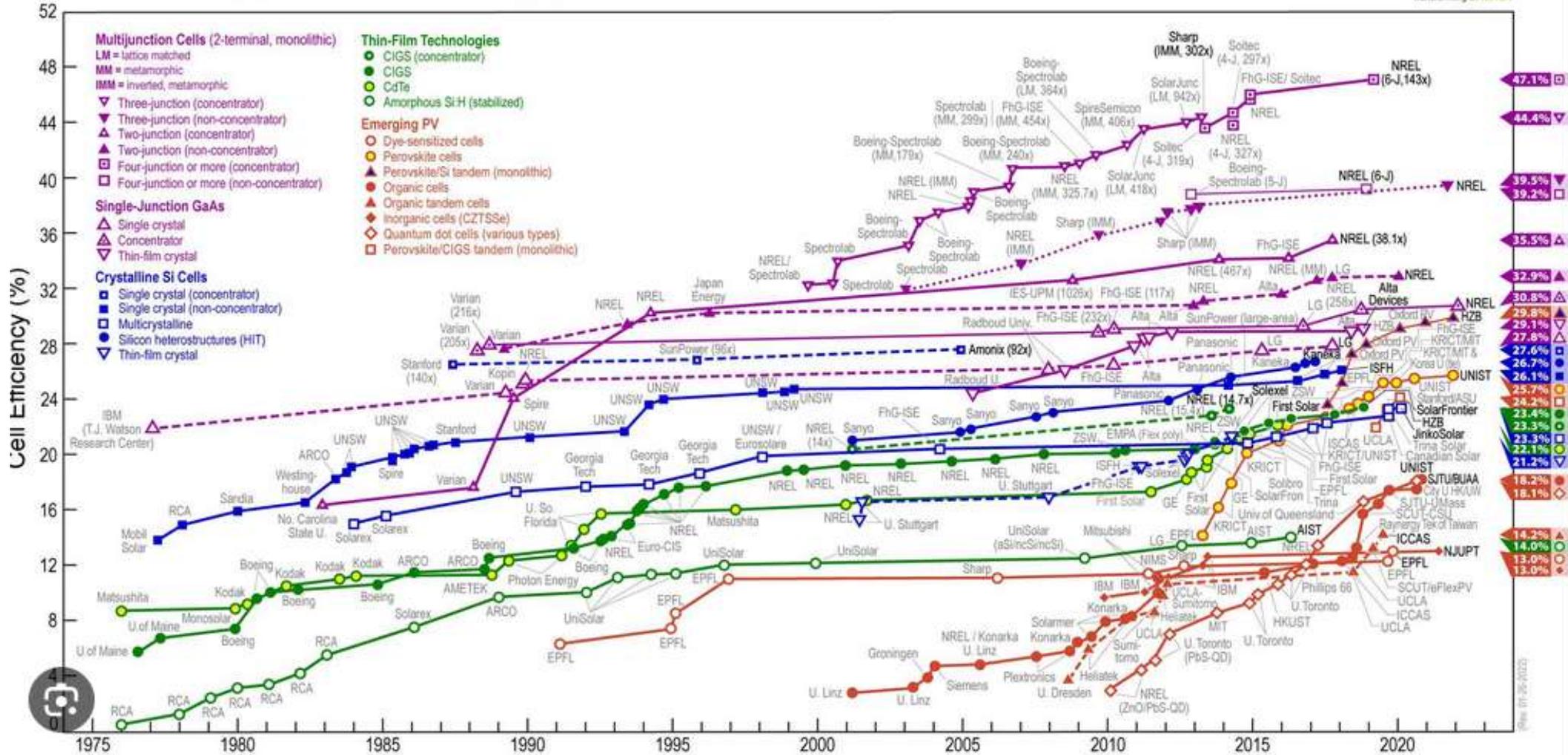


Le pur **Carnot thermique**  $1 - T_c/T_h \approx 95\%$  s'applique à une **machine à chaleur idéale** échangeant chaleur entre deux réservoirs. Une cellule PV, elle, doit respecter :

- la **quantification** des photons et le **seuil**  $E_g$  (photons sous  $E_g$  non utilisés, au-dessus  $E_g \rightarrow$  surplus dissipé),
- la **réémission radiative** inévitable (équilibre détaillé),
- l'**entropie du rayonnement** (pénalité d'angle solide sans concentration).

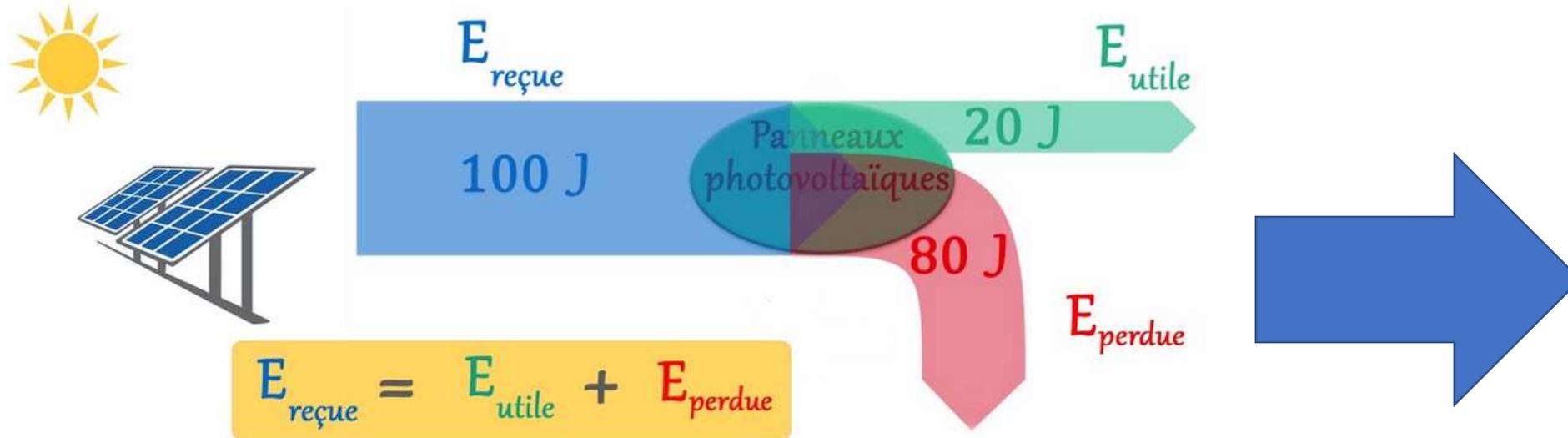
Ces contraintes « photon-spécifiques » font chuter l'efficacité maximale **monojonction** à  $\sim 33\%$  (sans concentration) et  $\sim 41\%$  (avec concentration maximale).

# Best Research-Cell Efficiencies



Rev. 01-26-2020

# Rendement du photovoltaïque



L'énergie perdue est transformée en Chaleur (ou réfléchi)

## Bilan énergétique

Exemple des panneaux photovoltaïques

# Conclusion

- Renouvelable, ou non renouvelable, la récupération d'énergie (utile pour les humains) est très inefficace...

Au final la majorité de l'énergie fournie par les sources de chaleur est perdue (entre 60 et 90%)

La récupération passe majoritairement par des machines thermiques (le Photovoltaïque est un cas particulier, la source chaude est le soleil à 3000°C)

L'utilisation de l'énergie produit de la chaleur qui est aussi une perte

Autre problème : comment se fournir en énergie dans les milieux extrêmes ?

\*C'est quoi un milieu extrême ?

# Exemple de la sonde spatiale

Distance Terre –Soleil ~150 millions de km

Distance Saturne –Soleil~1500 millions de km

Rayonnement solaire au-dessus de la terre  
~1400 W/m<sup>2</sup>

- Une sonde spatiale a besoin d'une source d'énergie de 200W pendant 4 ans, elle part de la terre et va jusqu'à Saturne
  - Peut-on utiliser (On justifiera par un raisonnement)
    - A) Une batterie ? (250 Wh/kg; Si oui de quelle capacité?). (Donner la réponse en kg). Quelle sont les limites techniques ?
    - B) Un générateur avec une réserve d'essence? (essence :12000 Wh/kg) Quelle sont les limites techniques ?
    - C) Un panneau solaire ? (dimension du panneau solaire; 1m<sup>2</sup> ~10kg – spatial ~3kg)

Très bien — voici un résumé des puissances électriques (valeur **début de vie** quand disponible, et **valeur actuelle** ou typique pour les missions lointaines) pour plusieurs sondes « longue distance ». J'ai mis les sources NASA / JPL / agences quand possible.

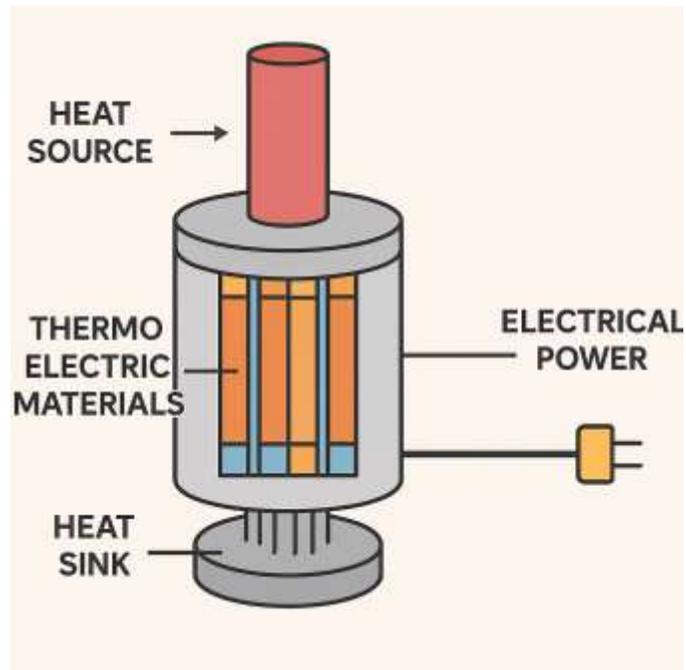
## Puissances électriques — sondes longues distances

Sonde	Source d'énergie	Puissance (début de vie)	Puissance actuelle / note
Voyager 1 & 2	3 × MHW-RTG	≈ 470 W total au lancement (=158 W/RTG). → Aujourd'hui ~225 W environ (valeur mesurée en 2023 pour l'ensemble). <a href="#">NASA Science</a> <a href="#">Wikipédia</a>	Les RTG déclinent ~4 W/an ; la mission éteint instruments chauffages pour économiser. <a href="#">jpl.nasa.gov</a>
New Horizons	GPHS-RTG (MMRTG-type)	≈ 213–245 W électrique au lancement (chiffres 213 W DOE / ~245 W mentionné par APL selon phase). <a href="#">The Department of Energy's Energy.gov</a> <a href="#">newhorizons.jhuapl.edu</a>	Une partie de la puissance est reconvertie pour le chauffage ; instruments individuels tirent quelques à quelques dizaines de watts. <a href="#">newhorizons.jhuapl.edu</a> <a href="#">Wikipédia</a>
Pioneer 10 / 11	SNAP-19 RTG (plusieurs unités)	≈ ~140–155 W combinés au passage de Jupiter (selon source). <a href="#">NASA Science</a> <a href="#">Wikipédia</a>	Dégradation au long cours ; le total a chuté fortement après plusieurs décennies (ex. ~65 W autour de 2001 pour Pioneer 10 selon historique). <a href="#">Wikipédia</a>
Cassini (Saturne)	3 × GPHS-RTG	≈ ~870–885 W électrique au lancement (= ~300 W/RTG). <a href="#">World Nuclear Association</a> <a href="#">awionline.com</a>	Fin de mission = ~633–663 W (décroissance à long terme). Tous les instruments ne pouvaient pas être alimentés simultanément. <a href="#">Space Exploration Stack Exchange</a> <a href="#">Wikipédia</a>
Juno (Jupiter, solaire)	Panneaux solaires (3 ailettes)	≈ ~500 W électrique utile à Jupiter (conception pour ~500 W à distance jupitérienne). <a href="#">jpl.nasa.gov</a> <a href="#">spacemath.gsfc.nasa.gov</a>	Juno a battu des records d'utilisation solaire loin du Soleil grâce à grandes aires de panneaux et optimisation. <a href="#">jpl.nasa.gov</a>
Rosetta (comète)	Panneaux solaires (64 m <sup>2</sup> )	~850 W à 3.4 AU ; ~395 W à 5.25 AU (données constructeur/mission). <a href="#">dlr.de</a> <a href="#">Wikipédia</a>	Puissance variable fortement avec la distance au Soleil — conception pour fonctionner bien au-delà de 3 AU. <a href="#">dlr.de</a>

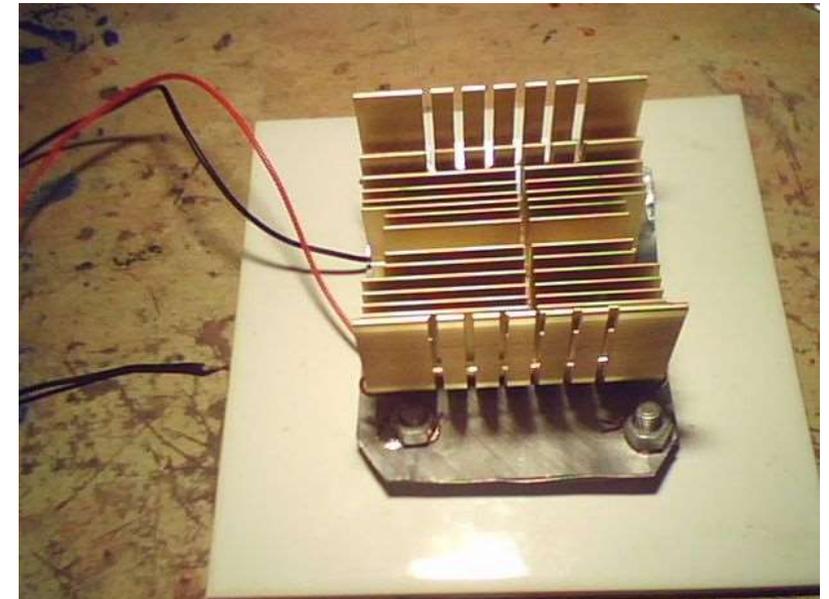
### Remarques utiles

- **BOL = Beginning Of Life** (puissance au lancement). Les RTG → décroissance douce gouvernée par la désintégration du Pu-238 et la dégradation des thermocouples ; on donne souvent aussi la valeur « actuelle » quand elle est accessible publiquement (ex. Voyager). [NASA Science](#) [Wikipédia](#)
- Les **instruments individuels** tirent typiquement de quelques watts (capteurs simples) à plusieurs dizaines de watts (caméras, spectromètres, radar). Les émetteurs radio en plein débit peuvent demander aussi plusieurs dizaines à centaines de watts selon le débit/antenne. (Sources mission / fiches instruments). [newhorizons.jhuapl.edu](#) [Wikipédia](#)
- Pour les sondes lointaines on distingue deux familles : **RTG (nucléaire)** pour puissances durables (Voyager, New Horizons, Cassini, Pioneer) et **panneaux solaires larges optimisés** (Juno, Rosetta) quand la mission le permet.

Peut-on récupérer de l'énergie utile (Electricité) directement de l'énergie thermique



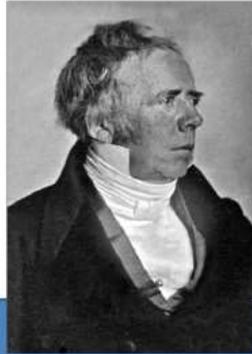
Les générateurs thermoélectriques...



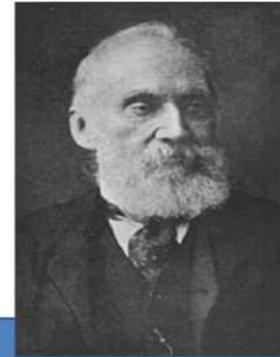
# Histoire de la thermoélectricité



1786 Volta



1825 Oersted



1857 Thomson  
(Lord Kelvin)



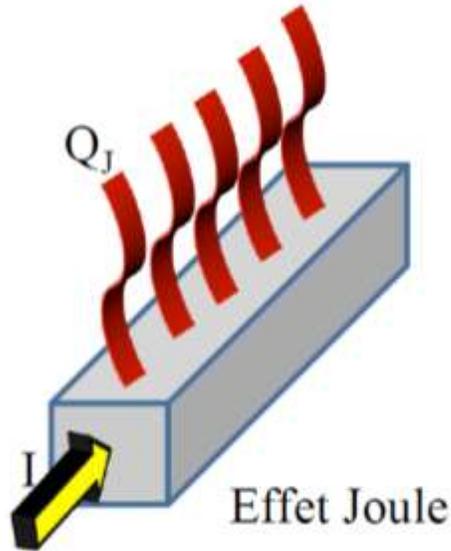
1821 Seebeck  
*redécouvre la  
thermoélectricité*



Jean-Charles-Athanase Peltier  
(1786-1845)

1834 Peltier

# Un peu d'histoire : Effet Joule



L'effet Joule est la manifestation thermique de la résistance électrique qui se produit lors du passage d'un courant électrique dans tout matériau conducteur. L'effet porte le nom du physicien anglais James Prescott Joule qui l'a découvert en 1840.

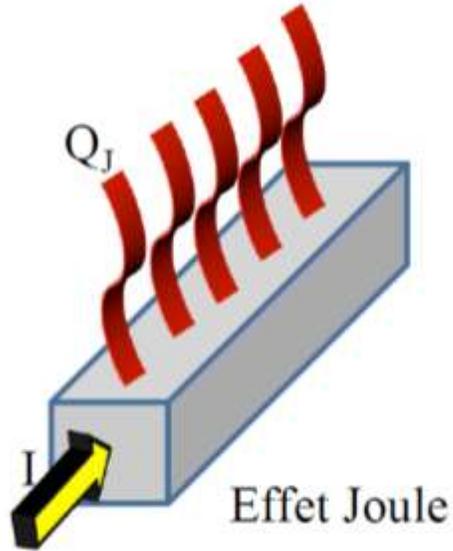
De manière générale, le courant électrique est assuré par le mouvement des charges électriques. Ces porteurs de charge en mouvement interagissent avec les atomes constitutifs du milieu dans lequel ils se déplacent. Cette interaction offre une résistance à leurs déplacements.

Pour transférer une quantité déterminée de courant électrique par ce câble, il faut donc fournir une puissance supplémentaire à celle nécessaire à l'extrémité du conducteur, qui sera dissipée lors des interactions avec les atomes, sous forme d'énergie thermique (dissipation d'énergie électrique sous forme de chaleur).

$$Q_j = RI^2$$

(Q en Watt, I en ampère, R la résistance électrique en Ohm)

# Un peu d'histoire : Effet Joule



Si on note  $\rho$  la résistivité ( $\Omega.m$ )

$R = \rho L/S$  avec  $L$  longueur et  $S$  la section

ou si on note  $\sigma$  la conductivité ( $S.m^{-1}$ )

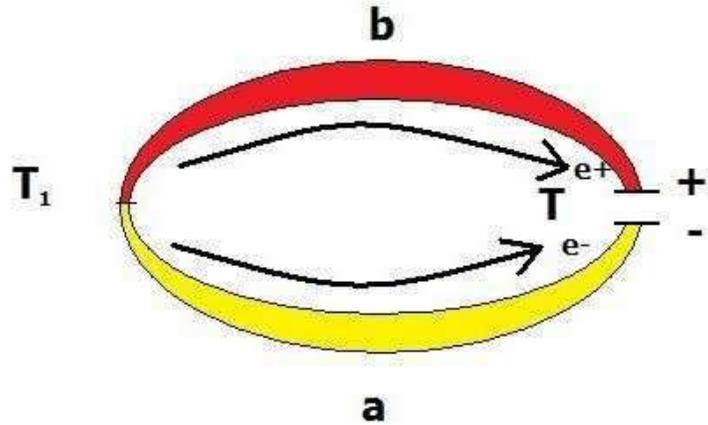
$R = L / \sigma S$

$$Q_J = RI^2$$

( $Q$  en Watt,  $I$  en ampère,  $R$  la résistance électrique en Ohm)

# Un peu d'histoire : Effet Seebeck

L'effet Seebeck est un effet thermoélectrique, par lequel une différence de potentiel apparaît à la jonction de deux matériaux soumis à une différence de température.



## Expérience de Seebeck.

Ce phénomène physique est découvert en 1787 par Alessandro Volta et une deuxième fois par le physicien allemand Thomas Johann Seebeck en 1821. Ce dernier remarque que l'aiguille d'une boussole est déviée lorsqu'elle est placée entre deux conducteurs de natures différentes et dont les jonctions ne sont pas à la même température  $T$  (voir figure).

[https://www.youtube.com/watch?v=NalPVos\\_JwQ](https://www.youtube.com/watch?v=NalPVos_JwQ)

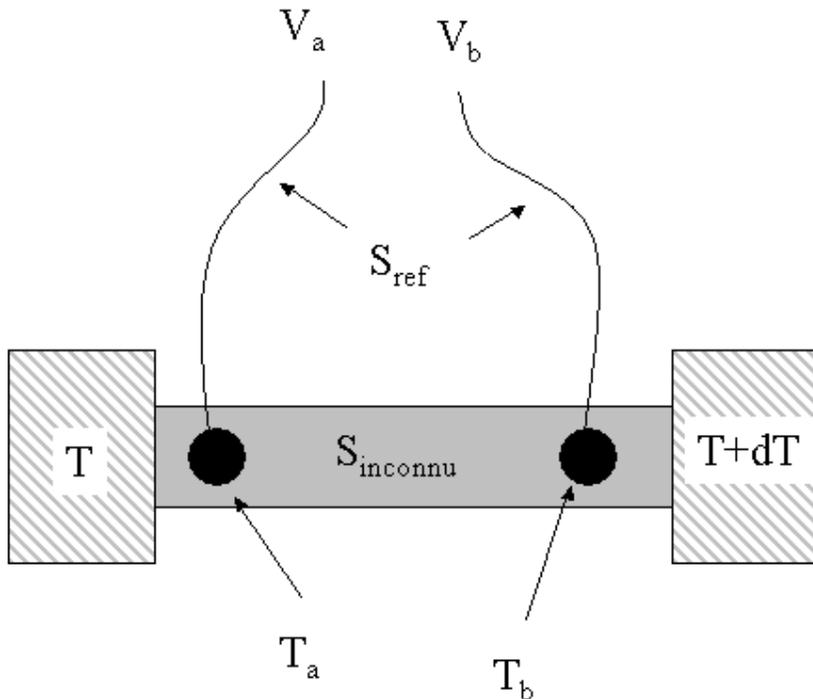


*Il explique alors ce phénomène par l'apparition d'un champ magnétique, et croit ainsi fournir une explication à l'existence du champ magnétique terrestre. Ce n'est que bien plus tard que fut comprise l'origine électrique du phénomène.*

L'utilisation la plus connue de l'effet Seebeck est la mesure de température à l'aide de thermocouples. Cet effet est également à la base de la génération d'électricité par effet thermoélectrique.

# Mesure du Coefficient Seebeck

Deux matériaux conducteurs de natures différentes sont reliés par deux jonctions situées aux points a et b.



Dans le cas de l'effet Seebeck, une différence de température  $dT$  est appliquée entre a et b, ce qui entraîne l'apparition d'une différence de potentiel  $dV$  entre Y et Z.

En circuit ouvert, le **coefficient Seebeck** du couple de matériaux,  $S$  (ou  $\alpha$ ), ou *pouvoir thermoélectrique*, est défini par :

$$S = \frac{dV}{dT}$$

Le coefficient Seebeck de chacun des matériaux est lié au coefficient du couple par la relation :

$$S = S_{\text{inconnu}} - S_{\text{ref}}$$

Le coefficient Seebeck s'exprime en  $V.K^{-1}$  (ou plus généralement en  $\mu V.K^{-1}$  au vu des valeurs de ce coefficient dans les matériaux usuels).

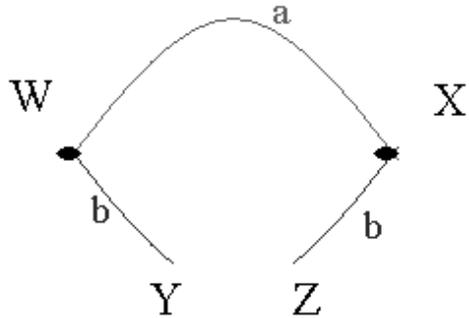
$$S_{\text{inconnu}} = S_{\text{ref}} - \frac{V_a - V_b}{T_a - T_b}$$

# Coefficient Seebeck de quelques métaux à 300 K

Numéro atomique	Élément	Symbole	Coefficient Seebeck en $\mu\text{V/K}$
3	<a href="#">Lithium</a>	Li	+4,3
4	<a href="#">Béryllium</a>	Be	-2,5
11	<a href="#">Sodium</a>	Na	-2,6
12	<a href="#">Magnésium</a>	Mg	-2,1
13	<a href="#">Aluminium</a>	Al	-2,2
19	<a href="#">Potassium</a>	K	-5,2
20	<a href="#">Calcium</a>	Ca	+1,05
21	<a href="#">Scandium</a>	Sc	-14,3
22	<a href="#">Titane</a>	Ti	-2
23	<a href="#">Vanadium</a>	V	+2,9
24	<a href="#">Chrome</a>	Cr	+5
25	<a href="#">Manganèse</a>	Mn	-2,5
26	<a href="#">Fer</a>	Fe	+11,6
27	<a href="#">Cobalt</a>	Co	-8,43
28	<a href="#">Nickel</a>	Ni	-8,5
29	<a href="#">Cuivre</a>	Cu	+1,19
30	<a href="#">Zinc</a>	Zn	+0,7
31	<a href="#">Gallium</a>	Ga	+0,5
34	<a href="#">Sélénium</a>	Se	+900
37	<a href="#">Rubidium</a>	Rb	-3,6
38	<a href="#">Strontium</a>	Sr	-3
39	<a href="#">Yttrium</a>	Y	-5,1
40	<a href="#">Zirconium</a>	Zr	+4,4
41	<a href="#">Niobium</a>	Nb	+1,05
42	<a href="#">Molybdène</a>	Mo	+0,1
43	<a href="#">Technétium</a>	Tc	—
44	<a href="#">Ruthénium</a>	Ru	+0,3
45	<a href="#">Rhodium</a>	Rh	+0,8
46	<a href="#">Palladium</a>	Pd	+1,1
47	<a href="#">Argent</a>	Ag	+0,73
48	<a href="#">Cadmium</a>	Cd	-0,05
49	<a href="#">Indium</a>	In	+0,56
50	<a href="#">Étain</a>	Sn	-0,04
52	<a href="#">Tellure</a>	Te	+500
55	<a href="#">Césium</a>	Cs	—
56	<a href="#">Baryum</a>	Ba	-4
57	<a href="#">Lanthane</a>	La	+0,1
58	<a href="#">Cérium</a>	Ce	+13,6
59	<a href="#">Praséodyme</a>	Pr	—
60	<a href="#">Néodyme</a>	Nd	-4
61	<a href="#">Prométhium</a>	Pm	—
62	<a href="#">Samarium</a>	Sm	+0,7
63	<a href="#">Europium</a>	Eu	+5,3
64	<a href="#">Gadolinium</a>	Gd	-4,6
65	<a href="#">Terbium</a>	Tb	-1,6
66	<a href="#">Dysprosium</a>	Dy	-4,1
67	<a href="#">Holmium</a>	Ho	-6,7
68	<a href="#">Erbium</a>	Er	-3,8
69	<a href="#">Thulium</a>	Tm	-1,3
70	<a href="#">Ytterbium</a>	Yb	+5,1
71	<a href="#">Lutécium</a>	Lu	-6,9
72	<a href="#">Hafnium</a>	Hf	0
73	<a href="#">Tantale</a>	Ta	+0,7
74	<a href="#">Tungstène</a>	W	-4,4
75	<a href="#">Rhénium</a>	Re	-1,4
76	<a href="#">Osmium</a>	Os	-3,2
77	<a href="#">Iridium</a>	Ir	+1,42
78	<a href="#">Platine</a>	Pt	—
79	<a href="#">Or</a>	Au	+0,82
80	<a href="#">Mercure</a>	Hg	—
81	<a href="#">Thallium</a>	Tl	+0,6
82	<a href="#">Plomb</a>	Pb	-0,58
83	<a href="#">Bismuth</a>	Bi	-72
90	<a href="#">Thorium</a>	Th	+0,6
91	<a href="#">Protactinium</a>	Pa	—
92	<a href="#">Uranium</a>	U	+3
93	<a href="#">Neptunium</a>	Np	+8,9
94	<a href="#">Plutonium</a>	Pu	+12

La table ci-dessous n'est valable que pour les composés purs (non dopés) dans leur structure cristalline normale.

# Un peu d'histoire : Effet Peltier



L'effet Peltier est un effet thermoélectrique consistant en un phénomène physique de déplacement de chaleur en présence d'un courant électrique.

L'effet se produit dans des matériaux conducteurs de natures différentes liés par des jonctions (contacts). L'une des jonctions se refroidit alors légèrement, pendant que l'autre se réchauffe. Cet effet a été découvert en 1834 par le physicien Jean-Charles Peltier.

Deux matériaux [conducteurs](#) de natures différentes a et b sont reliés par deux jonctions en X et W. Dans le cas de l'effet Peltier, un [courant électrique](#) est imposé au circuit, en plaçant par exemple une source de [courant électrique](#) entre Y et Z, ce qui entraîne une libération de [chaleur](#) à une jonction et une absorption de [chaleur](#) à l'autre jonction<sup>2</sup>. Le coefficient Peltier relatif au couple de matériaux a et b est défini comme la puissance thermique dégagée ou absorbée par unité d'intensité de courant <sup>1</sup>. Il s'exprime en volts<sup>1</sup>.

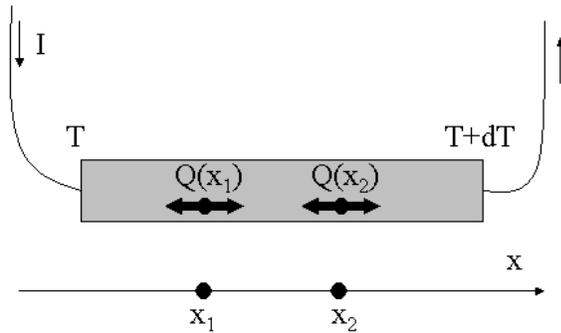
$\Pi_{ab}$  est alors défini par :

$$\Pi_{ab} = \frac{P}{I}$$

Si un courant est imposé dans le sens  $Y \rightarrow W \rightarrow X \rightarrow Z$ , alors il entraîne une libération de chaleur en W et une absorption en X, et  $\Pi_{ab}$  est positif.

# Un peu d'histoire : Effet Thomson

L'effet Thomson est un effet thermoélectrique découvert par le baron Kelvin William Thomson en 1851. Il décrit la relation entre un courant électrique (ou une tension électrique) et un flux de chaleur (ou un gradient thermique) au sein d'un matériau conducteur.



## Principes

un matériau soumis à une tension électrique et parcouru par un courant électrique échange de la chaleur avec le milieu extérieur.

Réciproquement, un courant électrique est engendré par un matériau soumis à un gradient thermique et parcouru par un flux de chaleur.

[William Thomson \(Lord Kelvin\)](#) a montré que le coefficient Seebeck est lié aux coefficients [Peltier](#) et [Thomson](#) selon :

$$\Pi_{ab} = S_{ab}T$$

où  $\Pi_{ab}$  est le coefficient Peltier du couple,  $T$  est la température (en kelvins) de la jonction considérée, et  $\tau_a$  le coefficient Thomson d'un des matériaux.

# Utilisation de l'effet Seebeck

## I. Les thermocouples

### I.2 Mesures de températures

#### MONTAGE SIMPLE :

On place le **voltmètre sur un la soudure froide**. La **température de référence** sera la température du voltmètre (température ambiante) :

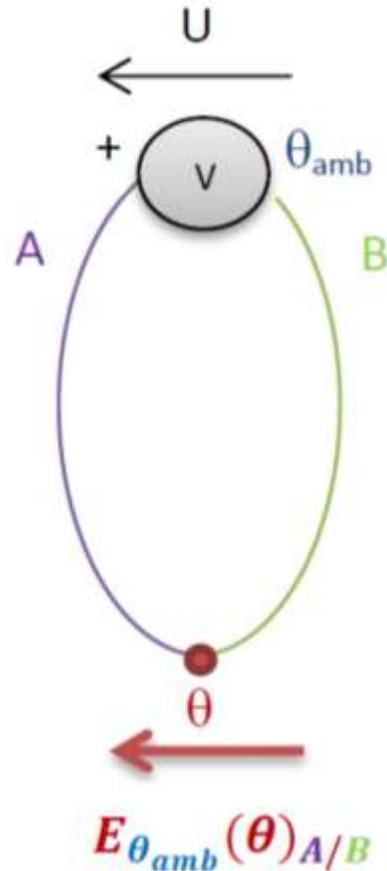
$$\theta_{ref} = \theta_{amb}$$

On note :

- $U$  la tension mesurée par le voltmètre
- $E_{\theta_{amb}}(\theta)_{A/B}$  la tension créée par le thermocouple.

**Le branchement du voltmètre est choisi par l'opérateur !**

Ici :  $U = E_{\theta_{amb}}(\theta)_{A/B}$



# I. Les thermocouples

## I.2 Mesures de températures

### MONTAGE DIFFERENTIEL :

Avantage :

**on peut choisir la température de référence.**

En général la température de SF est choisie égale à 0°C.

Le premier métal **A** est à l'extérieur du montage et le second métal est à l'intérieur **B**.

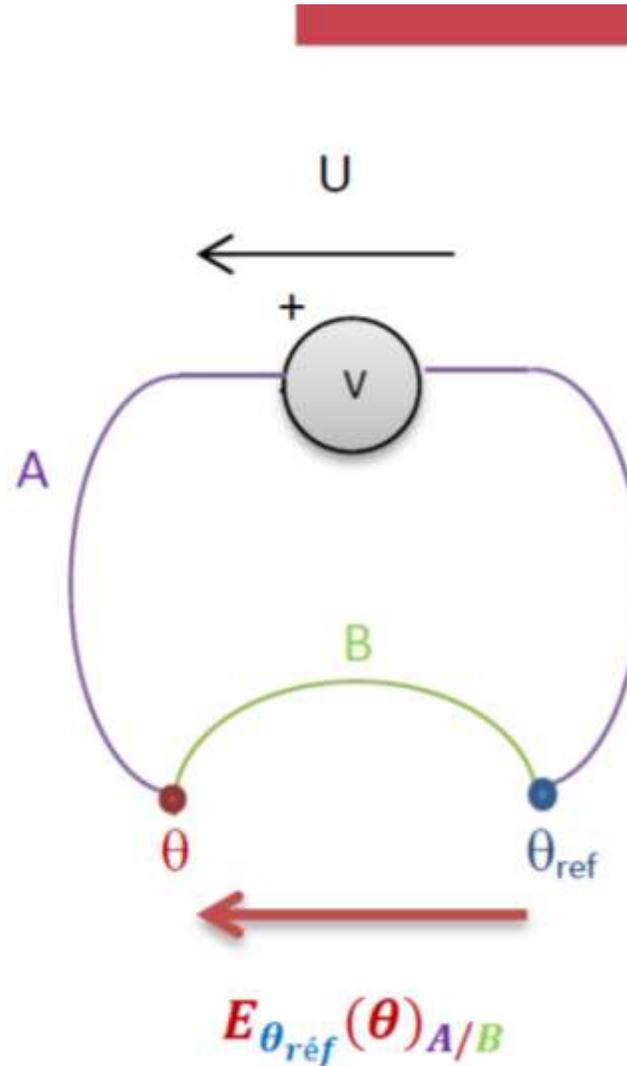
La flèche est dirigé vers la température inconnue (SC) :

- Si  $\theta_{ref} < \theta$  on a  $E_{\theta_{ref}}(\theta)_{A/B} > 0$

Le courant  $I > 0$  va de **A** vers **B**

- Si  $\theta_{ref} > \theta$  on a  $E_{\theta_{ref}}(\theta)_{A/B} < 0$

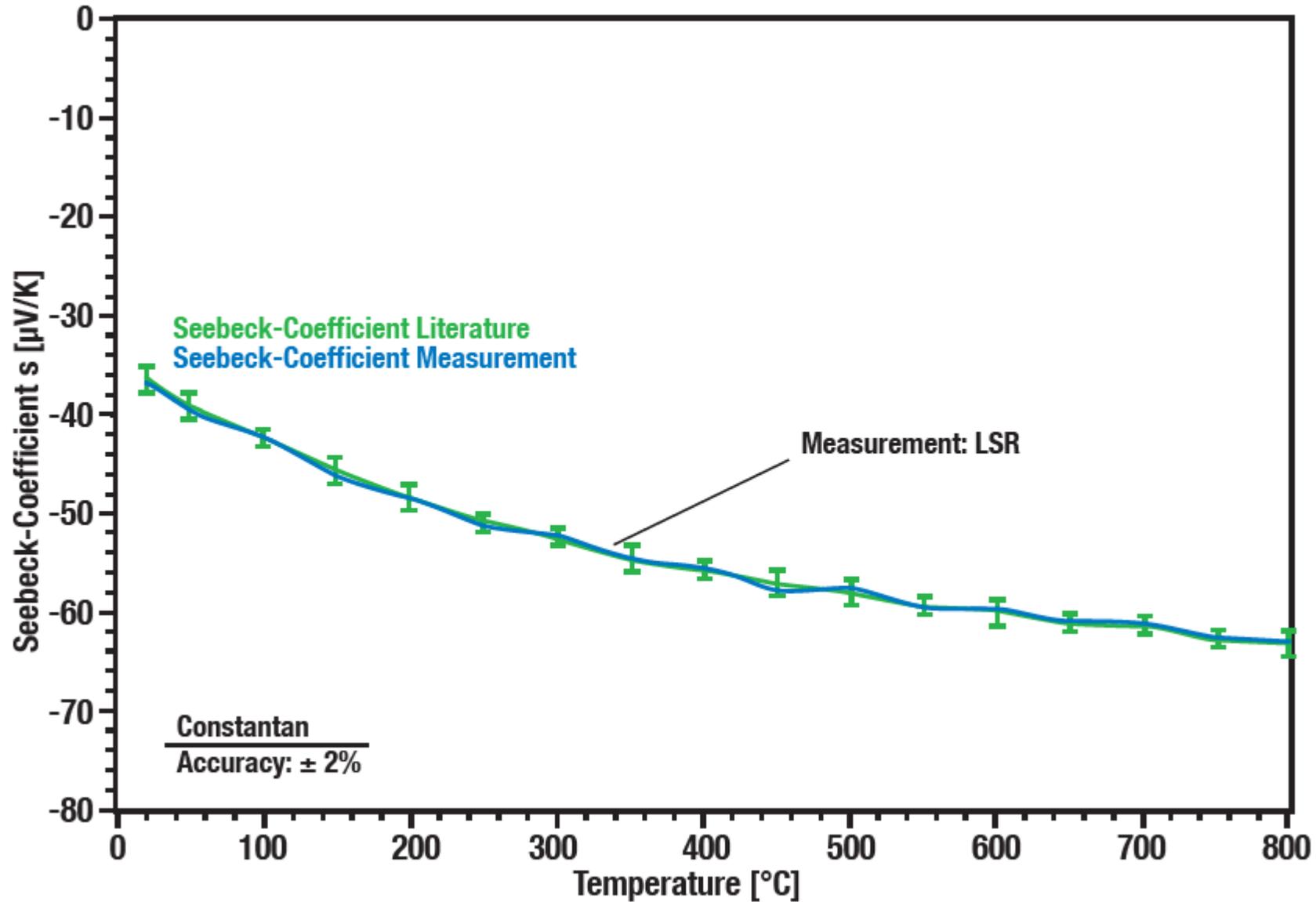
Le courant  $I < 0$  va de **A** vers **B**



Dans ce cas on utilise pour le matériau B, Un alliage pour lequel les coefficients thermiques sont indépendants de la température

Exemple du couple Cuivre-Constantan (Constantan= alliage CuNi)

# Variation de S avec T



# I. Les thermocouples

## I.3 Calcul de températures

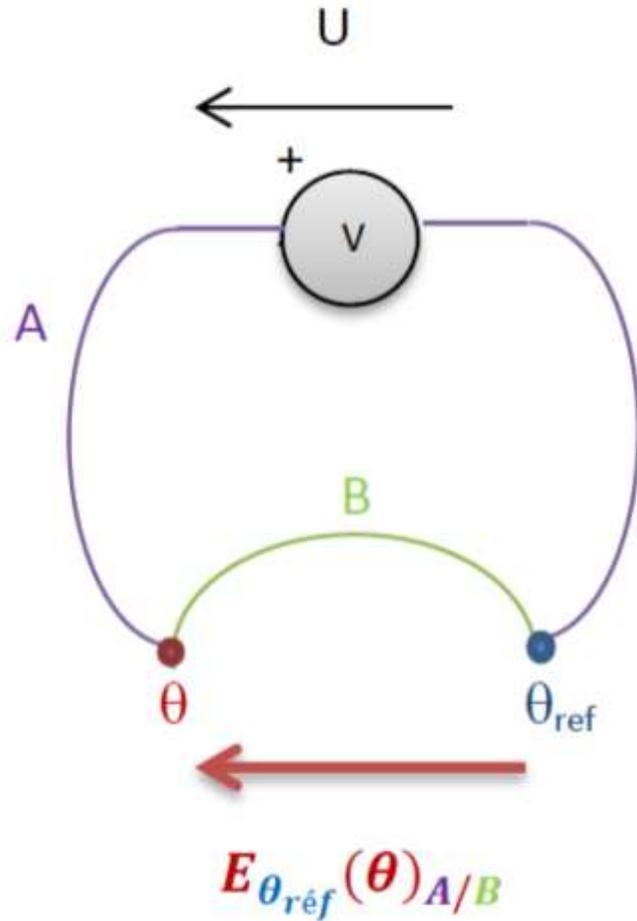
Le calcul de température se fait à partir de tables pour chacun des thermocouples.

Dans le tableau ci-après on a un exemple de table du **thermocouple cuivre/constantan**.

Dans toutes les tables la référence des températures est à  $0^{\circ}\text{C}$  et la fem est donnée en  $\mu\text{V}$ .

On peut obtenir la sensibilité dans chaque domaine de température avec la table.

Il faut absolument connaître la température de référence !

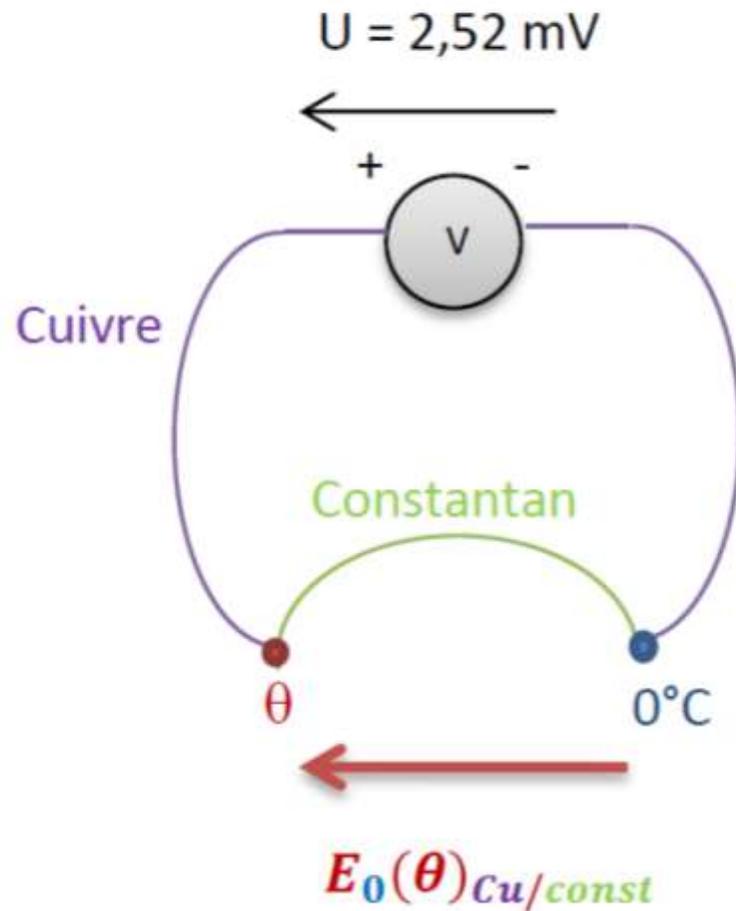


# I. Les thermocouples

## I.3 Calcul de températures

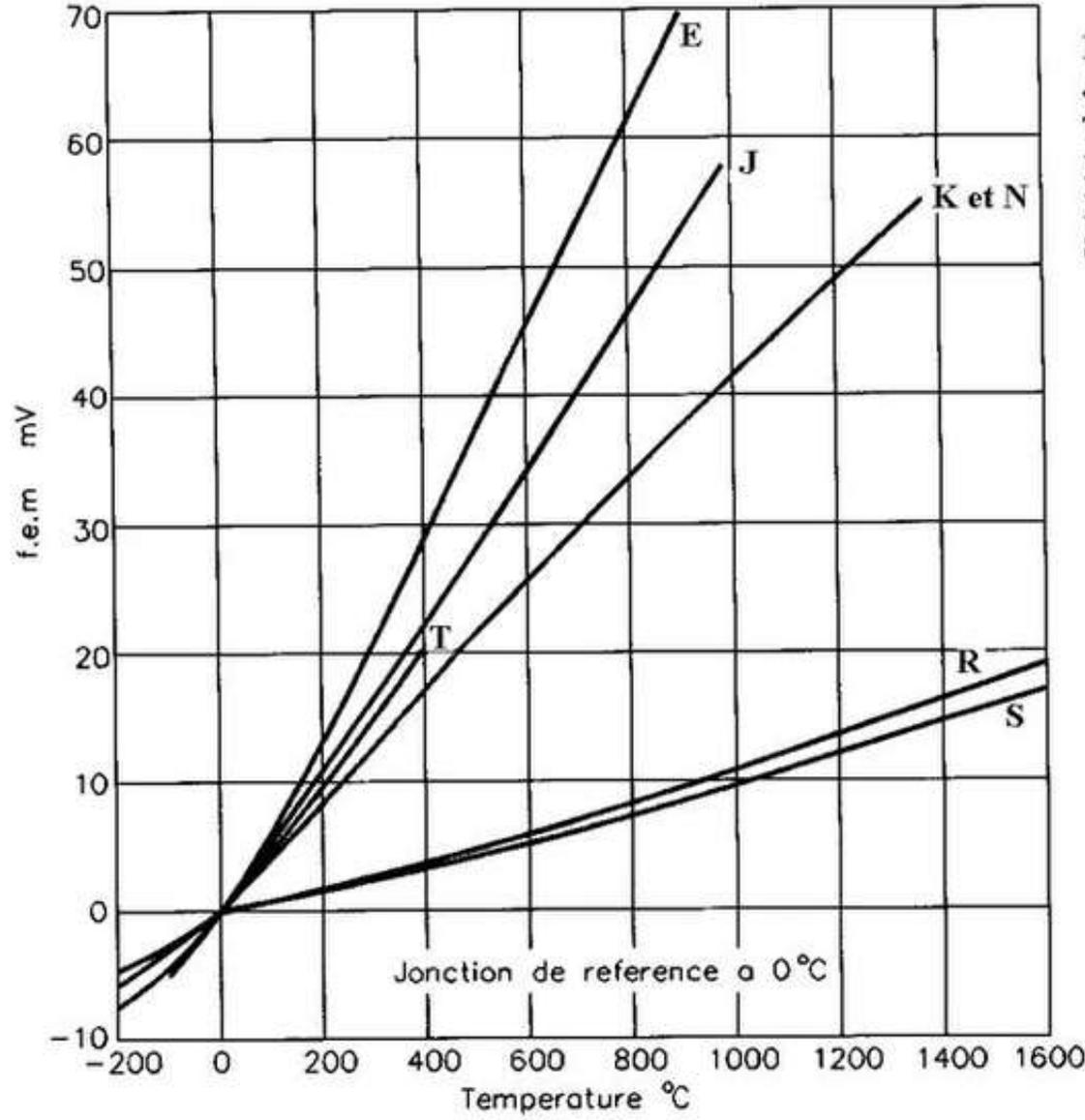
Exemple :

On fait le montage ci-dessous. On lit  $U = 2,52 \text{ mV}$



$^\circ\text{C}$	mV	mV/ $^\circ\text{C}$
-50	-1,85	0,035
-40	-1,50	0,036
-30	-1,14	0,037
-20	-0,77	0,038
-10	-0,039	0,039
0	0,00	0,040
10	0,40	0,040
20	0,80	0,041
30	1,21	0,042
40	1,63	0,042
50	2,05	0,043
60	2,48	0,043
70	2,91	0,044
80	3,35	

La figure ci-contre donne la f.é.m. de 6 couples usuels, la soudure froide étant à 0°C. La polarité du premier métal nommé est positive par rapport au second pour les températures > 0°C

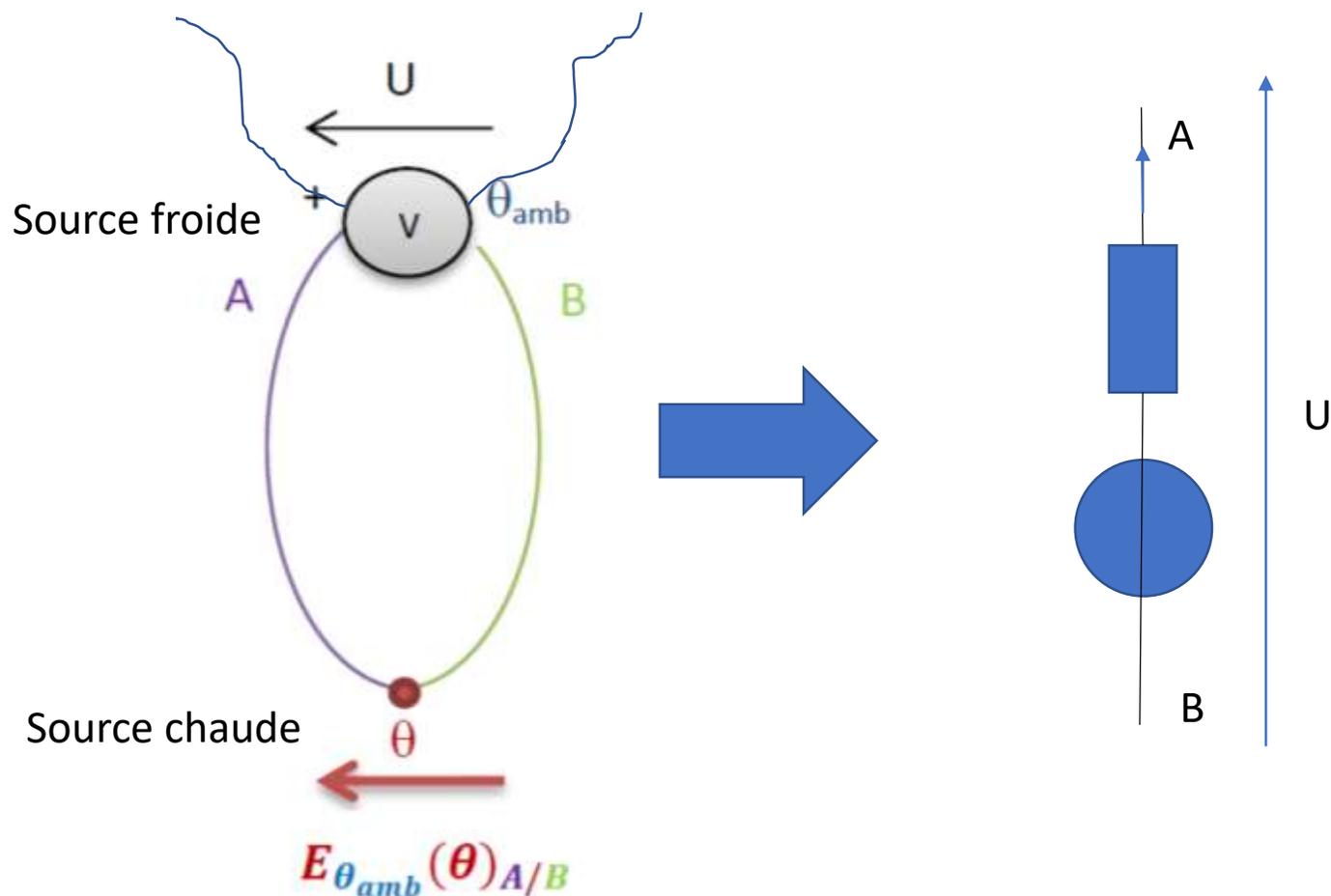


**E : Chromel - Constantan**  
**J : Fer - Constantan**  
**T : Cuivre - Constantan**  
**K et N : Chromel - Alumel**  
**R : 87Pt.13Rh**  
**S : 90Pt.10 Rh**

**Pt = platine**  
**Rh = rhodium**

REM:  
 Dispositif pour la mesure de température (thermocouple)

## 2. Générateur Thermoélectrique

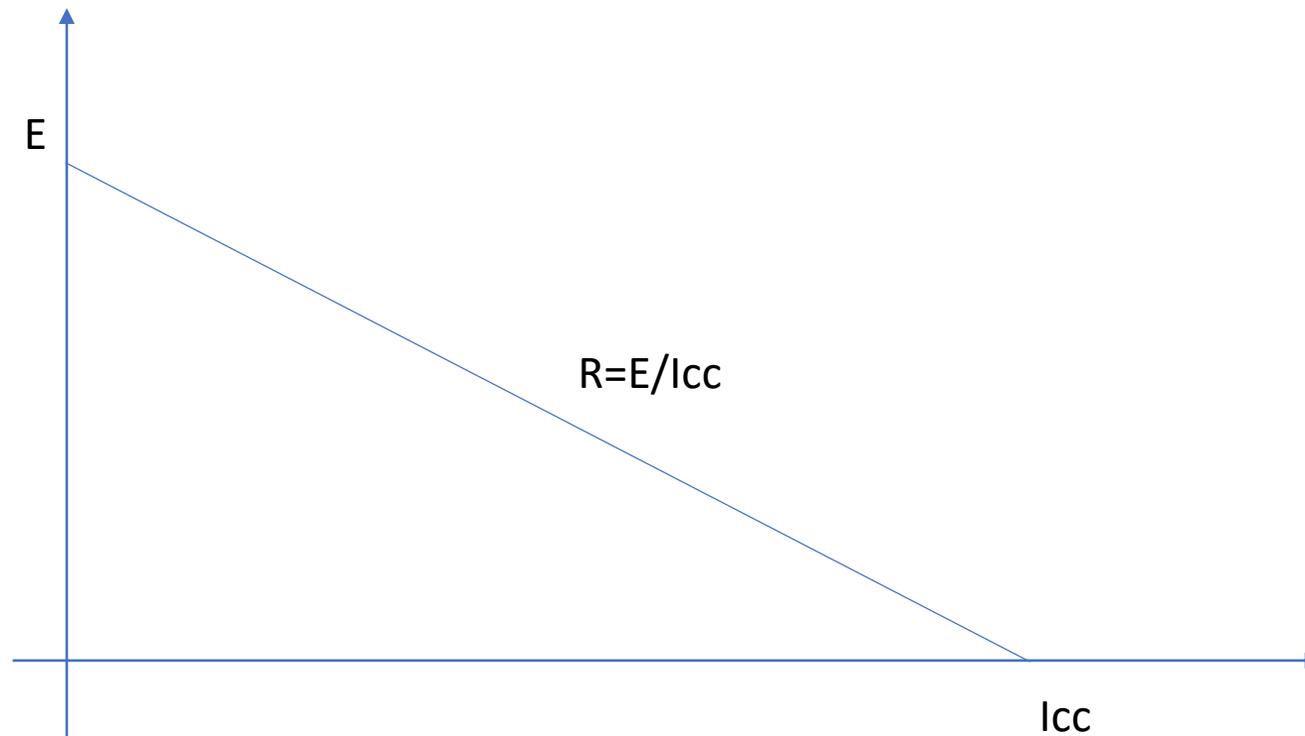


Montage identique à un thermocouple en mode Simple !!

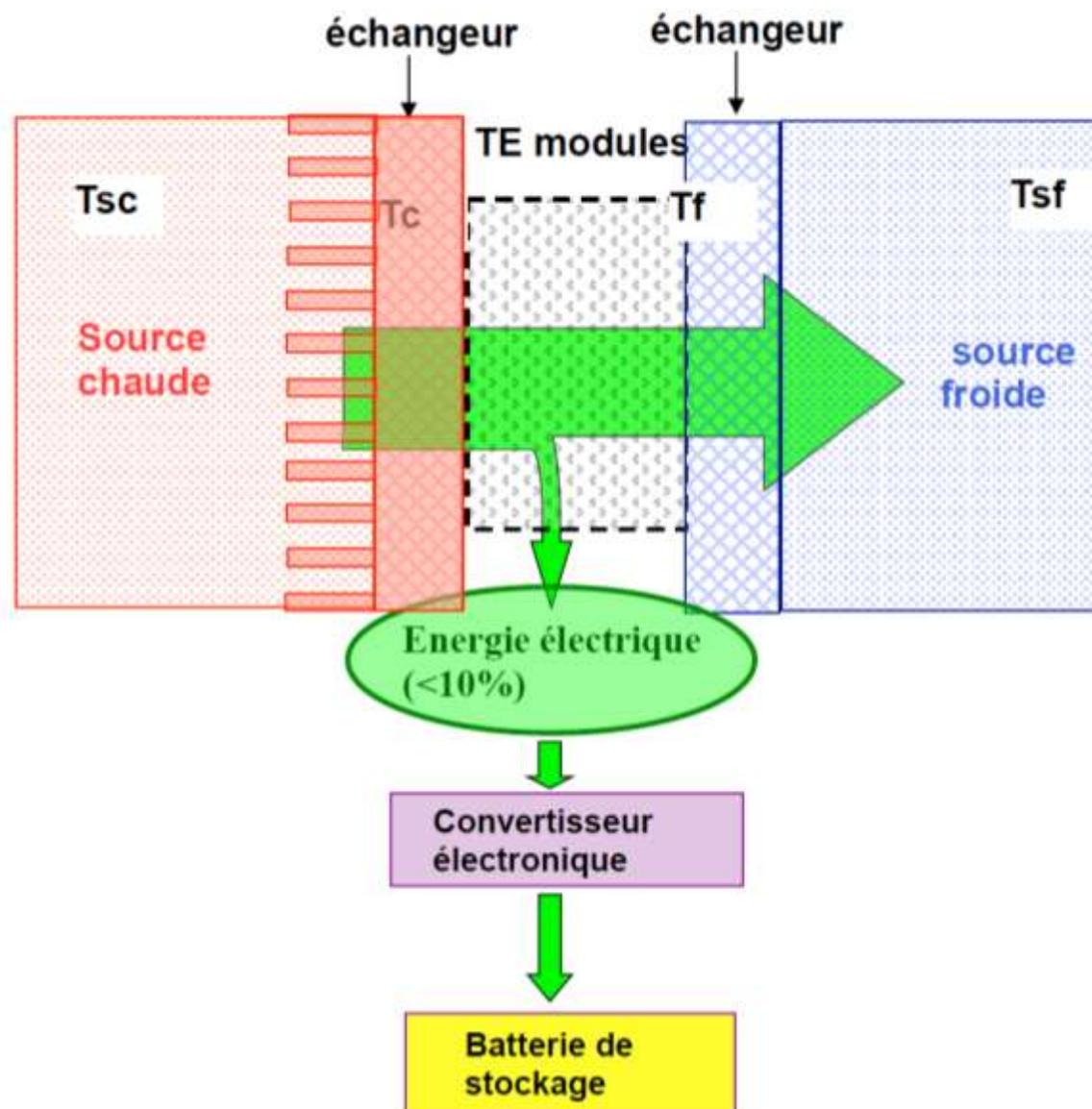
C'est un Générateur électrique!

# Le générateur TE idéal

- Pour une différence de température  $\Delta T$ , on a un modèle de générateur simple : (attention  $R$  dépend de  $\Delta T$ )



# Conception d'un générateur thermoélectrique

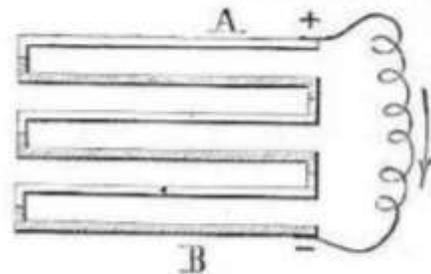


# Obtention d'une tension plus élevée

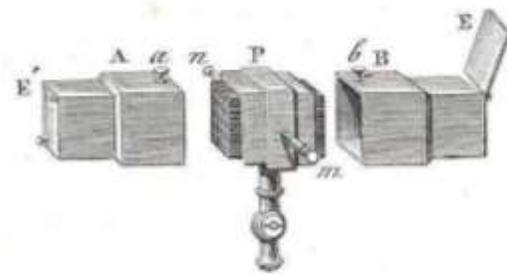
La première pile thermoélectrique a été construite par OERSTED et FOURIER. Elle se composait de quelques barreaux de bismuth et d'antimoine alternés et soudés les uns aux autres. Les points de soudure étaient portés de deux en deux, à des températures différentes.

NOBILI(3) a réalisé, en 1830, une pile de ce genre. En associant cette pile à un galvanomètre, MELLONI(4) obtint un appareil thermométrique d'une très grande sensibilité auquel il donna le nom de thermo-multiplicateur.

La pile de NOBILI et MELLONI est un instrument de laboratoire. Des piles, telles que celles de MARCUS, de CLAMOND ou encore de NOË, ont été construites au XIXème siècle pour une utilisation industrielle. Mais leur force électromotrice étant très faible, leur emploi dans l'industrie ne s'est pas généralisé.



*Figure 2. Montage des couples. GANOT 1884.*



*Figure 3. Dessin de la pile de MELLONI. GANOT 1884.*

# Utilisation comme générateurs électriques

Les piles thermoélectriques offraient une alternatives aux piles chimiques, lesquelles ont été historiquement les premiers générateurs électriques capables de fournir un courant électrique significatif (pile Volta découverte en 1800).

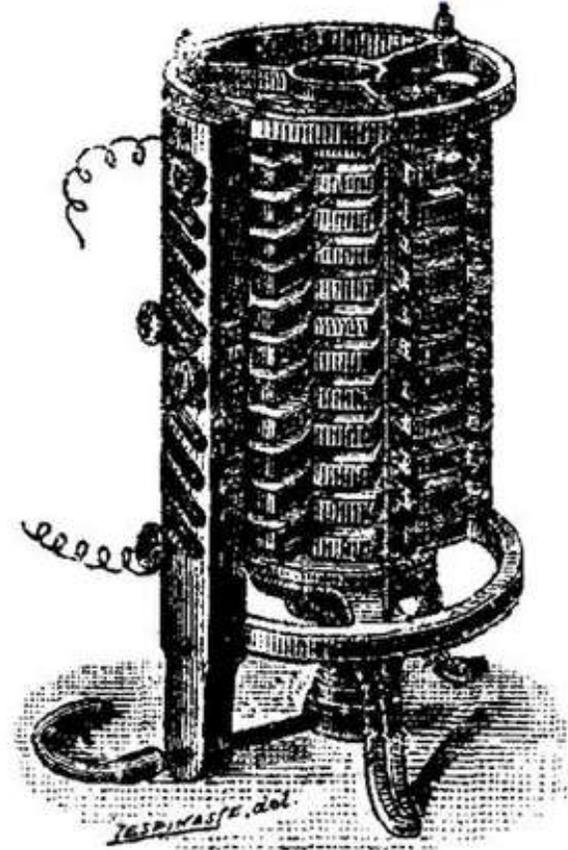
L'utilisation industrielle de générateurs thermoélectriques s'est répandue dans les années 1870 pour la production de courants électriques destinés à la galvanoplastie. Une des premières est la pile Clamond, dont les éléments sont formés d'une lame de fer et d'une lame d'un alliage zinc-antimoine. Les éléments sont disposés en couronnes (comportant chacune une dizaine d'éléments) autour d'une flamme de gaz.

Exemple (selon A. Soulier, traité de galvanoplastie, 1947) :

pour 12 couronnes de 10 éléments

- force électromotrice 8V
- résistance  $3.2 \Omega$
- consommation 180 litres / heure

Note flamme avec du gaz de ville  $\sim 4500 \text{ kcal/m}^3$



Pile Clamond

Une technique dont le développement a hélas été interrompu par la diffusion de la dynamo Gramme

Calculer le rendement de conversion de ce système

force électromotrice 8V

résistance 3.2  $\Omega$

consommation 180 litres / heure

Le rendement n'apparaît pas explicitement dans les spécifications. Si on suppose que la force électromotrice reste constante quel que soit le courant débité, on a une puissance électrique maximum (à l'adaptation) de

$$\frac{(8 / 2)^2}{3.2} = \frac{16}{3.2} = 5 \text{ W}$$

Une puissance de 5 W est également dissipée sous forme de chaleur dans la pile !

Par ailleurs, la capacité calorifique du gaz de ville (extrait de la houille) était d'environ 4500 kcal/m<sup>3</sup>, soit 4500 x 1.1625 Wh/m<sup>3</sup> = 5.23 Wh / litre. La puissance entrante était donc de 5.23 x 180 = 942 W, et le rendement valait

$$\eta = \frac{5}{942} = 0.53\%$$

Ce calcul ne nous dit pas ce que devient la chaleur fournie à la pile. Il est clair qu'une partie doit être convertie en puissance électrique et le reste rejeté à la température des soudures froides. Pour une étude correcte des générateurs thermoélectriques, il faut comprendre comment se fait le partage !

---

Par la suite, même si certains résultats prometteurs avaient été obtenus, par exemple la découverte en 1950, par un académicien et chercheur russe IOFFÉ, des propriétés thermoélectriques des semi-conducteurs, la recherche scientifique en matière de thermoélectricité était devenue, à partir des années 1960, pratiquement insignifiante.

Il faudra attendre le milieu des années 1990 pour constater un regain d'intérêt pour ce domaine, confirmé par de très fortes demandes de brevets d'inventions à l'Institut National de la Propriété Industrielle (INPI).

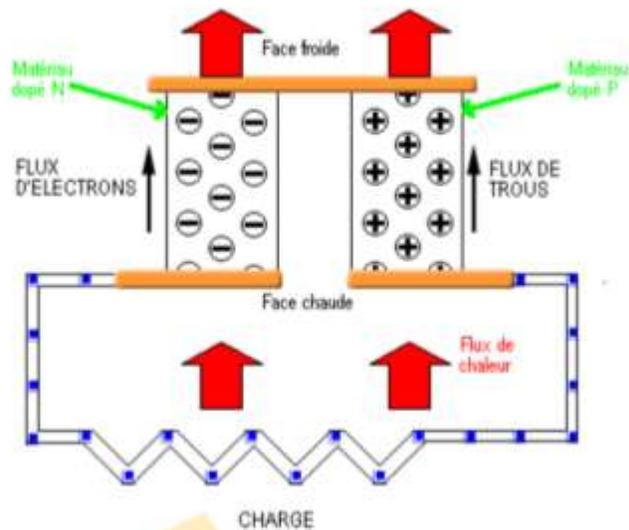
La hausse du coût de l'énergie, les exigences environnementales et la possibilité de convertir un flux de chaleur en courant électrique à partir de sources de chaleur perdue comme les pots d'échappement des automobiles, les cheminées d'incinérateurs, les circuits de refroidissement des centrales nucléaires... expliquent en partie cette accélération des recherches.

Les systèmes de conversion utilisant l'effet thermoélectrique ont cependant des rendements faibles ce qui limite, pour l'instant, les thermopiles à quelques applications pour lesquelles la fiabilité et la durabilité sont plus importants que les coûts et le rendement, dans le domaine spatial notamment.

## 2. Générateur Thermoélectrique à base de semi-conducteurs dopés

Il faut choisir un couple de matériau avec le coefficient  $S_{ab}$  le plus grand possible !!!

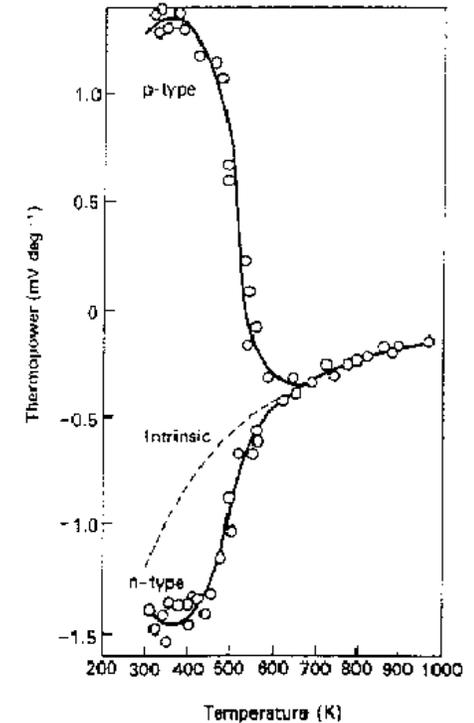
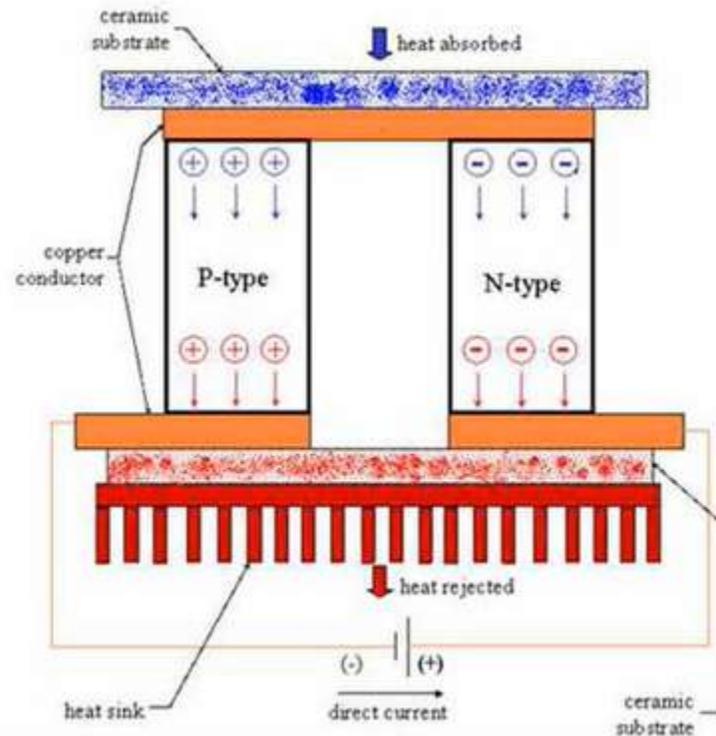
En mode générateur on utilise généralement un couple de 2 semi-conducteurs de type n et p



En production d'électricité, la chaleur est convertie directement en électricité

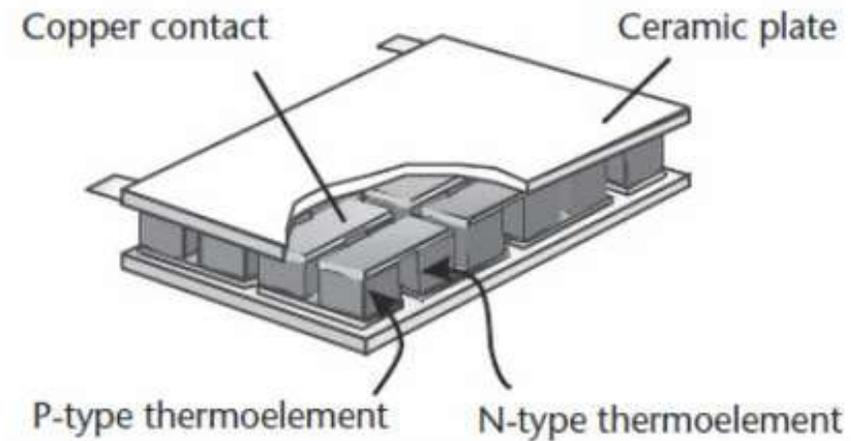
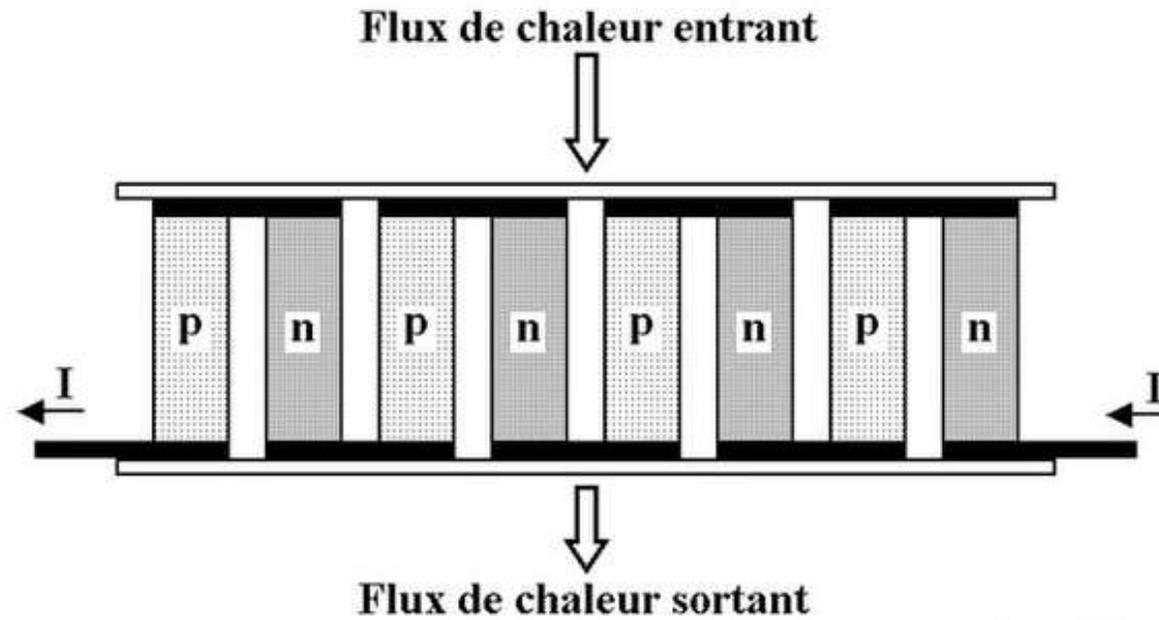
# Explication microscopique

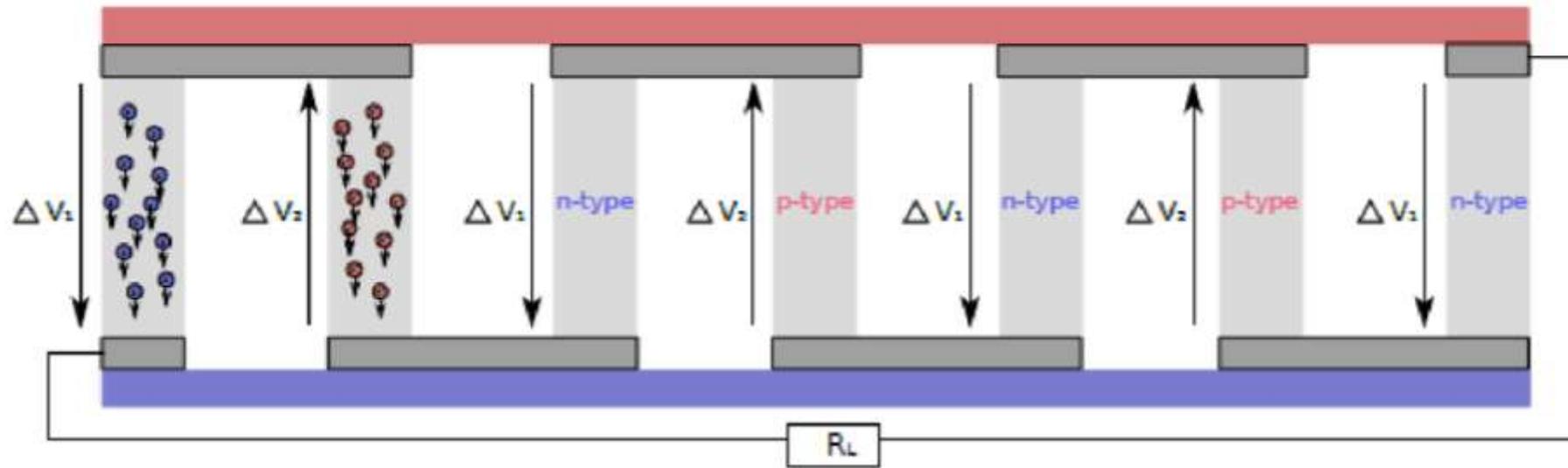
Lorsqu'un conducteur est soumis à un gradient de température, les porteurs ont tendance à se déplacer de la partie la plus chaude vers la plus froide. La force électromotrice dans un tel conducteur n'est donc pas donnée uniquement par la loi d'Ohm  $e = RI$  : elle comporte un terme thermoélectrique.



$\epsilon$  pour un semi-conducteur Si dopé ou non

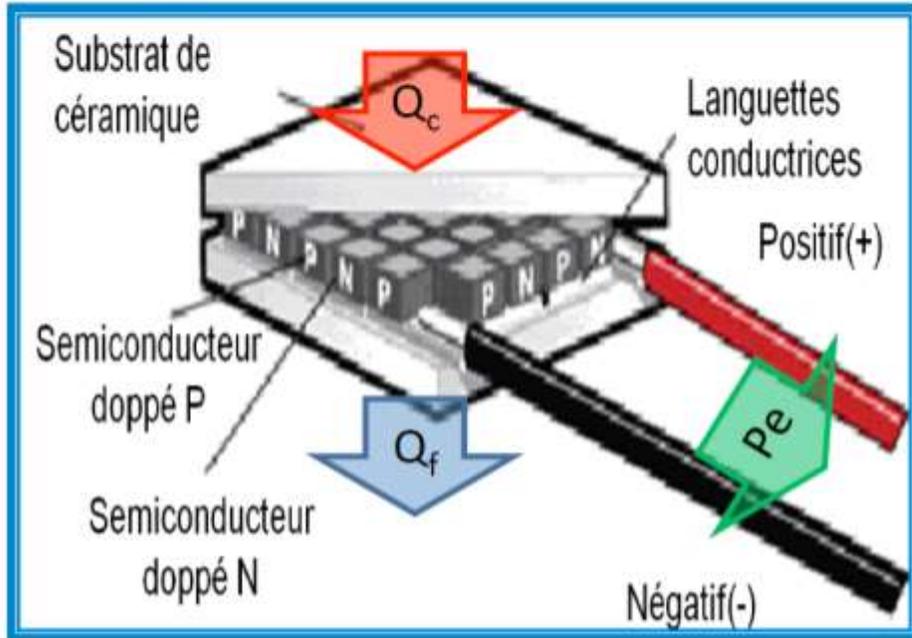
# Structure d'un générateur thermoélectrique





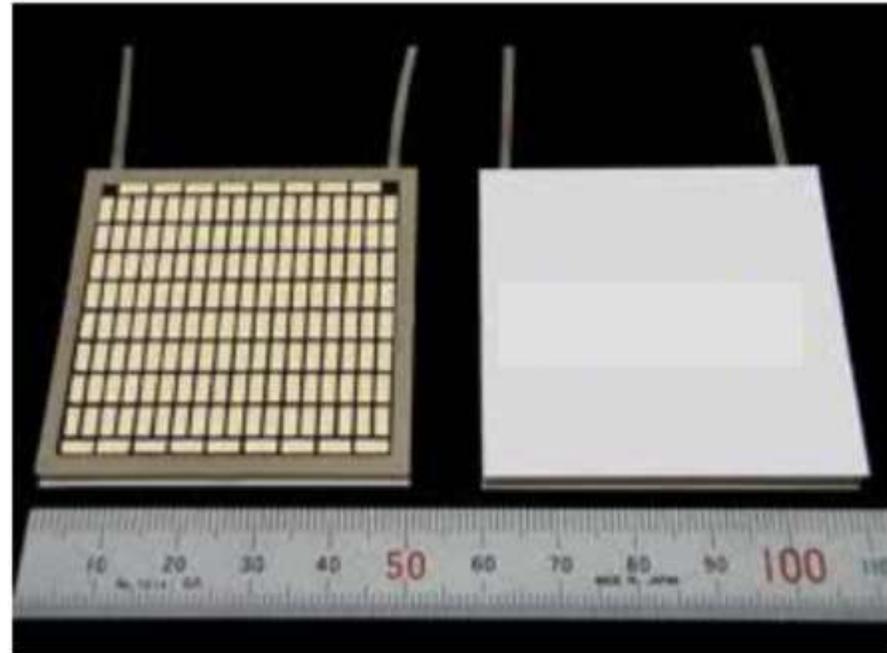
**Figure I.4 :** Schéma d'un module thermoélectrique combinant des semi-conducteurs de type p et de type n. [1]

# Modules thermoélectriques

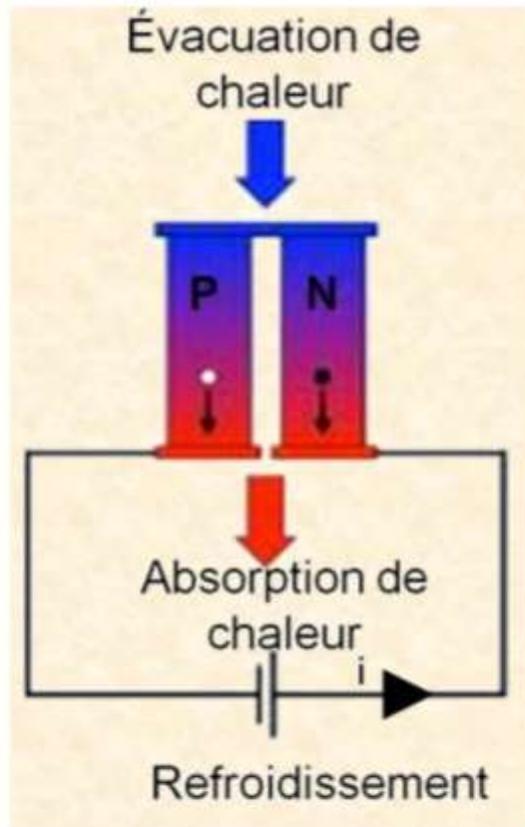


$$Pe = Q_c - Q_f$$

Modules Seebeck  
Modules Peltier



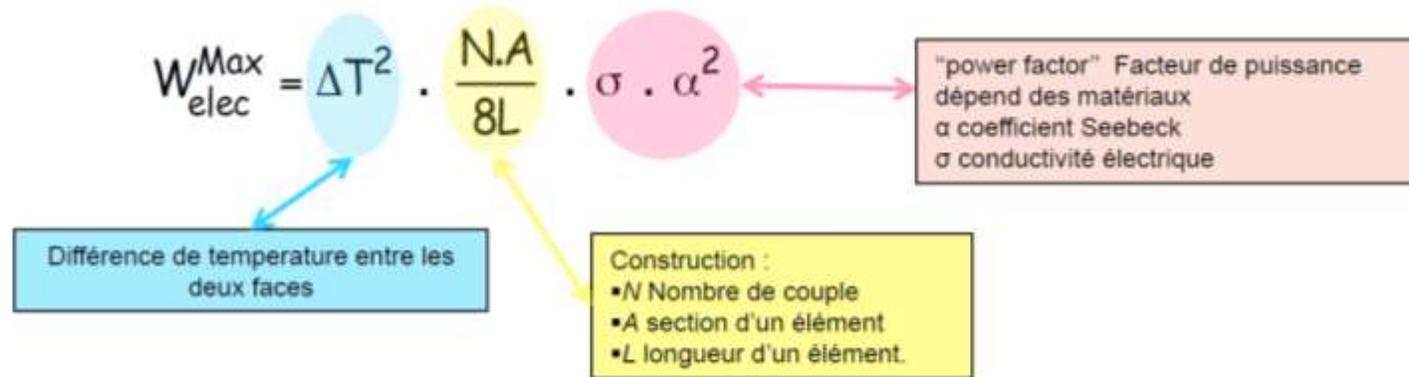
# Refroidissement par effet Peltier



En refroidissement, on peut extraire ou apporter de la chaleur suivant le sens du courant

# Puissance électrique qui peut être extraite d'une source thermique

## Puissance électrique



Demonstration !!!



## Cube de tellure de bismuth de type P et N comme matériaux thermoélectriques avec des d'électrode

- Pureté : 99,99%, 99,999%
- MOQ : 10 pièces ou 100 grammes
- Type de dopage : type N, type P
- Processus de production : tirage de cristaux et extrusion à chaud
- Taille typique : 0,3\*0,3\*0,4 mm, 1,4\*1,4\*1,6 mm
- Commande personnalisée : acceptée avec les conditions à guichet unique OEM et ODM

envoyer une demande



### DESCRIPTION

Le tellure de bismuth de type tirage de cristaux est le plus courant, il est fabriqué par fusion de zone et processus de production par tirage de cristaux. La cohérence et l'uniformité des performances dans la tolérance 3%. La performance matérielle est stable et fiable.

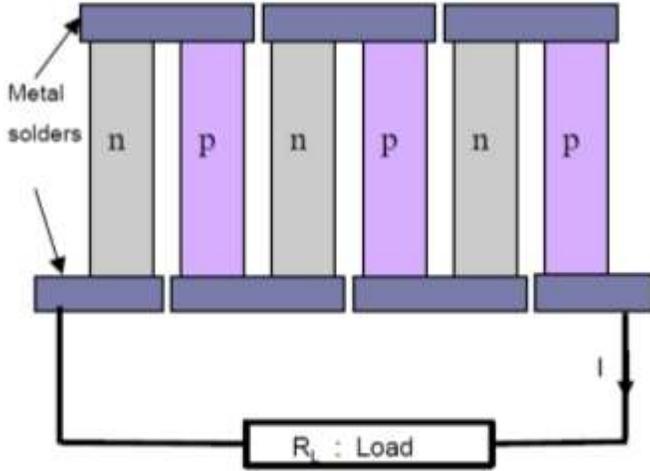
L'extrusion à chaud du tellure de bismuth de type n et p sont nos matériaux de base. Il est produit par une technologie de frittage nano-processus avec un processus avancé et d'excellentes performances. Le matériau a des propriétés mécaniques améliorées de 4 à 6 fois par rapport au type de tirage de cristaux à fusion de zone. La conductivité est de 1000 (5/cm) et le potentiel électrique est de 210-230µV/K. Le poids net est d'environ 1 kg pour chaque tige de cristal complète. Nous pouvons fournir différentes tailles de plaquettes et de particules selon les besoins.

### Propriétés

N° CAS	1304-82-1
Numéro EINECS	215-135-2
Densité (robinet)	7,64g/cm <sup>3</sup>
Point de fusion	573,2 °C
Conductivité électrique (température d'essai 300K)	1050 ± 5%
Conductivité thermique (température d'essai 300K)	1,65 ± 5% avec mk
Coefficient Seebeck (température d'essai 300K)	210-230µV/K
Valeur ZT (température d'essai 300K)	0,8-0,95
Épaisseur typique (soudure, galvanoplastie)	Ni=3-4µm, Sn=1-2µm
Délai de livraison	1-5 jours ouvrables
Capacité d'approvisionnement	500 kg par mois

# Optimisation

## Modèle électrique d'un module

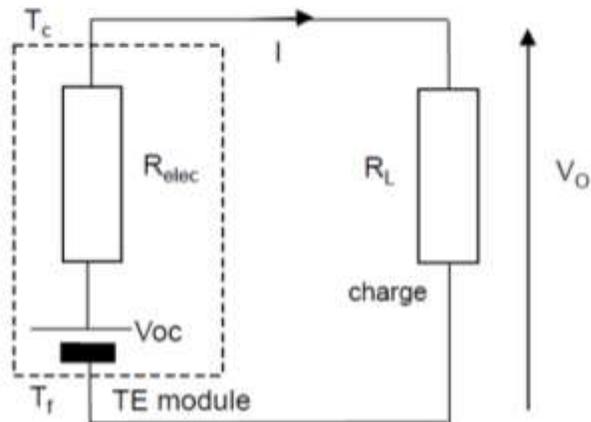


$$Q_C = \alpha \cdot I \cdot T_C - \frac{1}{2} R_{elec} \cdot I^2 + \frac{(T_C - T_F)}{R_{th}}$$

$$Q_F = \alpha \cdot I \cdot T_F + \frac{1}{2} R_{elec} \cdot I^2 + \frac{(T_C - T_F)}{R_{th}}$$

$$P_e = \alpha \cdot I \cdot (T_C - T_F) - R_{elec} \cdot I^2$$

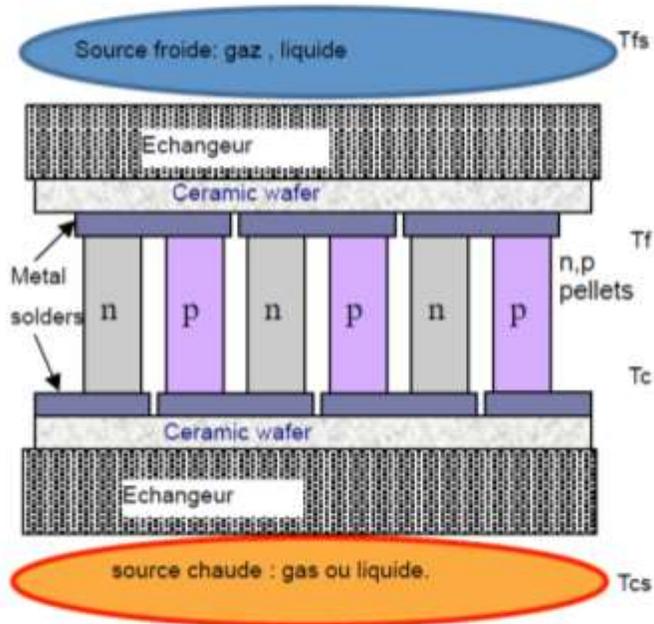
$$V_{oc} = \alpha (T_c - T_f)$$



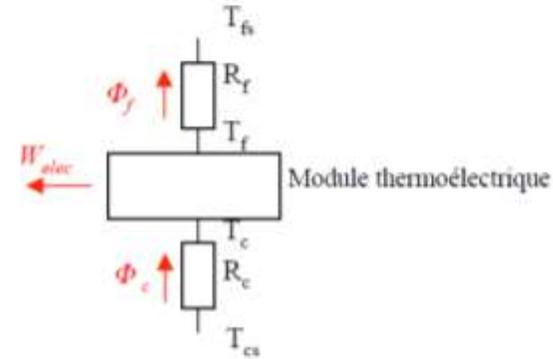
un module est modélisé par une source de tension  $V_{oc}$  avec une résistance interne  $R_{elec}$

## Générateur global

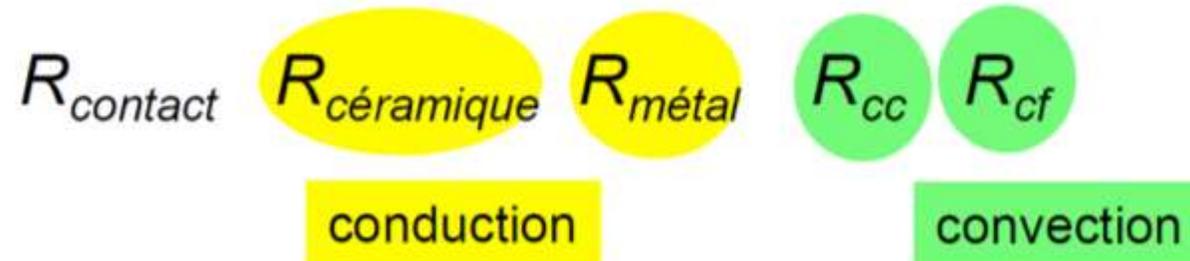
Il faut prendre en compte les échangeurs, les céramiques, les résistances de contact ...



modèle du générateur avec résistances thermiques

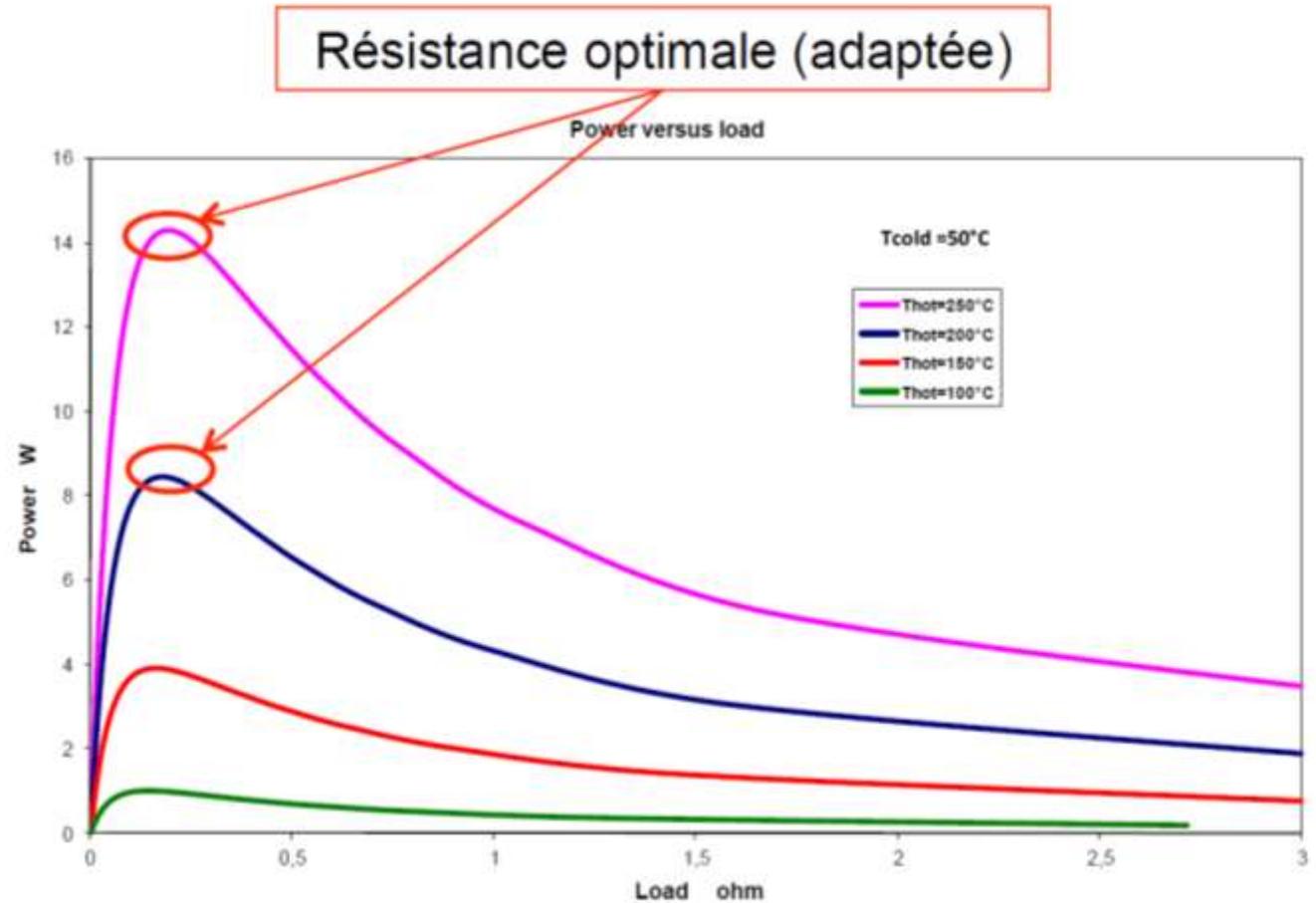
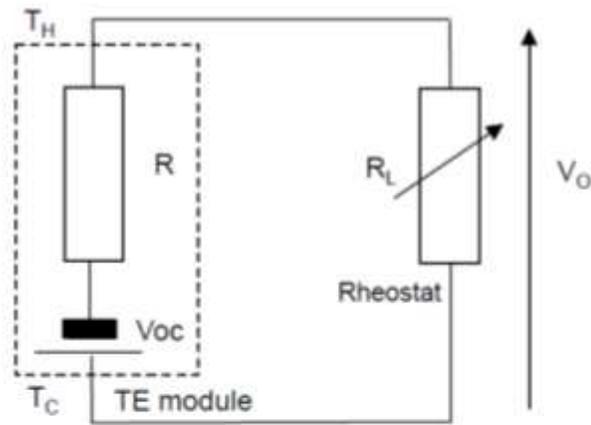


Corrélations classiques pour déterminer les coefficients de transfert thermique

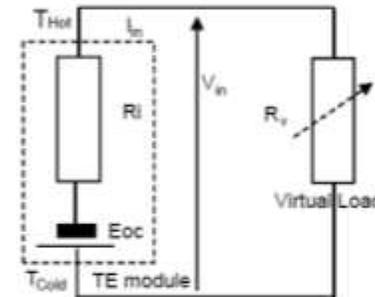
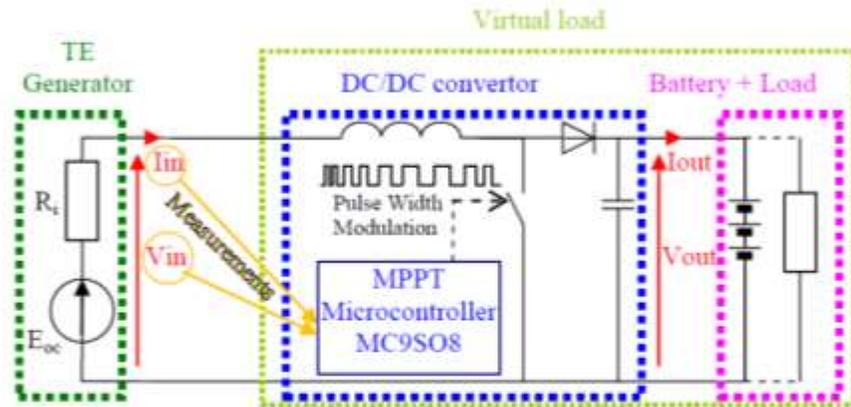


## Adaptation d'impédance : puissance maximale

Puissance électrique

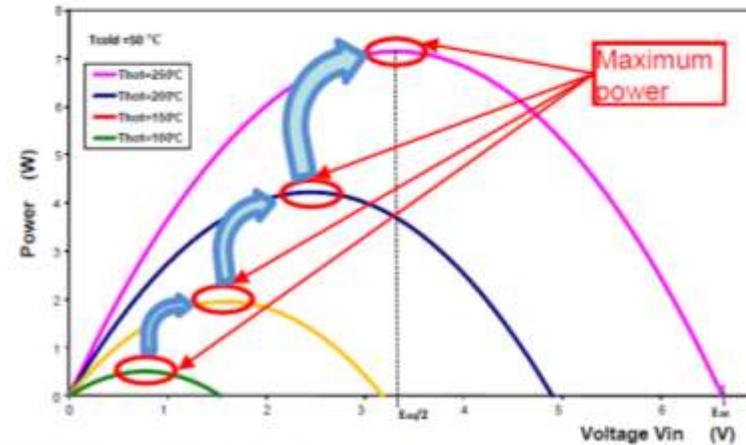


# Convertisseur DC/DC

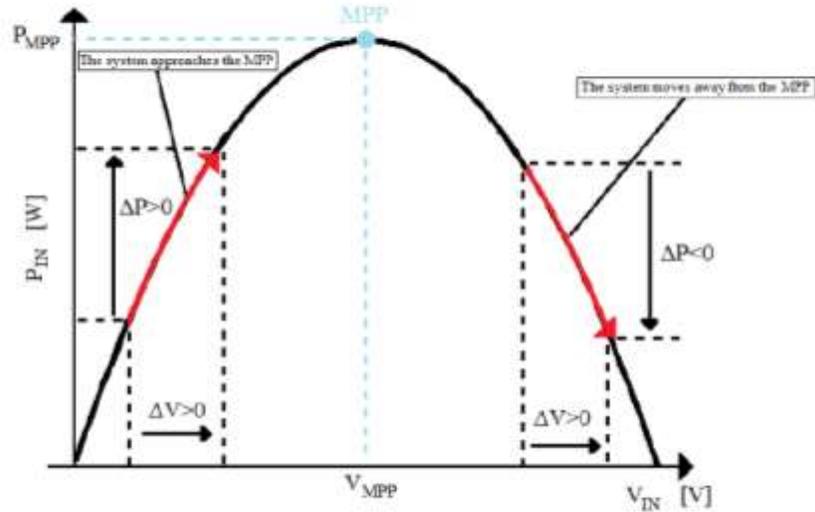


$V_{in}$  est contrôlé par le rapport cyclique dc  
Fraction de période pendant laquelle l'interrupteur est ouvert

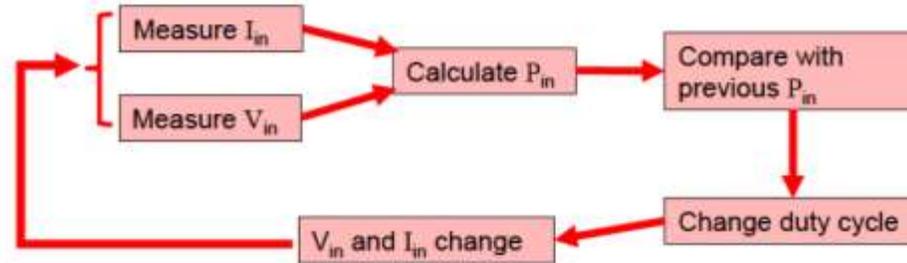
$$V_{in} = V_{out} (1-dc) = V_{batterie} (1-dc)$$



# Recherche du point de fonctionnement maximum (MPPT)



## Algorithme 'Perturb and Observe'

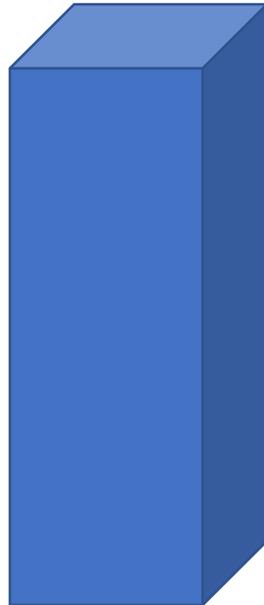


# Rendement de conversion

Calcul pour une jambe :

$$P_{\text{elec}} = (\alpha \Delta T / 2)^2 / R_{\text{int}} = \alpha^2 \Delta T^2 A \sigma / (4L)$$

$$P_{\text{thermique}} = A \lambda \Delta T / L$$

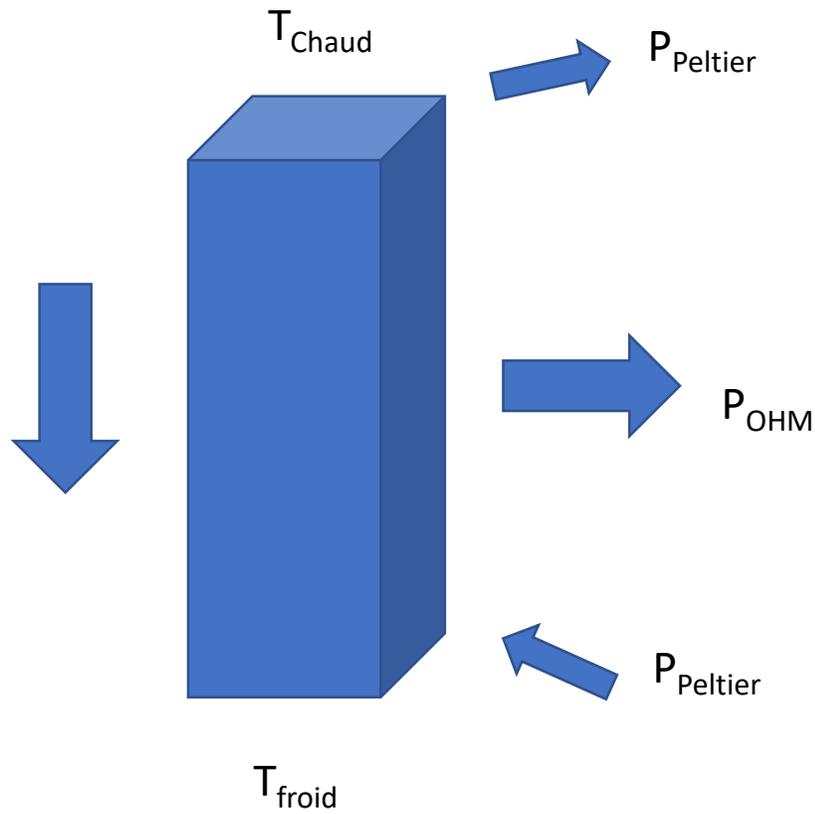


Rendement :

$$\eta = P_{\text{elec}} / P_{\text{therm}} = (\alpha^2 \sigma / \lambda) \times \Delta T$$

$$Z = \alpha^2 \sigma / \lambda$$

Ici on néglige  $P_{\text{peltier}}$  et l'effet Joule



Calcul pour une jambe :

$$P_{\text{elec}} = \alpha^2 \Delta T^2 A \sigma / (4L)$$

$$P_{\text{thermique}} = A \lambda \Delta T / L - \alpha T I + R_{\text{int}}^2 I$$

# Efficacité des matériaux thermoélectriques

## Efficacité

$$\eta_{\max} = \frac{W_{\text{elec}}}{Q_{\text{thermal}}} = \frac{\Delta T}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1+zT} - 1}{\sqrt{1+zT} + \frac{T_c}{T_h}}$$

L'efficacité est fonction de  $zT$  : **coefficient de mérite**

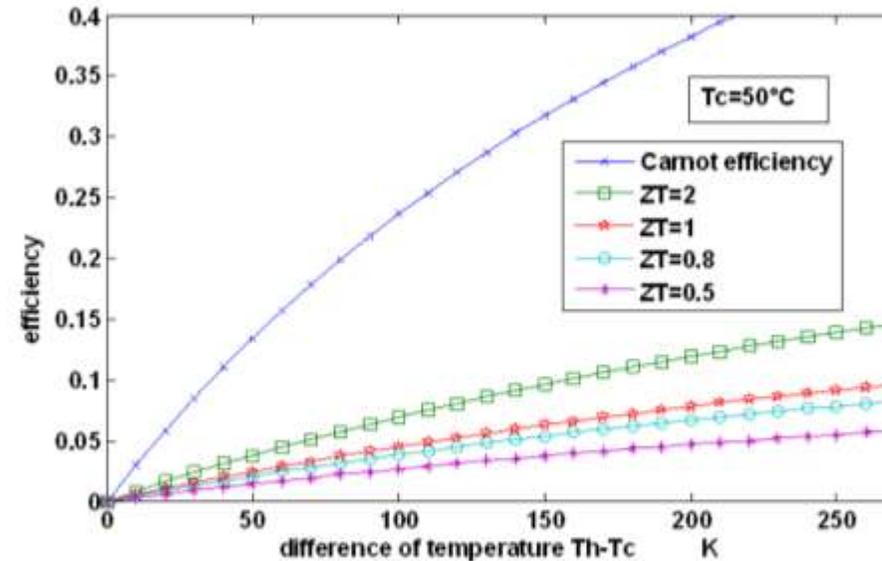
$$Z = \frac{\sigma \alpha^2}{\lambda}$$

$\alpha$  coefficient Seebeck  
 $\sigma$  conductivité électrique  
 $\lambda$  conductivité thermique

$$T = \frac{(T_h + T_c)}{2}$$

L'efficacité est fonction de  $\Delta T$  : **différence de température**

$$\Delta T = T_h - T_c$$



L'efficacité est faible

La thermoélectricité est intéressante uniquement là où les autres systèmes ne sont pas efficaces

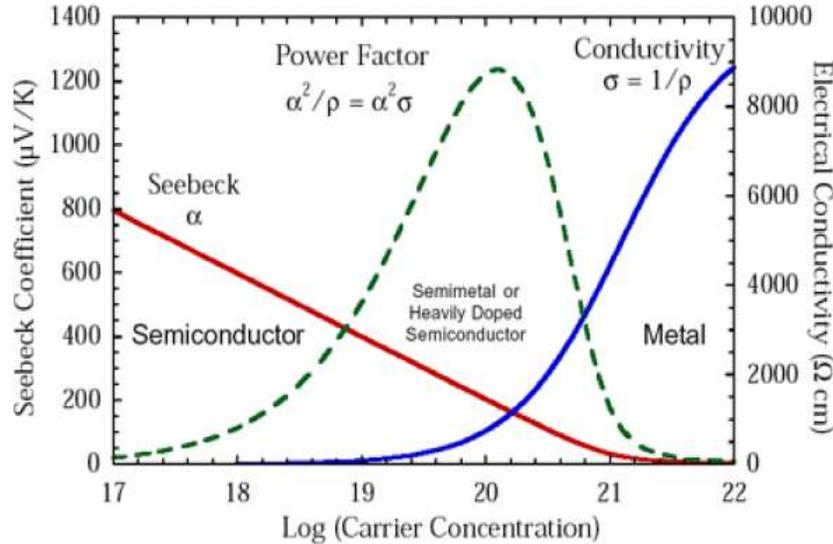
# Thermoelectric materials

How to get a large  $ZT = \frac{S^2 T}{\rho \kappa}$  ????

Problem :  $S$ ,  $\kappa$ ,  $\rho$  are linked through the Density of States ( $n$ )

$$PF = S^2/\rho$$

Heavily doped semi-conductors and semi-metals are the best candidates



## I.2.7. Les différentes classes des matériaux utilisés en thermoélectricité :

Il existe trois types de matériaux, les métaux (sans gap), les semi-conducteurs (gaps petits) ainsi que les isolants (grands gaps). Le tableau I.1 donne quelques ordres de grandeur des propriétés thermoélectrique.

Propriétés	Métaux	Semi-conducteurs	Isolants
$S$ ( $\mu.V.K^{-1}$ )	$\sim 5$	$\sim 200$	$\sim 10^3$
$\sigma$ ( $\Omega^{-1}.cm^{-1}$ )	$\sim 10^6$	$\sim 10^3$	$\sim 10^{-12}$
$Z$ ( $K^{-1}$ )	$\sim 3.10^{-6}$	$\sim 2.10^{-3}$	$\sim 5.10^{-17}$

Tableau I.1 : Propriété thermoélectrique des métaux, semi-conducteurs et isolants. [1]

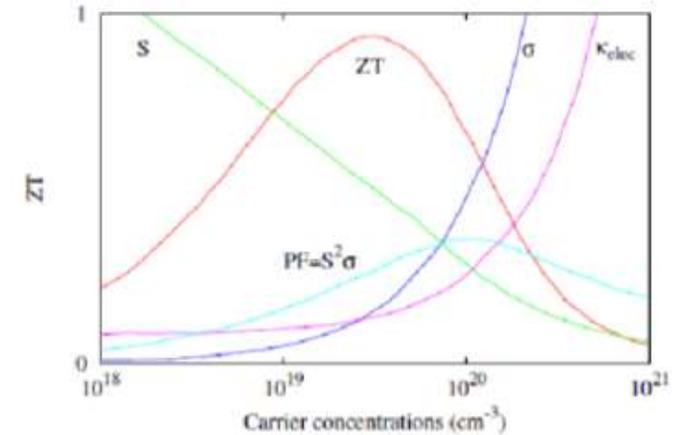
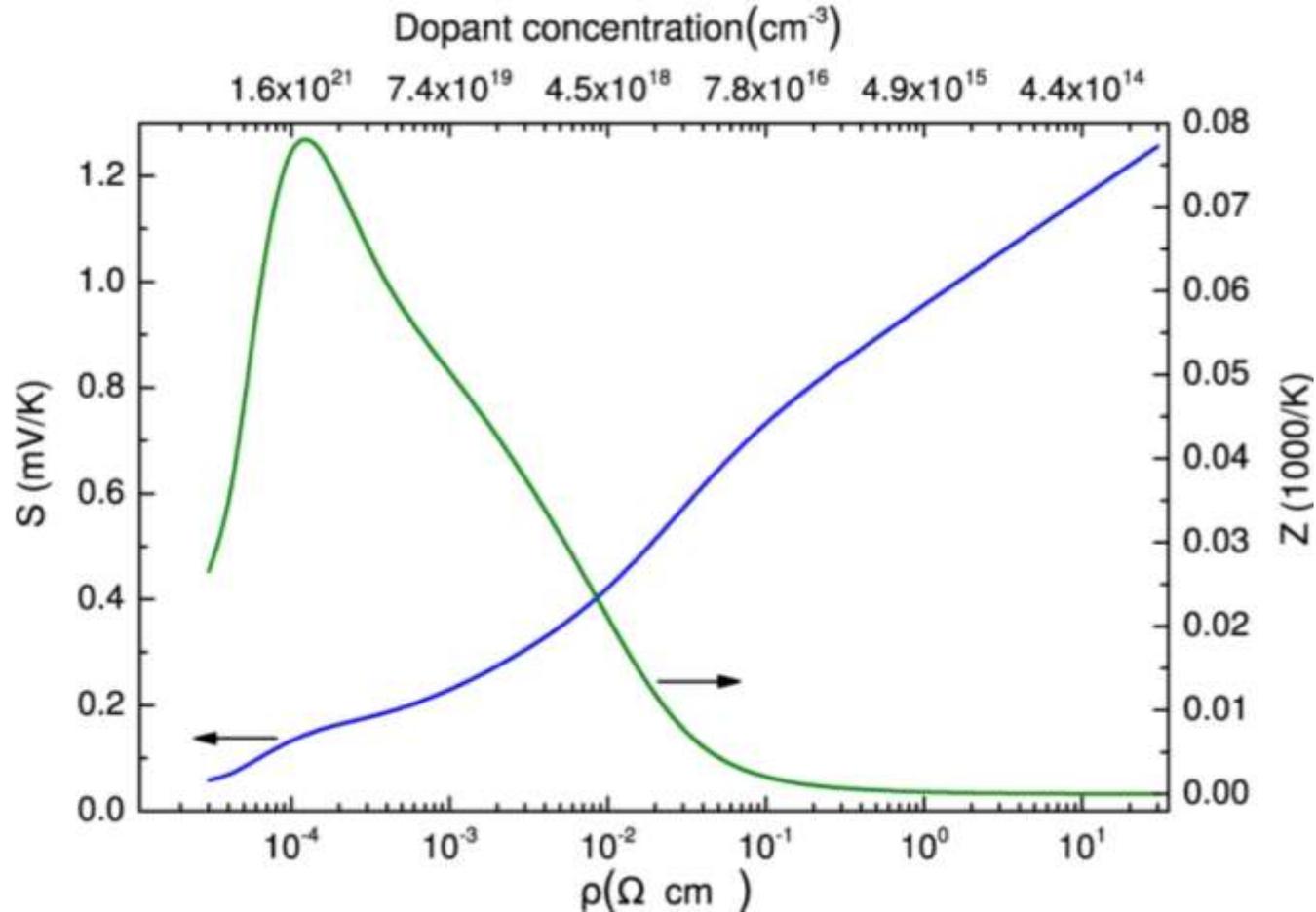


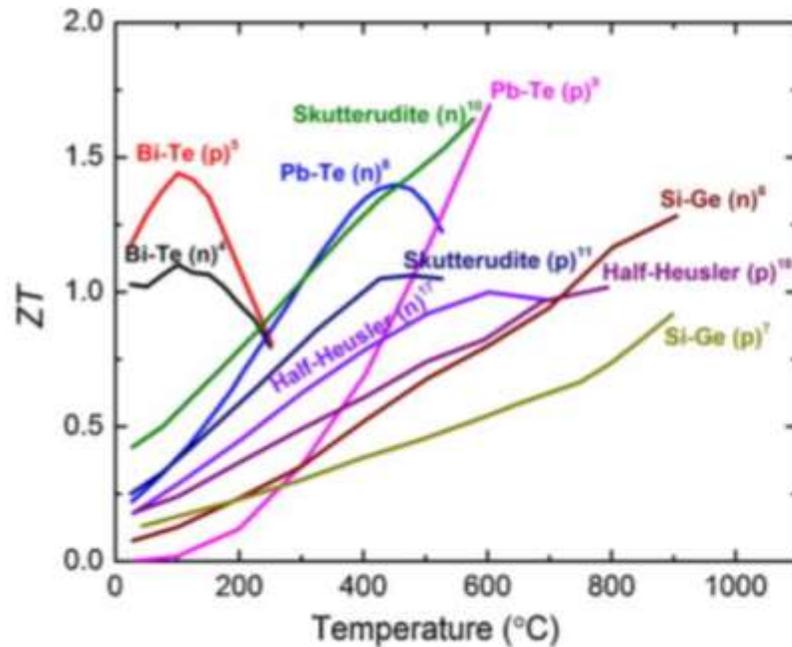
Figure I.5 : Evolution de la figure de mérite ZT et des différentes propriétés électriques et thermiques en fonction de la concentration en porteurs de charges. [3]

# Variation de $\alpha$ ( ou $S$ ) avec la conductivité du matériau



## Valeurs de ZT pour différents matériaux

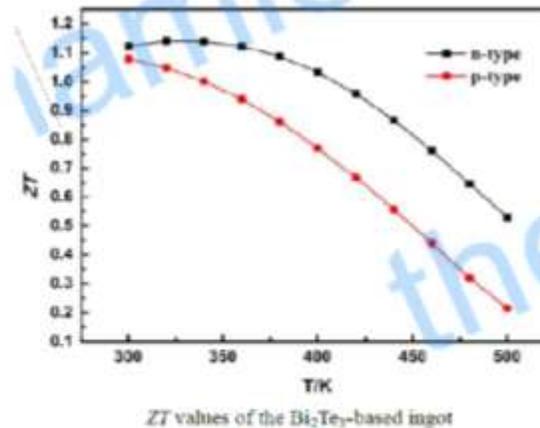
### Laboratoire



Valeur de ZT pour différents matériaux en laboratoire \*

### Industrie

#### Barreau industriel (Thermonamic 2015)



\* Shuo Chen, Zhifeng Ren Recent progress of half-Heusler for moderate temperature thermoelectric applications materials today

# Thermoelectric efficiency

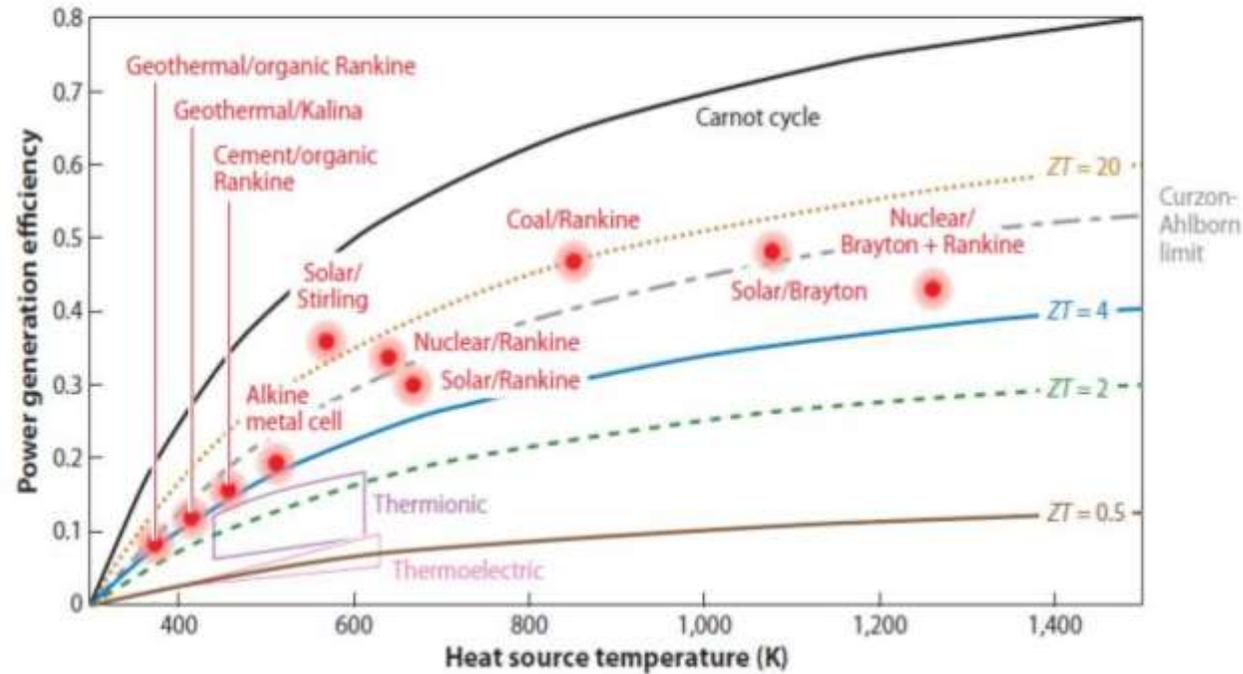


Figure 2

Thermoelectric power generation efficiency versus  $T_{\text{hot}}$  ( $T_{\text{cold}} = 300$  K). Efficiency for conventional mechanical engines as well as the Carnot limit and the Curzon-Ahlborn limit are also shown. Adapted from References 14 and 15.

Ali Shakouri, Ann. Rev. Mater. Res. 41, 399 (2011)

# Refroidissement qui peut être atteint par un module Peltier

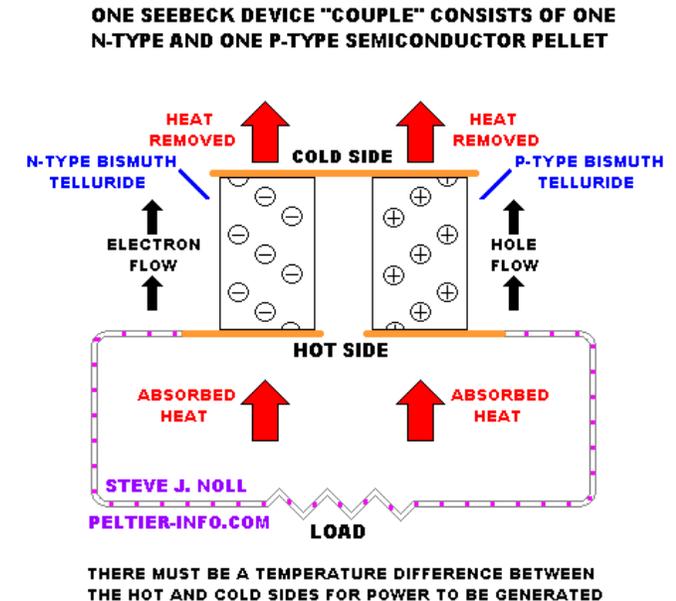
TD : Trouver la différence de température maximale possible pour un courant  $I$  injecté dans une jambe d'un Peltier.

On considère un module d'aire  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  et de hauteur  $2 \text{ mm}$   
La conductivité thermique du matériau est de  $1 \text{ W/m.K}$

Un coefficient Seebeck de  $200 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , la résistivité électrique du matériau à  $300 \text{ K}$  est de  $2 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$ .

On notera  $T_c$  ( $T_{\text{cold}}$ ) ,  $T_H$  ( $T_{\text{chaud}}$ )

On tracera  $T_c$  pour  $I$  variant de  $0$  à  $5 \text{ A}$

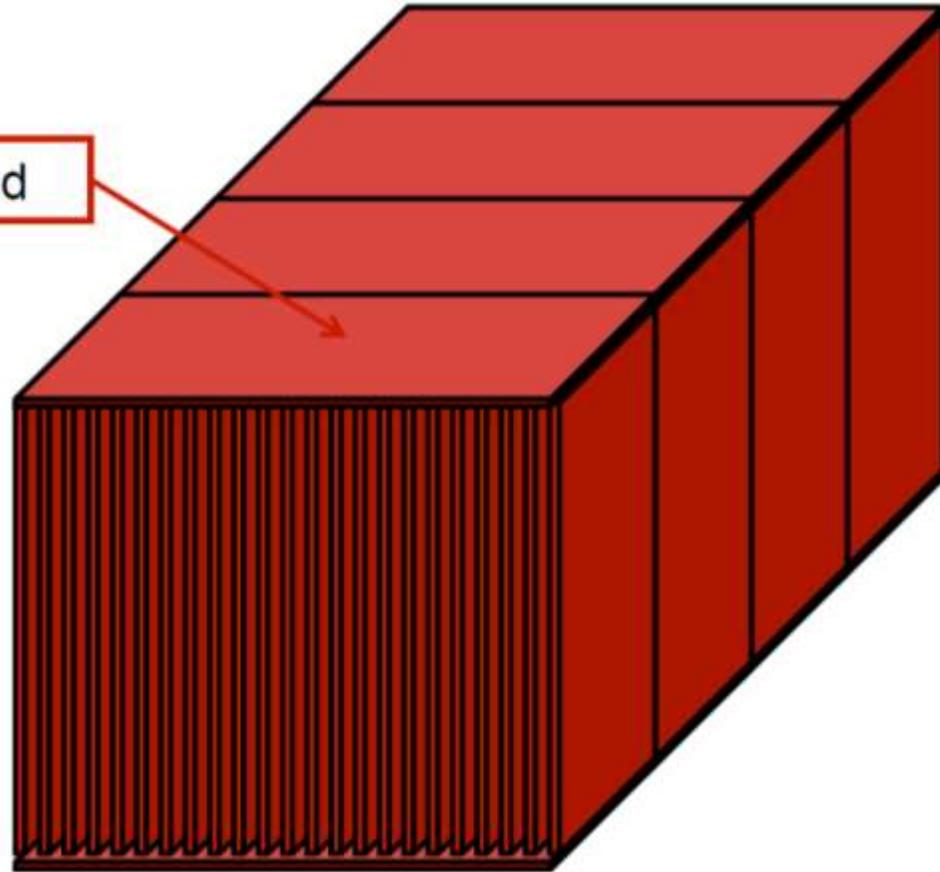


Demonstration !!!

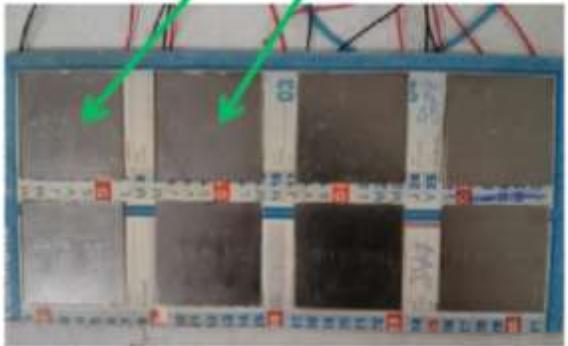
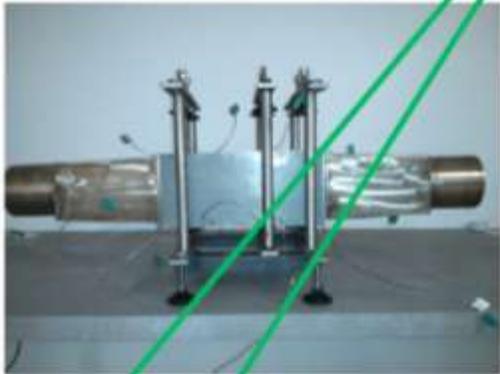
# Générateur thermoélectrique en situation



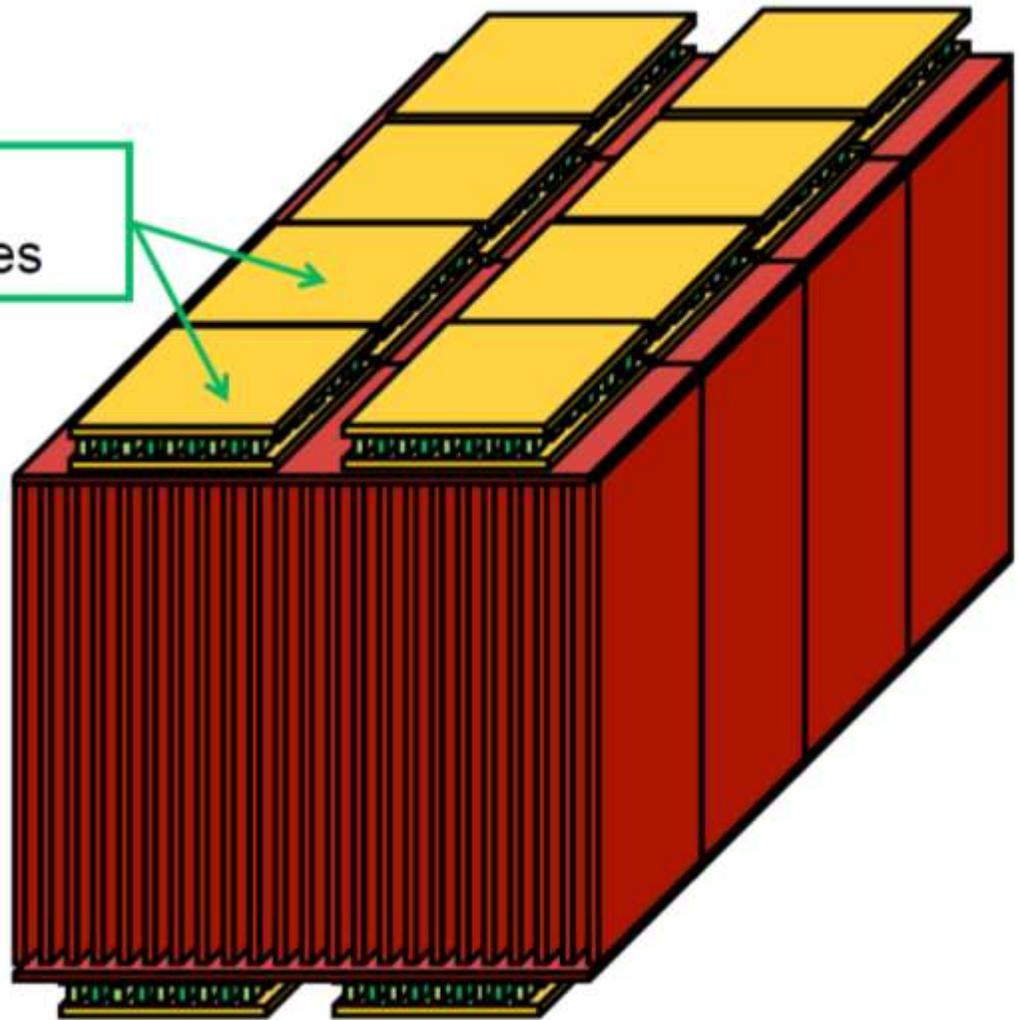
Échangeur chaud



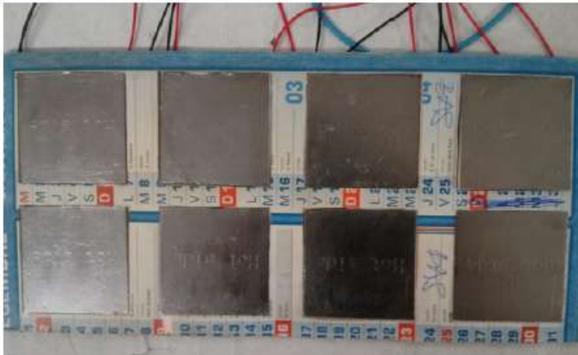
Modules  
thermoélectriques



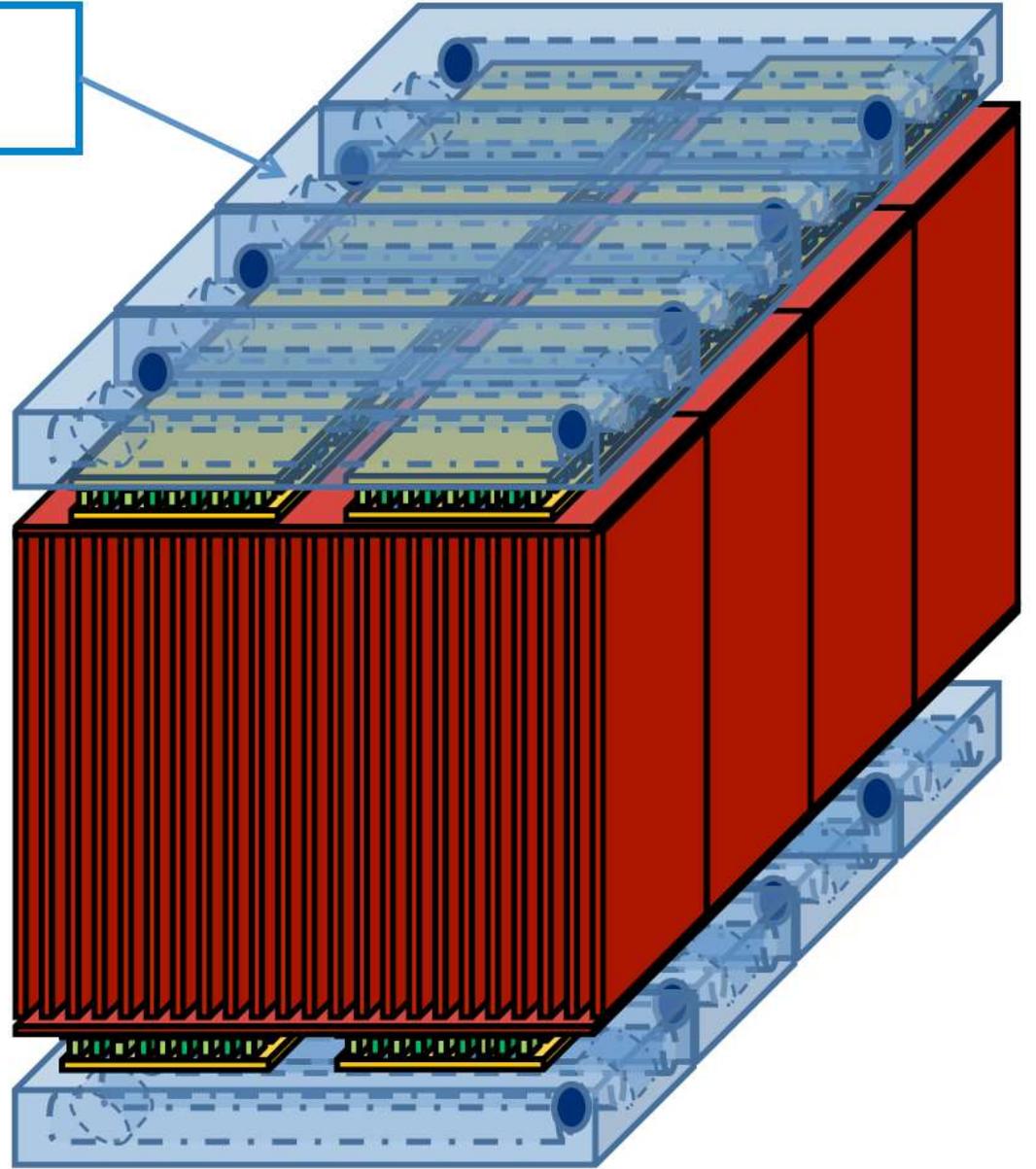
Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>  
Thermonamic



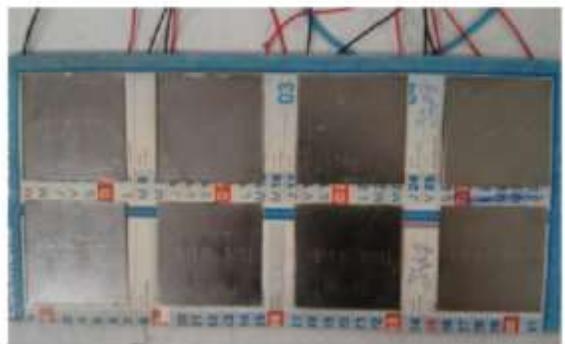
Échangeurs  
froids



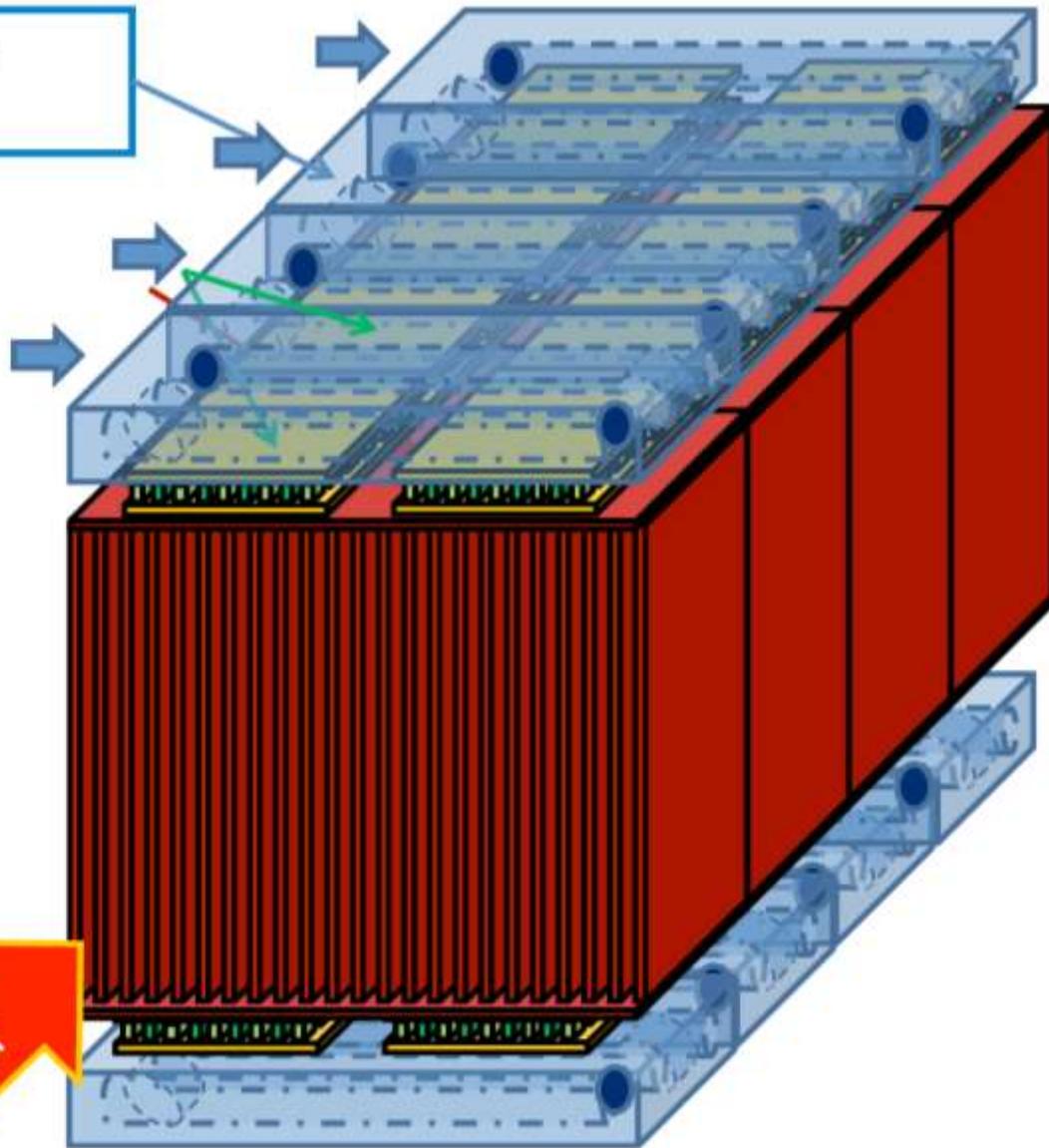
$\text{Bi}_2\text{Te}_3$   
Thermonamic



Échangeurs  
froids



$\text{Bi}_2\text{Te}_3$   
Thermonamic



# Applications

- **production en milieu extrême : les sources dédiées au TEG**
- **récupération des énergies thermiques perdues : utilisation de sources chaudes à optimiser**
- **production d'électricité décentralisée : sources d'énergies renouvelables**
- **micro-production : toutes les sources de chaleurs sont acceptables**
- **solaire thermoélectrique : source d'énergie le Soleil.**

### Applications critiques exigeantes :

- une source d'énergie extrêmement fiable sur des périodes très longues.
- conditions climatiques extrêmes :
  - très chaudes,
  - très froides,
  - très humides,
  - très sèches.
- maintenance la plus faible possible
  - accès en hélicoptère
  - plusieurs heures de trajet
- maintenance inexistante dans le cas des expéditions spatiales
- fonctionnement dans le vide
- fortes vibrations
- peu sensible aux radiations.

Le coût du watt n'est pas primordial

## Applications spatiales

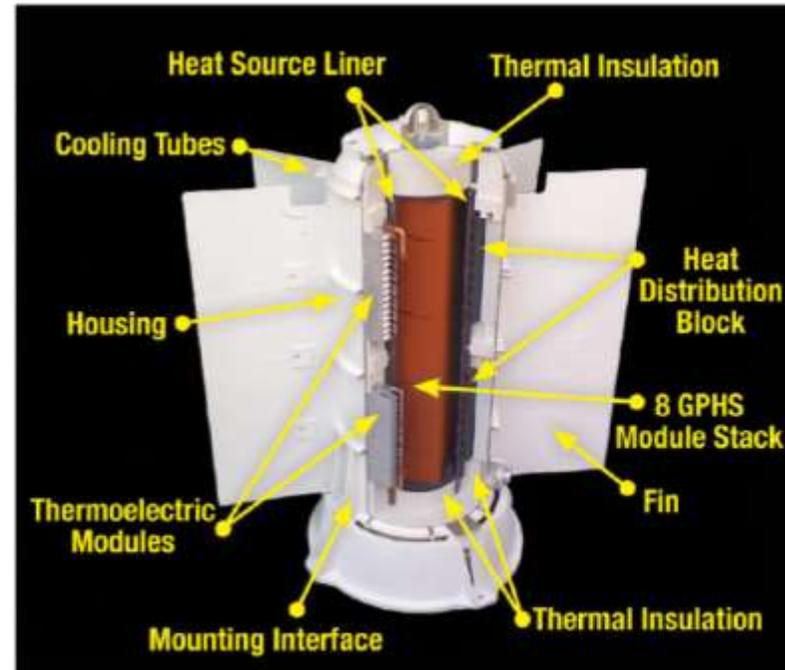
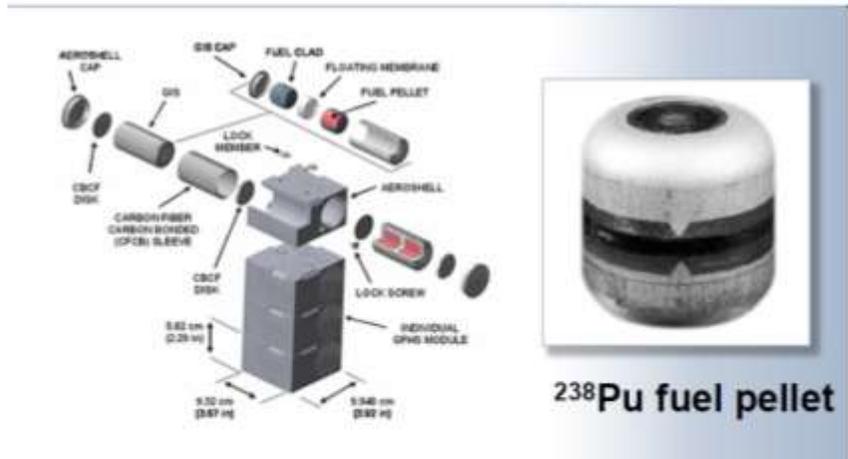
Première utilisation d'un générateur thermoélectrique (Pb -Te) : 1961  
satellite de navigation Transit (1961) de la U.S. Navy.

SNAP-3 (Space Nuclear Auxiliary Power) générateur auxiliaire nucléaire spatial

Puissance électrique ~ 2,7 watts  
a fonctionné pendant plus d'une quinzaine d'années

### Générateurs thermoélectriques radio-isotopiques RTG Radioisotope Thermoelectric Generator

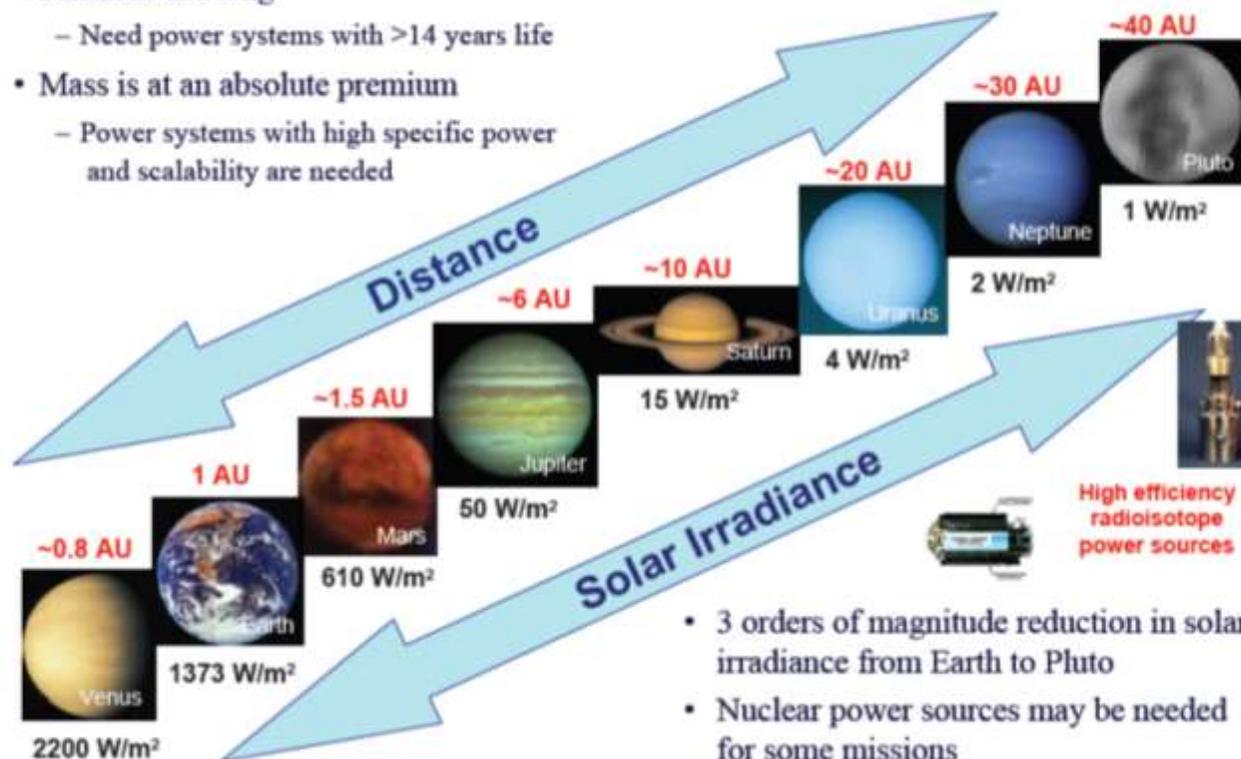
Les générateurs radio-isotopiques utilisent la chaleur résultant de la désintégration radioactive naturelle du plutonium 238  
 Dioxyde de plutonium  $^{238}\text{PuO}_2$ .



## Applications spatiales

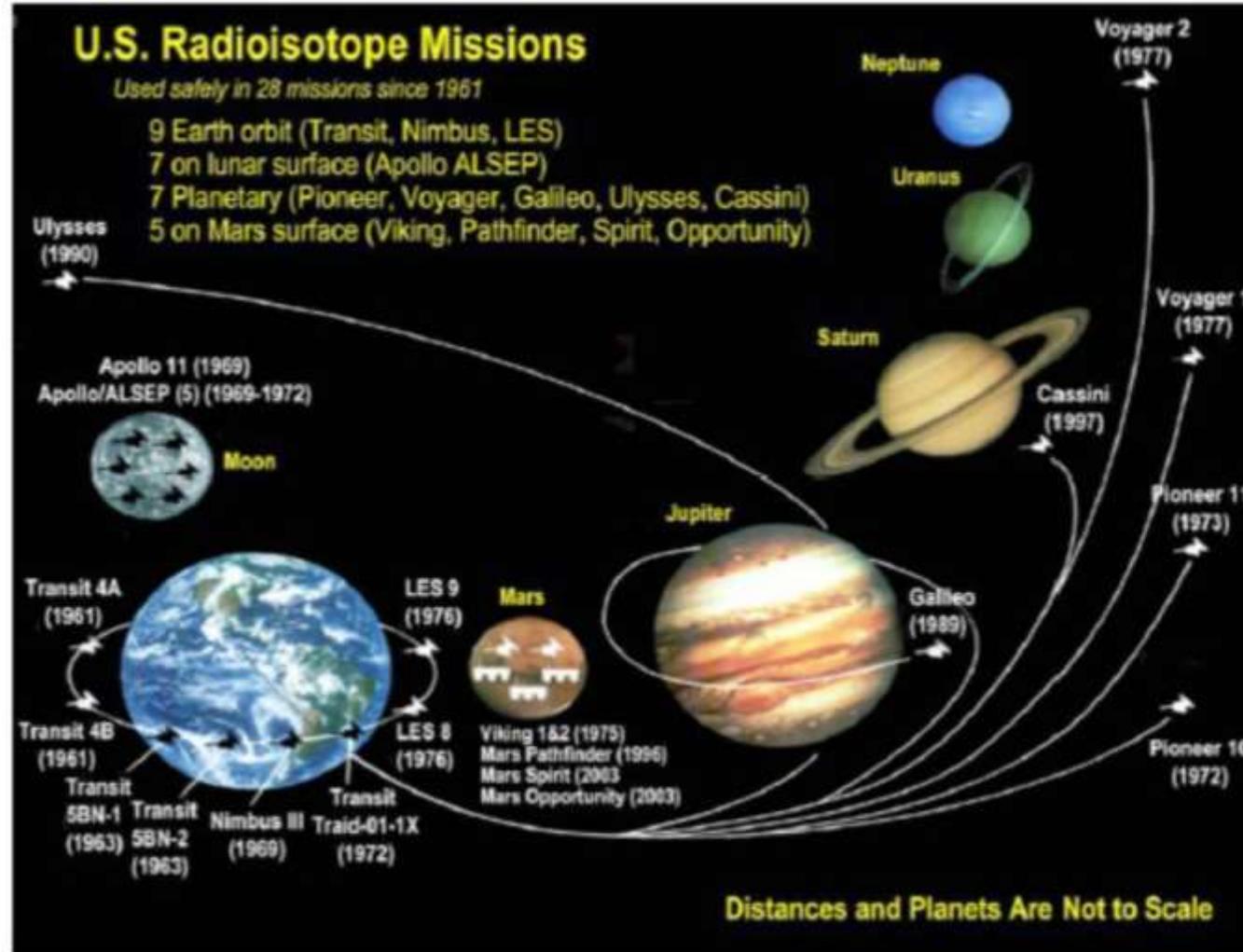
TD

- Missions are long
  - Need power systems with >14 years life
- Mass is at an absolute premium
  - Power systems with high specific power and scalability are needed

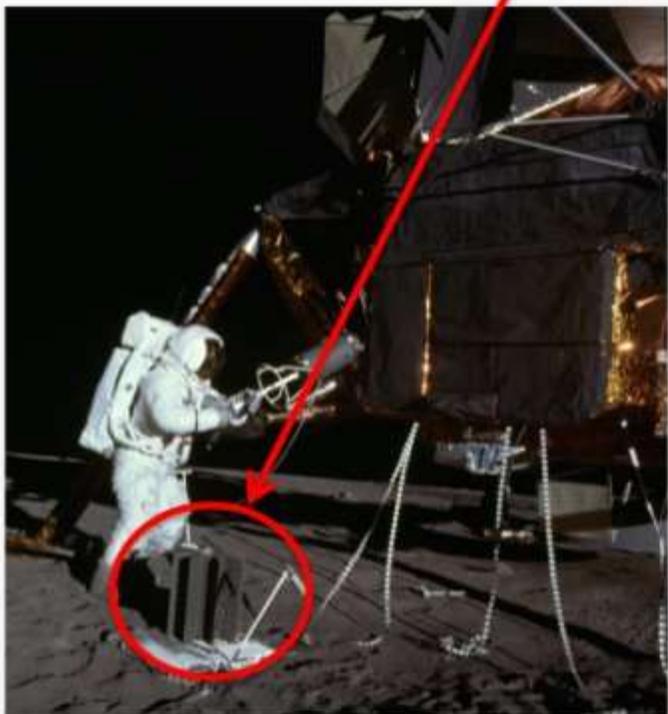


- 3 orders of magnitude reduction in solar irradiance from Earth to Pluto
- Nuclear power sources may be needed for some missions

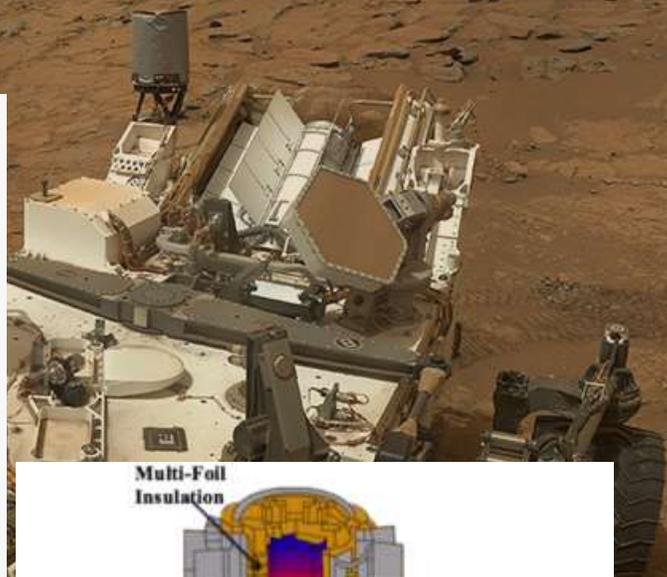
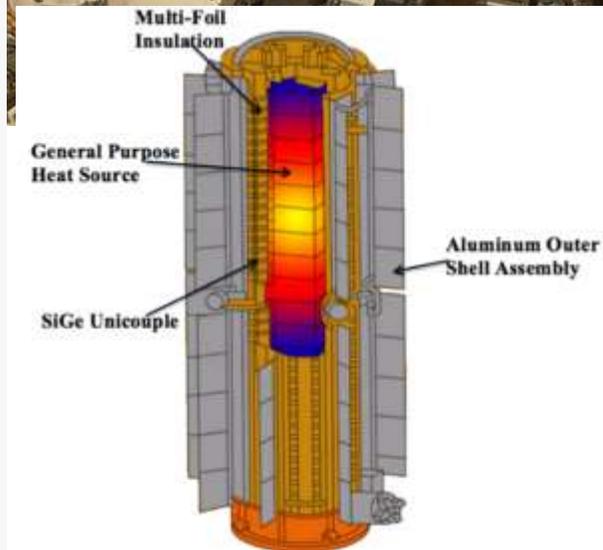
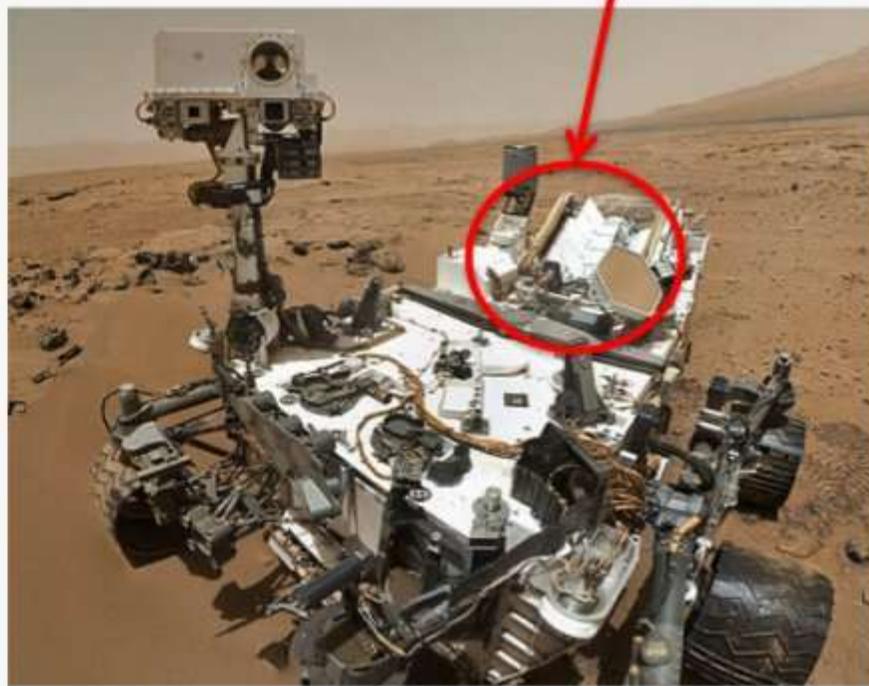
# Applications spatiales



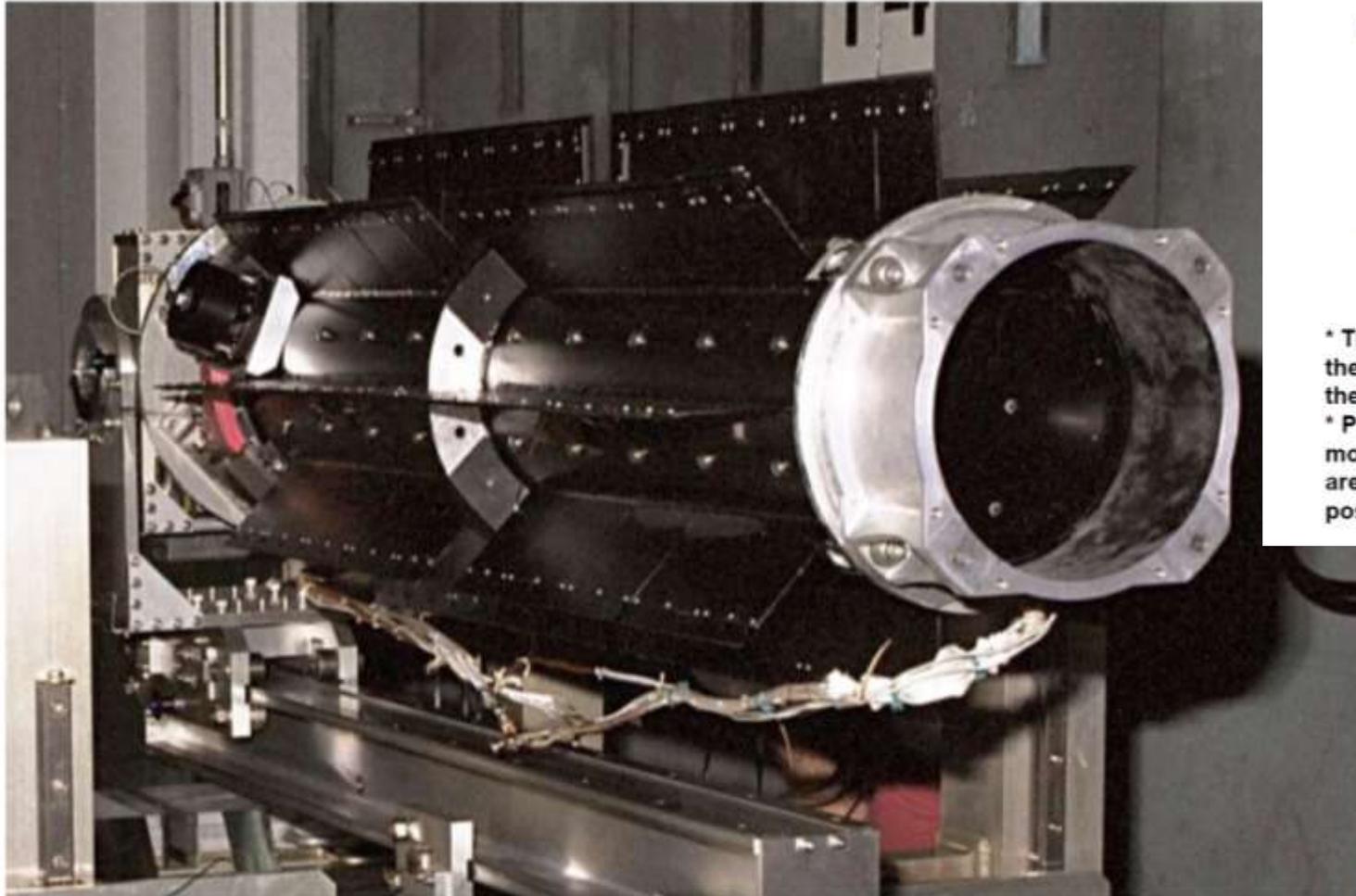
1971: Apollo 14 mission, SNAP RTG



Now: Curiosity Mars rover MM RTG



# Applications spatiales

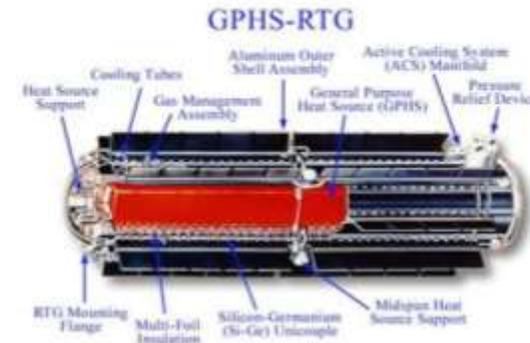


Cassini's RTG before mounting

<http://solarsystem.nasa.gov/rps/rtg.cfm>

## GPHS RTG

56 kg  
42.2 cm diameter  
114 cm long  
Needs about 100 kg of TE materials



Cassini  
 $T_0 = 276 \text{ W}$   
 $T_{10.75} = 216 \text{ W}$   
 $T_{16} = 199 \text{ W}$

### GPHS RTG Description

\* The GPHS RTG consists of a cylindrical fuel supply surrounded by rings of thermocouples. There are cooling fins attached to the cold shoes of the thermocouples.

\* Plutonium-238 is the fuel source. The fuel elements are modularized with each module producing approximately 250 watts of thermal power. The fuel modules are encased in a heat and impact resistant shell designed to prevent any postulated vehicle accident from releasing plutonium.

## Applications spatiales

Radioisotope Thermoelectric Generator RTG	Electric Power at beginning of mission per RTG	Number of RTG	Mission	Destination	Year	Design lifetime	Lifetime
Space Nuclear Auxiliary Power SNAP-3 <b>PbTe</b>	2,7 watts	1	Transit	Navigation satellite	1961		15 years
SNAP-19B RTG <b>PbTe-Tags</b>	28.2 watts	2	Nimbus III	meteorological satellite	1969		
SNAP-19 RTG <b>PbTe-Tags</b>	42.6 watts	2	Viking 1	Mars landers	1975	90 days	6 years
		2	Viking 2	Mars landers	1975	90 days	4 years
	40.3 watts	4	Pioneer 10	Jupiter, asteroid belt	1972	5 years	30 years
		4	Pioneer 11	Jupiter Saturn	1973	5 years	22 years
SNAP-27 RTG <b>PbSnTe</b>	70 watts		Apollo 12, 14, 15, 16, 17	Lunar Surface	1969-72	2 years	5-8 years
Multi-Hundred Watt (MHW) RTG <b>SiGe</b>	158 watts	3	Voyager 1 & 2	edge of solar system	1977		still operating over 38 years
General Purpose Heat Source (GPHS) RTG <b>SiGe</b>	292 watts	2	Galileo	Jupiter	1989		14 years
		3	Cassini	Saturn	1997		still operating after 14 years
		1	Ulysses	Jupiter	1990		21 years
		1	New Horizons	<b>Pluto (12/2014)</b> , Kuiper Belt	2006		still operating after 9 years
Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator MMRTG <b>PbTe-Tags</b>	110 watts	1	Curiosity	Mars Surface 5 Aug 2012	2011		Expected 14 years

## 🚀 Source d'énergie de Voyager 1

- **Pas de panneaux solaires** (trop peu efficaces au-delà de Jupiter).
- **Alimentation par RTG (Radioisotope Thermoelectric Generators)** : trois unités de type *MHW-RTG* (Multi-Hundred Watt RTG).
- Chacune contenait au départ environ **4,5 kg de plutonium-238** (sous forme d'oxyde), qui se désintègre en produisant de la chaleur.
- La chaleur est convertie en électricité par effet Seebeck dans des thermocouples.

## ⚡ Puissance électrique disponible

- **1977 (lancement)** : environ **470 W** d'électricité disponibles pour l'ensemble de la sonde.
- **Diminution progressive** : la puissance chute à cause de
  1. la décroissance radioactive du  $^{238}\text{Pu}$  (demi-vie = 87,7 ans),
  2. la dégradation des thermocouples.
- **Aujourd'hui (2025)** : on est autour de **250 W** utilisables (valeur estimée, la NASA publie encore = 255 W en 2023).

## 📷 Conséquences pratiques

- Au fil des ans, la NASA a dû **éteindre des instruments** (spectromètres, caméras, chauffages) pour conserver l'essentiel :
  - magnétomètre,
  - spectromètre de particules,
  - antenne grand gain pour communiquer avec la Terre.
- Les chauffages (résistances de maintien en température) ont aussi été éteints, ce qui fait fonctionner certains instruments en conditions plus froides que prévu.

## 🔍 Comparaison lancement / maintenant

Date	Puissance électrique (RTG)	Instruments actifs
1977 (départ)	~470 W	Tous (caméras, spectros, détecteurs)
1990 (au-delà de Neptune)	~400 W	Caméras arrêtées, reste = 10 instruments
2025 (aujourd'hui)	~250 W	4 instruments scientifiques principaux + télécommunications

## ⚠️ Horizon

- On estime que Voyager 1 pourra fonctionner jusqu'à **2030 environ**, avec encore juste assez d'énergie pour maintenir quelques instruments et le lien r. ↓ .

Bonne remarque 😊, car **Voyager 2** est presque jumelle de Voyager 1, mais il y a quelques nuances.

## 🚀 Source d'énergie

- Identique : **3 RTG de type MHW-RTG** avec du plutonium-238.
- Même principe : désintégration → chaleur → conversion thermoélectrique.
- Pas de panneaux solaires non plus.

## ⚡ Puissance électrique disponible

- **1977 (lancement)** : ~470 W, comme Voyager 1.
- **Perte progressive** (radioactivité + vieillissement des thermocouples).
- **Aujourd'hui (2025)** : ~255 W utilisables, quasiment la même valeur que Voyager 1.

## 📷 Gestion des instruments

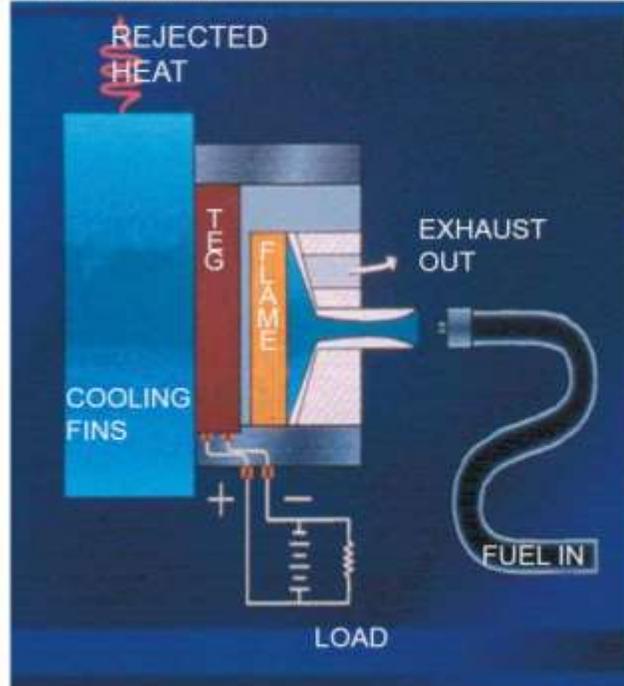
- **1989** : survol de Neptune (dernière planète), la caméra et certains instruments sont ensuite arrêtés.
- Depuis, la NASA coupe progressivement : spectros, détecteurs de plasma, certains chauffages.
- **2023** : coupure temporaire du système de distribution d'énergie (il y a eu un bug logiciel), mais récupéré.
- **2025** : environ **4 instruments scientifiques** actifs, plus la télécommunication (comme Voyager 1).

## 🔍 Comparaison Voyager 1 vs Voyager 2

Aspect	Voyager 1	Voyager 2
Lancement	1977-09-05	1977-08-20
RTG initiaux	~470 W	~470 W
Puissance dispo 2025	~250 W	~255 W
Situation actuelle	Espace interstellaire (au nord du plan galactique)	Espace interstellaire (au sud du plan galactique)
Instruments encore actifs	4 principaux	4 principaux
Fin estimée	~2030	~2030 (un peu plus si gestion fine)

👉 Les deux sondes consomment à **peu près la même énergie aujourd'hui qu'un petit grille-pain domestique (250 W)**, contre presque le double à l'époque du lancement.

## Production en site isolé



Pipelines pétrole ou gaz  
Exploitations minières  
Plateformes en mer  
Sites de télécommunications

500 watts 24 volts  
Propane 38kg/jour



Propane 38kg/jour → Energie par jour= 1900MJ=527kW.h  
Pouvoir calorifique 50MJ/kg

500 W électrique → Energie par jour= 12 kW.h

**Efficacité : 2.2 %**

Application critique nécessitant une source d'énergie extrêmement fiable  
Maintenance très faible  
Grande durée de vie  
Conditions climatiques extrêmes (chaud, froid, humide, sec)  
Situation isolée, difficile d'accès



Avril 2014

**GENTHERM**



**Pipeline:**  
5000 watts pour SCADA (supervision et acquisition)  
communications et  
protection cathodique d'un pipeline de gaz- Inde



**Pipeline:** 550 watts  
Système de communications Andes ,Chill

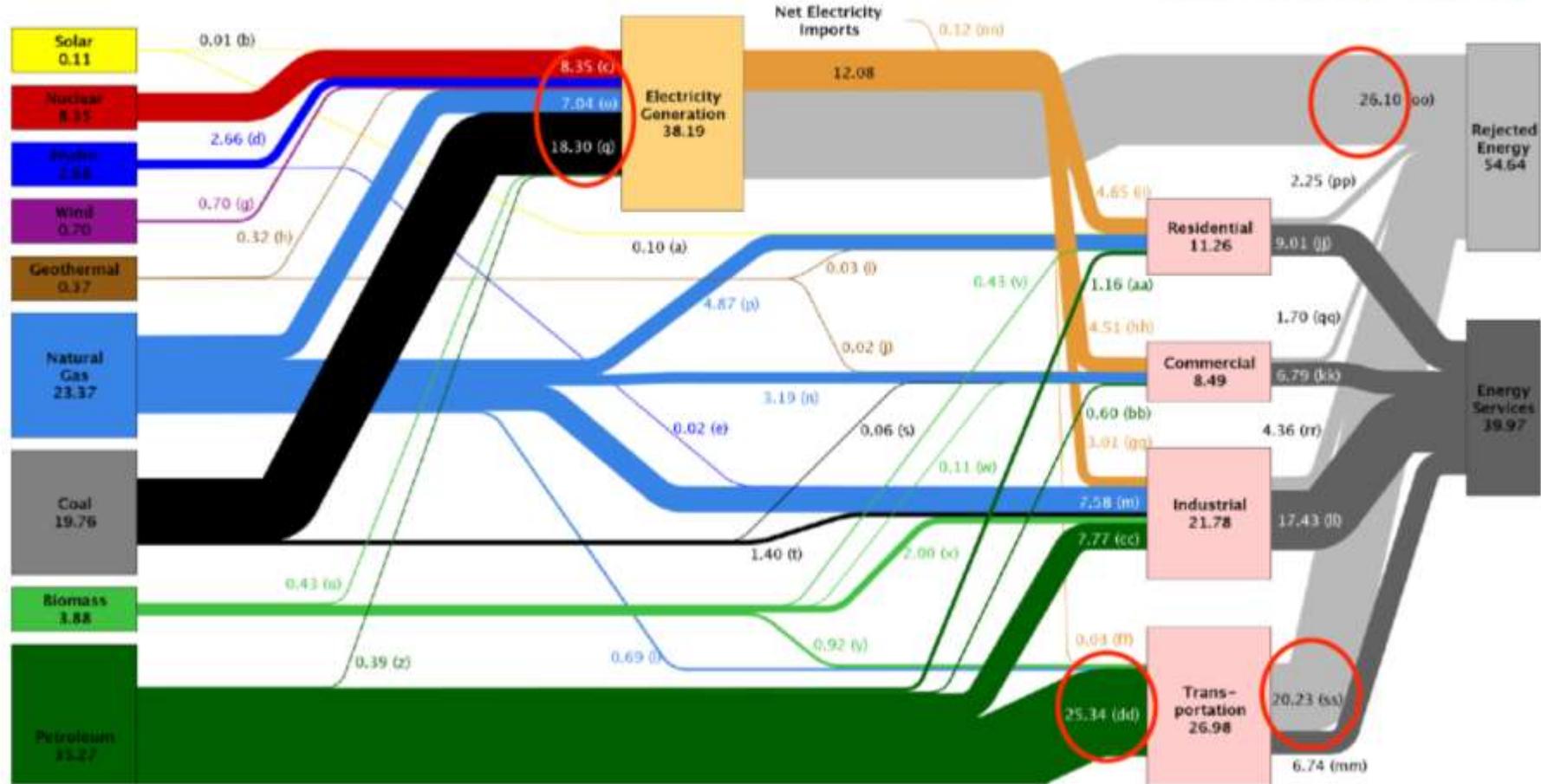


**Marché de niches pour les TEGs**

**Off shore:** 200 watts  
communications et équipements de  
sécurité, systèmes multiples - Thaïlande

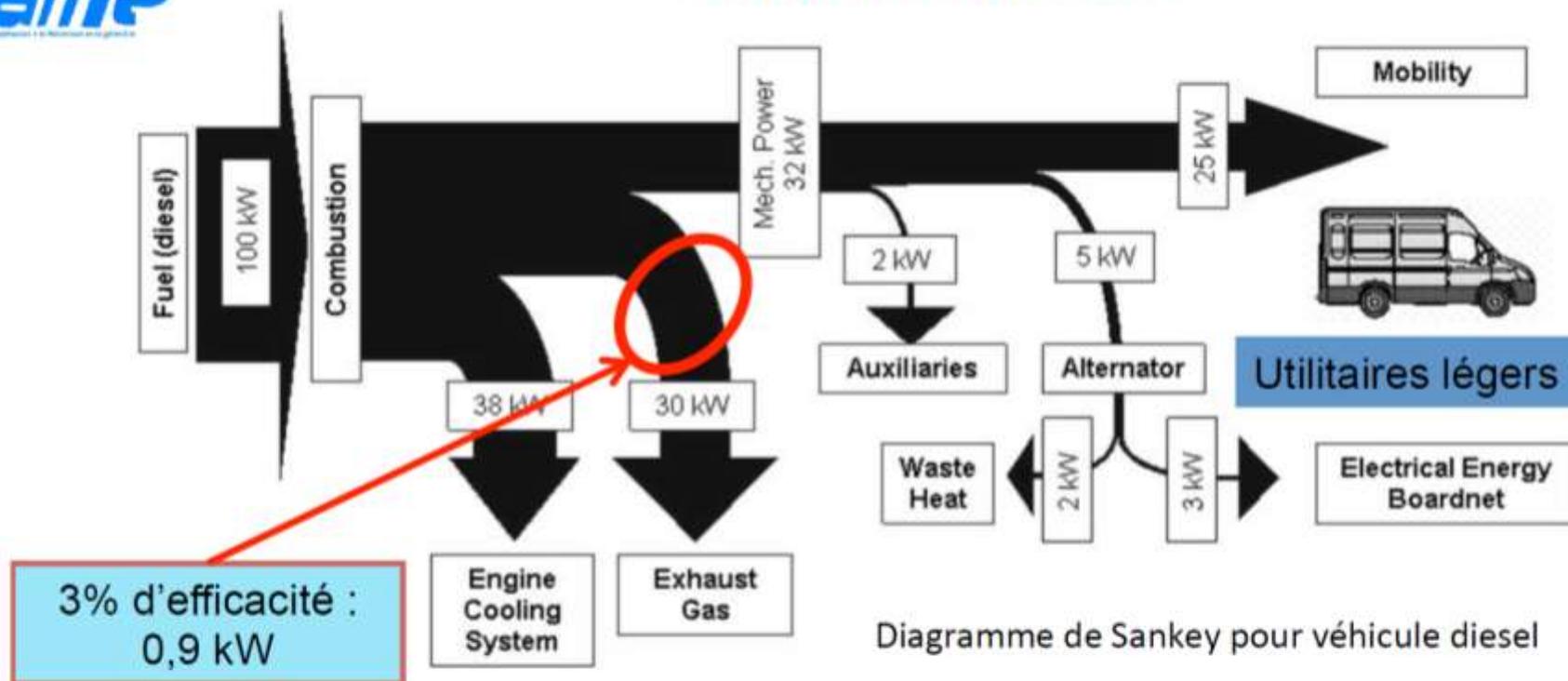
# Récupération d'énergies perdues (chaleur fatale)

Estimated U.S. Energy Use in 2009: ~94.6 Quads



1 quad =  $2,93 \cdot 10^{11}$  kW.h =  $1,055 \cdot 10^{18}$  J

## Récupération d'énergies perdues Secteur automobile



### Emissions de CO<sub>2</sub> fixées par l'UE

Objectif pour les petits véhicules utilitaires : 135g/km pour 2021  
95€ par gramme supplémentaire et par véhicule en 2021.

900W<sub>el</sub> correspondent à une réduction de 13g/km CO<sub>2</sub>  
(Fiat Research Center)

Prototypes :

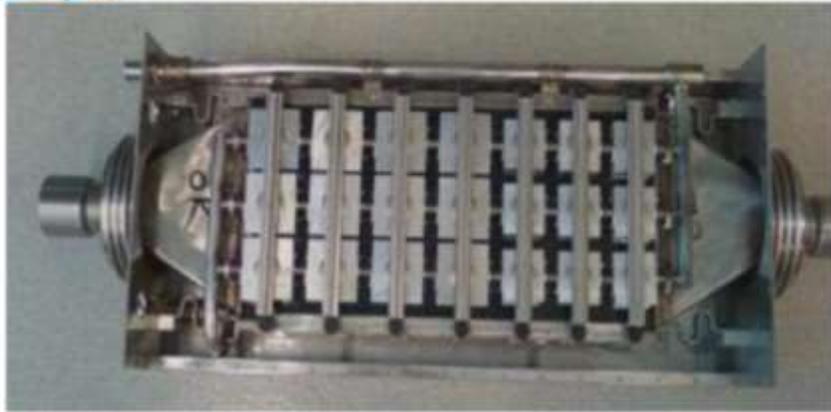
- FIAT
- FORD
- GM
- BMW
- Amerigon
- Renault truck
- Volvo

## Récupération d'énergies perdues Secteur automobile

### Installation d'un TEG sur un véhicule

- ne pas modifier le point de fonctionnement du moteur  
l'échangeur ne doit pas trop perturber l'échappement des gaz : pertes de charges très limitées (quelques dizaines de millibars).
- $\Delta T$  important **mais** températures limites des matériaux TE  
contrôle commande : capteurs, actionneurs pour détourner partie totalité des gaz chauds – bypass-
- énergie électrique conditionnée (convertisseur DC/DC)
- recyclage des matériaux
- fiabilité à long terme (vieillessement)
- coût économique compétitif

## Récupération d'énergies perdues Secteur automobile



Chevy Suburban

Économie de carburant prévue **3%**.

**Prévision des calculs : 350 à 600 watts** en ville et sur autoroute respectivement



prototype de TEG modules  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$

**Première expérience : 25 watts**

## Récupération d'énergies perdues Secteur automobile

Ford Fusion

moteur V6 3.0L



échappement

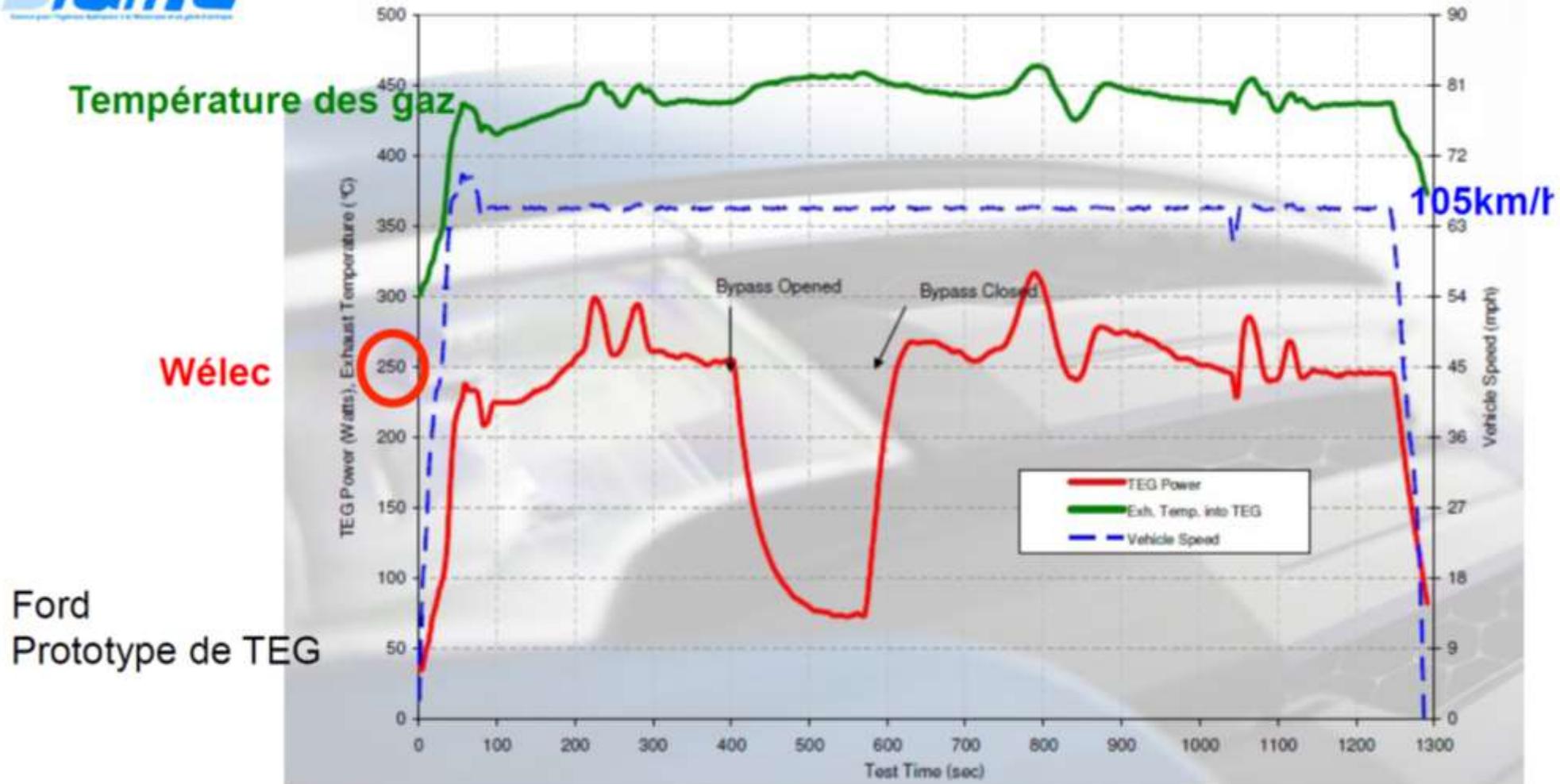
Half-Heusler +  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  segmenté

Puissance prévue: ~500 watts (pic)

## Récupération d'énergies perdues Secteur automobile



## Récupération d'énergies perdues Secteur automobile



Une dérivation est nécessaire pour protéger

**Puissance calculée ~500 watts (pic) !!!**

C. Maranville "Thermoelectric opportunities for light-duty vehicles." Ford Motor Company 2012



## Récupération d'énergies perdues Secteur automobile

**Véhicule IVECO Daily, 2.3l moteur diesel**

### Conception

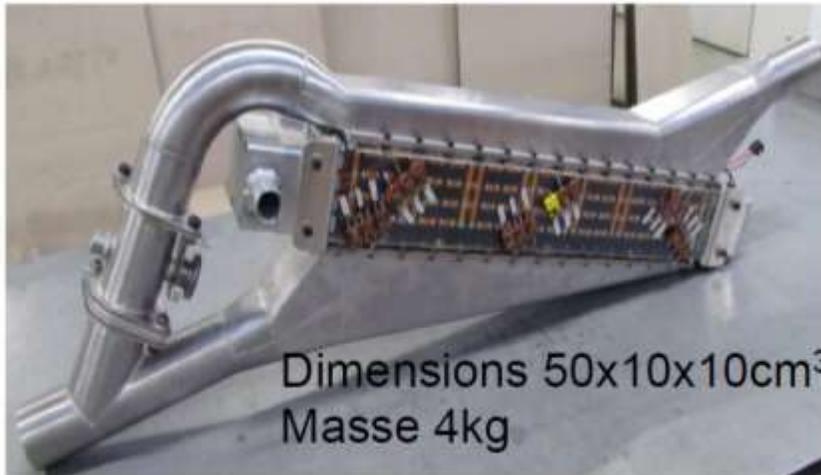
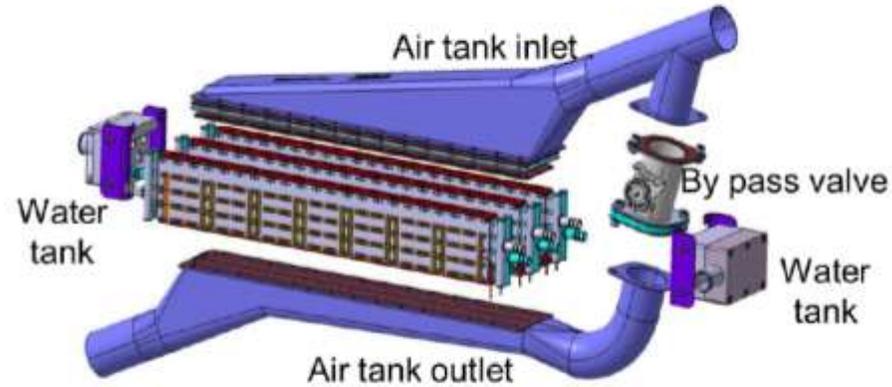
Vitesse : 130 km/h

Température des gaz d'échappement : 450°C

Débit : 70 g/s à 140 g/s

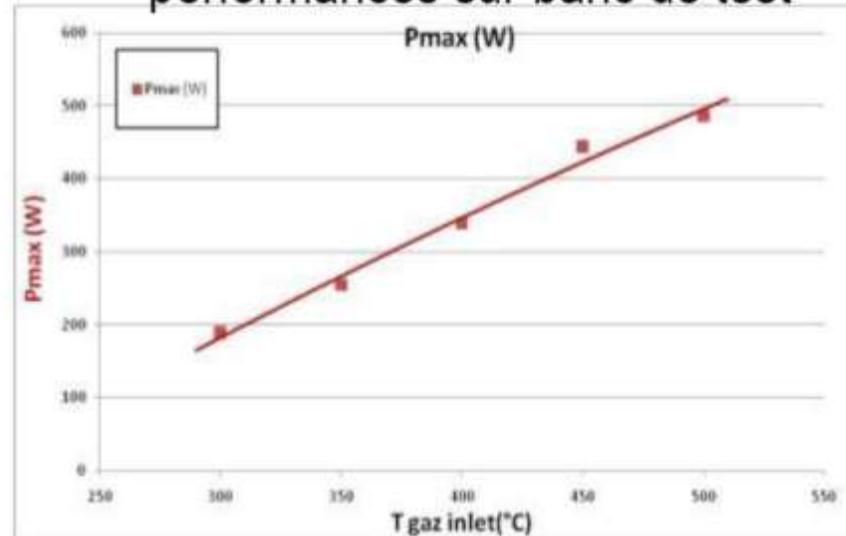
### Objectif

TEG : 1 kW



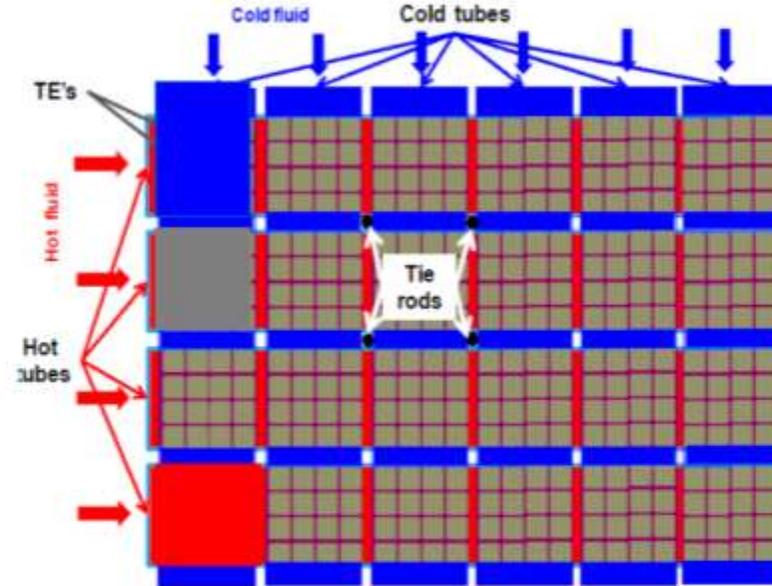
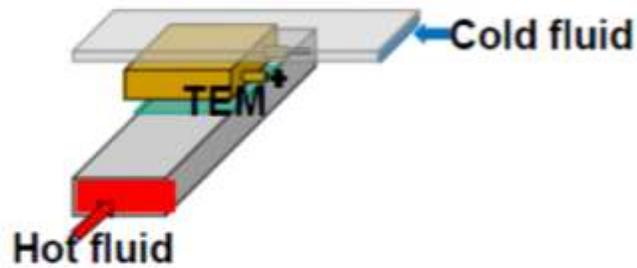
Dimensions 50x10x10cm<sup>3</sup>  
Masse 4kg

### performances sur banc de test



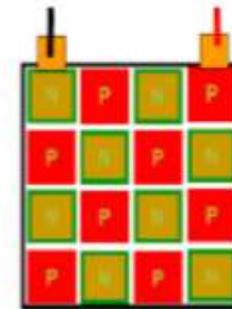
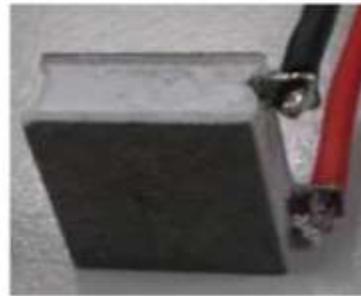
## Récupération d'énergies perdues Secteur automobile

Échangeur croisé.



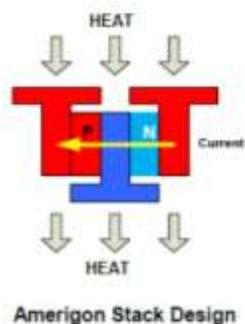
Matériaux utilisés

- TAGS
- Segmenté  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -PTE
- Skutterudites : développement et création de module
- $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ : utilisé pour le banc de test avec une conception spéciale.

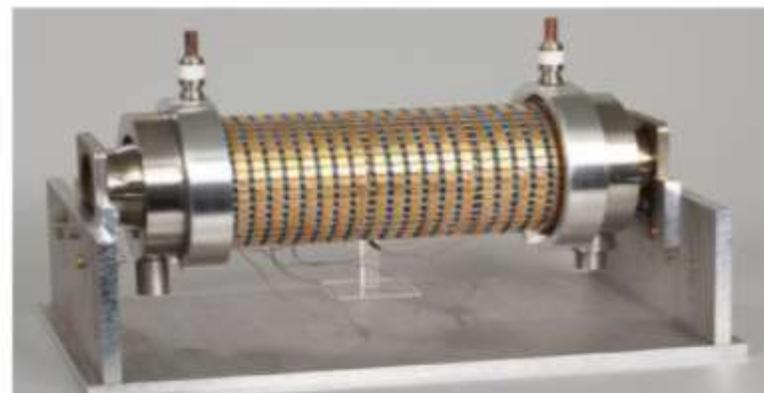
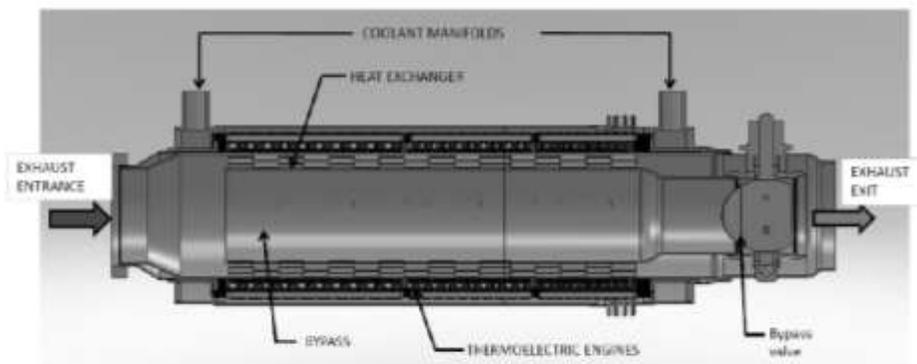
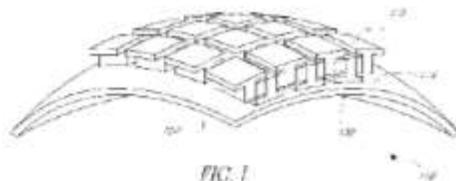


## Récupération d'énergies perdues Secteur automobile

GENTHERM ex AMERIGON ex BSST  
BMW  
Ford

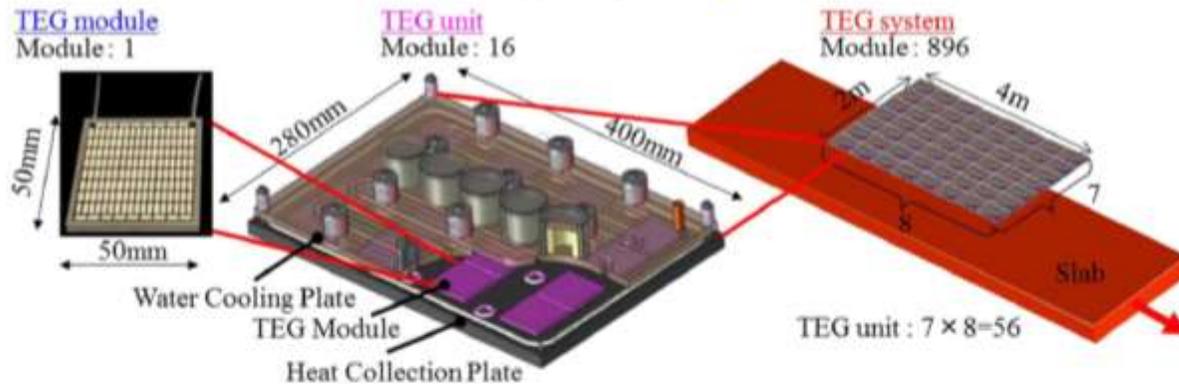
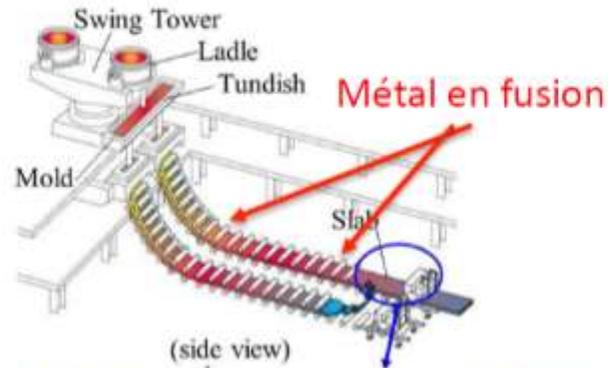


TEG Cylindrique



**TEGs installés sur BMW X6 et Ford Lincoln MKT  
plus de 450 W obtenus lors de tests sur route**

## Fonderies : chaleur rayonnée



JFE Steel Corporation Japan

TEG system (4 m x 2 m)

896 modules (56 unités de 16 modules de  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ )

9 kW pour une coulée de métal à 915°C

## Production d'électricité décentralisée Pays en développement

**Besoins de bases : cuisson, chauffage, eau chaude**  
Besoin d'électricité pour s'éclairer, téléphone portable, radio



### Foyer ouvert, 3 pierres

Très faible rendement (5-10%)  
Fumée noire toxique  
Déboisement local

1,2 milliard  
d'hommes  
sans électricité  
dans le monde

cuiseur plus propre



### Rocket stove

rendement (~35%)



### Planète bois cooking stove

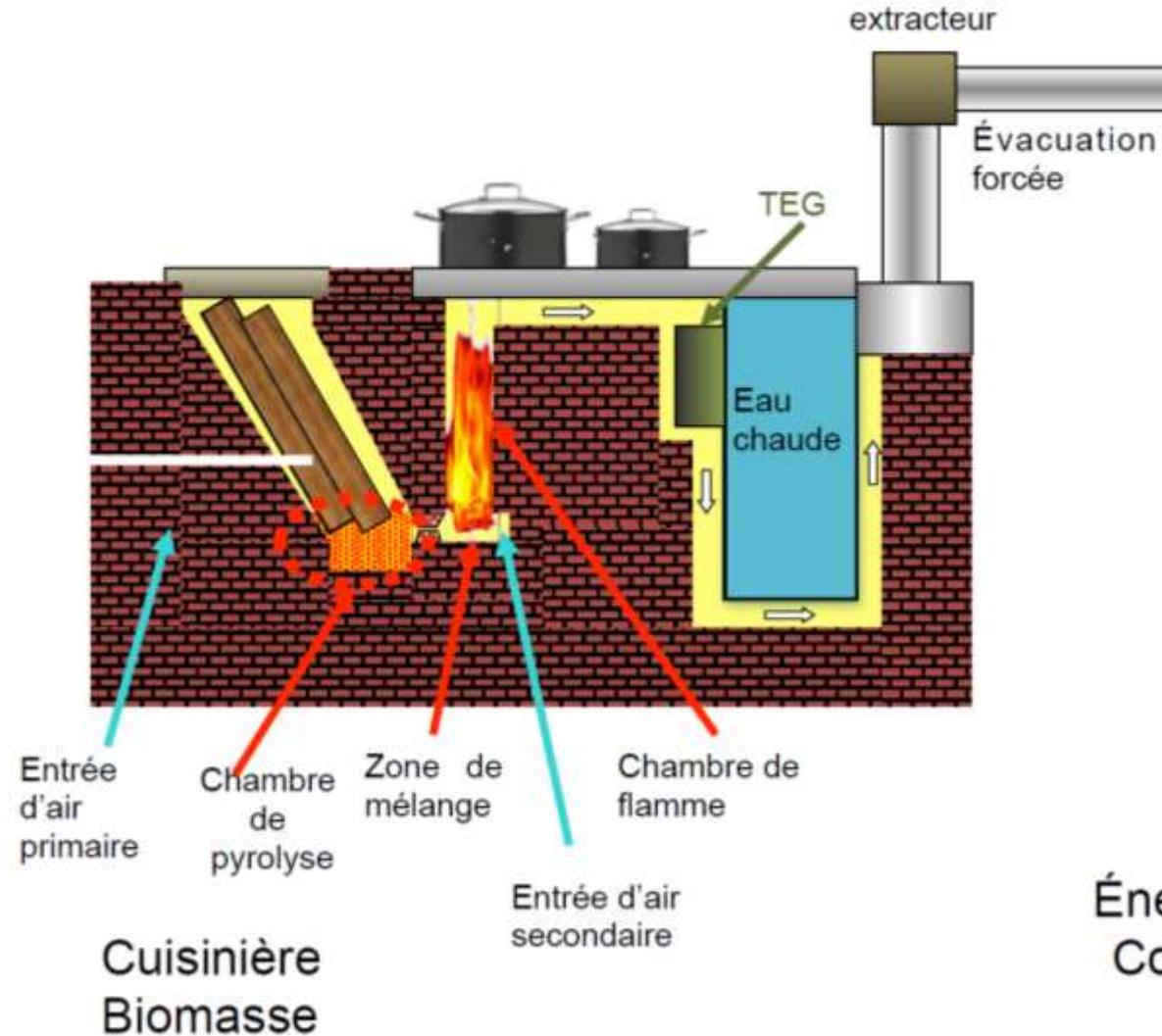
80 % global efficiency  
Consommation de bois divisée par 2  
Cuisson-eau chaude sanitaire-chauffage  
Nécessité d'un extracteur de fumée

### alimentation électrique ?

Raccord au réseau électrique

- Coût de construction de 300\$ à plus de 4000\$
- Coût de la distribution de 0,07\$ à 5,1\$ par kW.h

## “Planète Bois” Cuisinière performante et TEG



Énergie électrique produite : 24 W.h  
Consommation extracteur : 15 W.h

Le raccord au réseau n'est pas toujours économiquement intéressant

### Europe de l'Est et Amérique du Nord

Perspective  
BIOENERGY 2020+

**Chaudière à granules automatiques**  
avec TEG Max:  $12 \text{ kW}_{\text{th}}$ ,  $300 \text{ W}_{\text{el}}$   
Refroidissement à eau





En 2023, Power Pot

Utilise simplement des modules Peltier classiques insérés dans le cul de la casserole. Astucieux car le feu fournit beaucoup de chaleur, et l'eau sert de source froide. Délivre une dizaine de watt.



## Micro-production

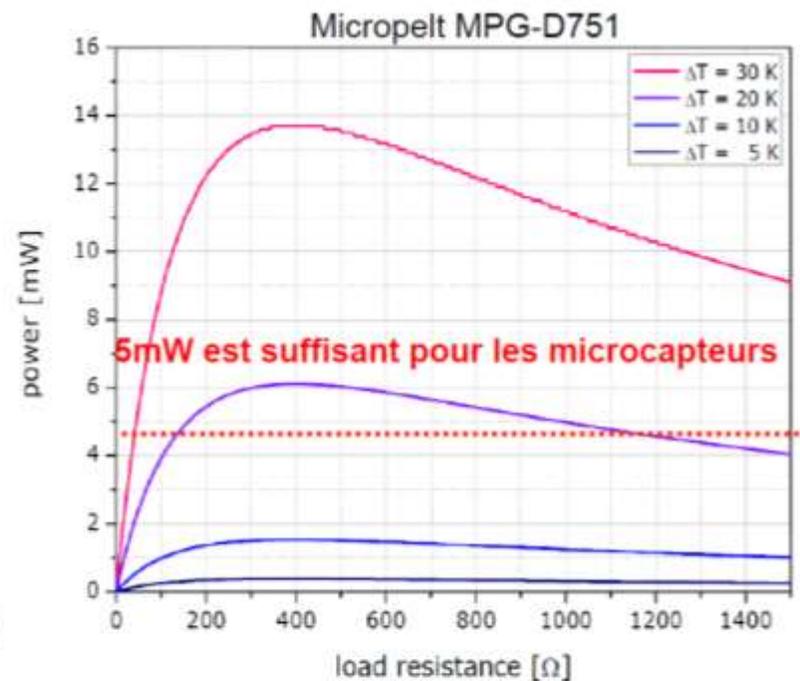
Les capteurs modernes sans fils fonctionnent avec  $\sim 100 \mu\text{W} - 10 \text{ mW}$   
Tous les processus industriels produisent de la chaleur



4,2mm x 3.3mm x 1mm  
100 couples / mm<sup>2</sup>



<http://www.micropelt.com>



Emerson WiHART  
Transmetteur de  
pression  
différentielle



ABB Technology Demonstrator  
• Transmetteur de température sans fil auto  
alimenté

# MICROPELT ITRV – SELF-POWERED RADIATOR VALVE ACTUATOR (MVA-004)

Product No. MVA004

Manufacturer Micropelt

**micropelt**

<http://www.micropelt.com/>

Category Actuator / Relay Receiver, Receivers & Controllers

Frequency 868 MHz (ASK): Europe, China

RX-EEP A5-20-01

TX-EEP A5-20-01

Certification Certified Level 2

MANUFACTURER ADMIN PANEL

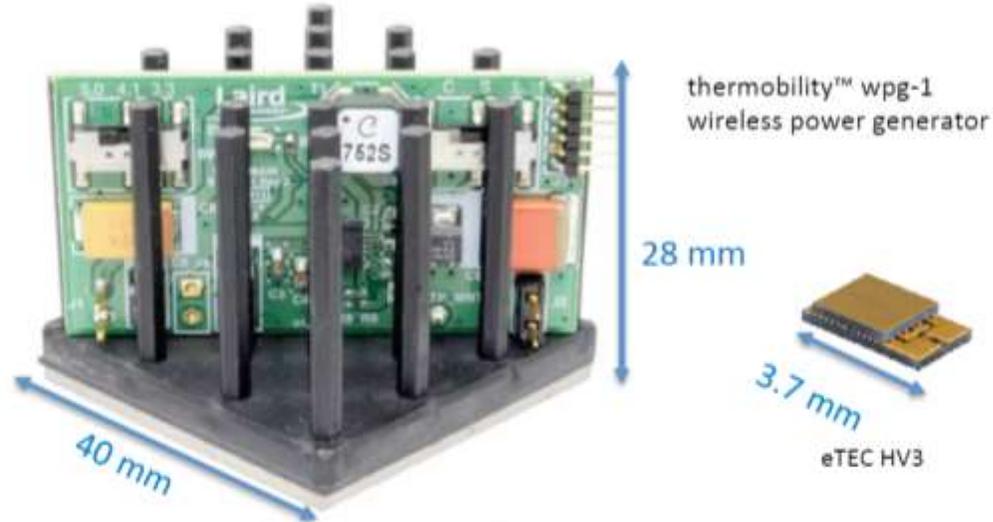


# Micro-production pour électronique basse consommation

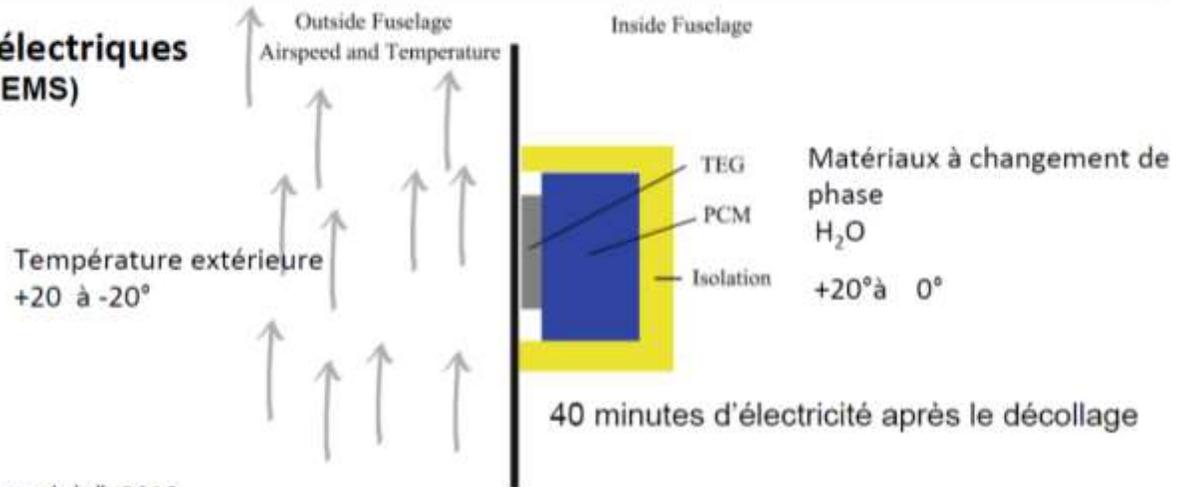
Laird technology



WPG-1 mounted vertically on side of oven



## Micro capteurs et micro actionneurs électriques Microelectromechanical systems (MEMS)



## Thermobility Wireless Power Generator (WPG-1) Data Sheet

### Description:

The WPG-1 is a self-contained energy harvesting system that converts heat into electrical power at a regulated output voltage of either 3.3V, 4.1V or 5.0V. The WPG-1 pairs Nextreme's proprietary HV thermoelectric technology with the Linear Technologies LTC®3108 Ultralow voltage step-up converter to provide useable electrical power at temperature differentials as low as 15-20K relative to ambient.

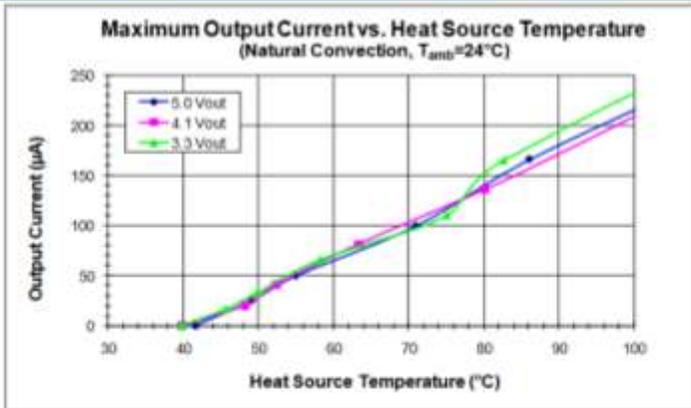
### Features:

- Regulated  $V_{out}$  of 3.3V, 4.1V or 5.0V
- $P_{out}$  up to 1mW depending on  $\Delta T$
- Compatible with thin film batteries
- Small form factor ( $\sim 2 \text{ in}^2$ )
- Ideal for wireless sensor nodes
- Wide range of load resistances (15k $\Omega$  or higher)



Shown with available TI EZ430 SEH transmitter

Thermobility WPG-1  
Wireless Power Generator





L'idée d'utiliser la chaleur humaine pour produire de l'énergie afin d'alimenter une montre n'est pas neuve, mais assez optimiste compte-tenu que la source froide, qui sera le corps de la montre pour l'essentiel, aura une température guère différente de celle du poignet, et donc le rendement sera forcément très faible.

Mais elle est suffisante pour réaliser un produit.

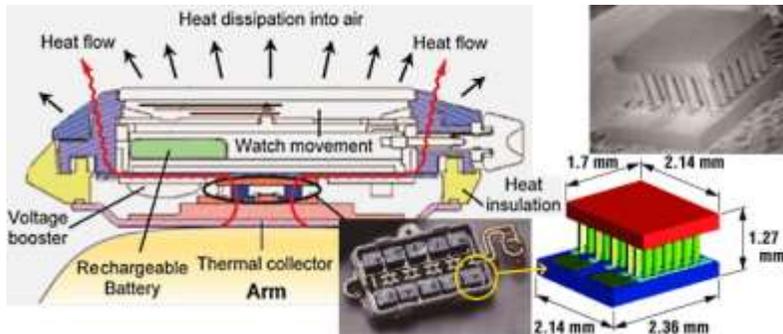
Bulova Thermatron

Bulova thermatron, différentes présentations mais le même mécanisme. En 1982, Bulova commercialisa la Thermatron, alimentée via les 700 thermocouples de chacun des 4 générateurs thermoélectriques fournissant 175mV, au total 700 mV, suivi d'un élévateur de tension pour obtenir 1.4 V.





eiko Thermic



Seiko SBET001 Thermic et vue du module thermoélectrique  
En décembre 1998, Seiko produisit une édition limitée de 500 SBET001 Thermic.

La batterie lithium-ion était chargée par le générateur thermoélectrique d'environ  $22 \mu\text{W}$  sous  $300 \text{ mV}$ , suivi d'un élévateur de tension.



Une montre connectée sans pile qui fonctionne... à la chaleur humaine

Jeune société américaine créée en 2011, **Matrix Industries** a développé une montre connectée dont l'originalité est d'utiliser l'effet thermoélectrique Seebeck pour générer l'énergie nécessaire à son fonctionnement. ...Du coup, alors que les modèles actuels de *smartwatches* ont une autonomie de seulement quelques jours, la Matrix Powerwatch fonctionne sans pile... et n'a donc nul besoin d'être rechargée puisqu'elle tire son énergie de la différence de température entre le corps humain et la montre proprement dite.



En 1959, une lampe russe à kérosène permet d'alimenter un poste de radio. Précédée et suivie par d'autres avatars, régulièrement réinventés.

## Le solaire thermoélectrique Solar Thermoelectricity

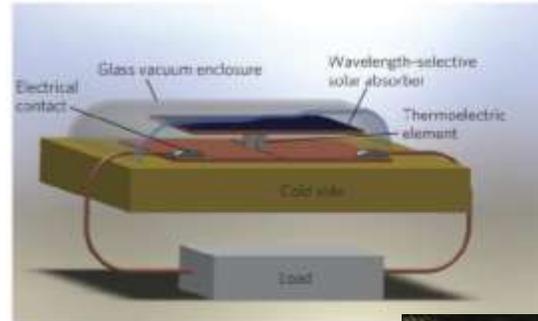
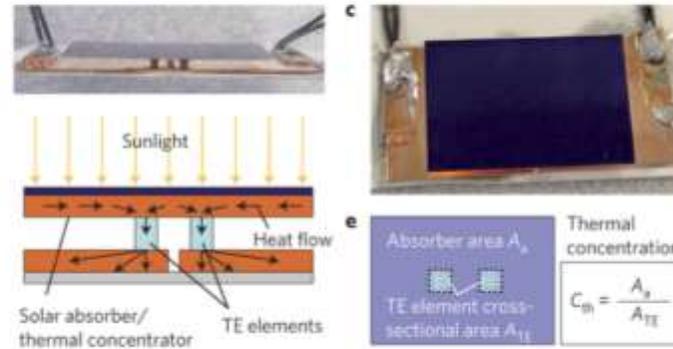
Flux de chaleur à travers une jambe thermoélectrique

$$\frac{q}{A} \approx \lambda \frac{\Delta T}{L} \approx 1 \cdot \frac{100}{0.001} = 10^5 \text{ W/m}^2$$

$\lambda \approx 1 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$       $\Delta T \approx 100\text{K}$       $L \approx 0.001\text{m}$

Rayonnement solaire :  $10^3 \text{ W/m}^2$

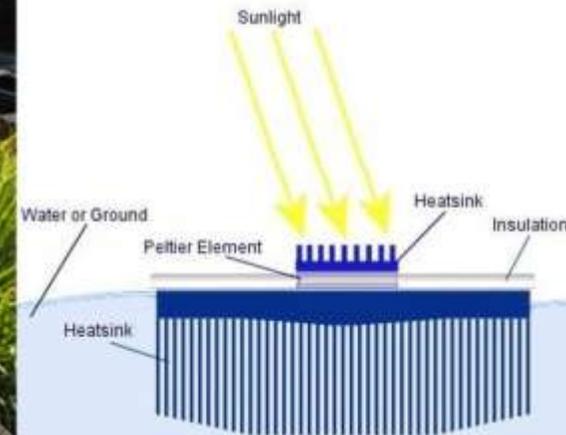
Il faut concentrer  $\sim 100$  fois



Kraemer High-performance flat-panel solar thermoelectric generators with high thermal concentration Nat mat 2011

solar thermoelectric generators (STEGs)

efficacité de 4,6% pour des conditions de  $1 \text{ kW m}^{-2}$



# Réfrigération et climatisation thermoélectrique

## avantages

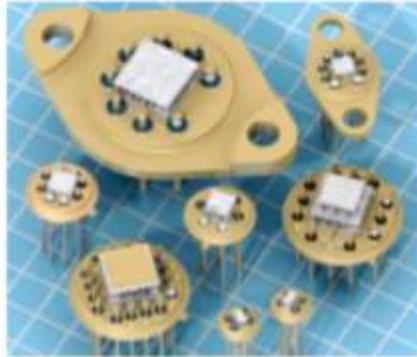
- absence de pièces mobiles : peu de maintenance
- grande fiabilité
- petite taille ≠ compresseur
- Refroidissement ponctuel : un module Peltier peut refroidir juste une zone ou un composant spécifique.  
Inutile de refroidir l'ensemble de la pièce ou d'utiliser une enceinte.
- Aptitude à chauffer et à refroidir
- Régulation très précise de la température (+/- 0,1°C) : (comportement linéaire)
- Absence de parasites électriques par opposition au compresseur
- Absence de bruit
- Fonctionnement dans toutes les orientations
- Alimentation électrique simple : une simple source électrique continue convient.

## inconvénients

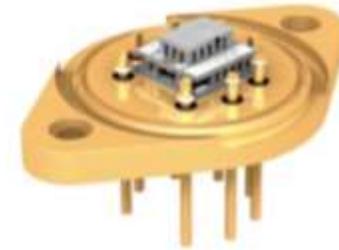
- chute du COP lorsque la différence de température augmente
- dépendance élevée à la température ambiante

## Applications optoélectroniques

### Miniature Thermoelectric Coolers for Telecom Applications



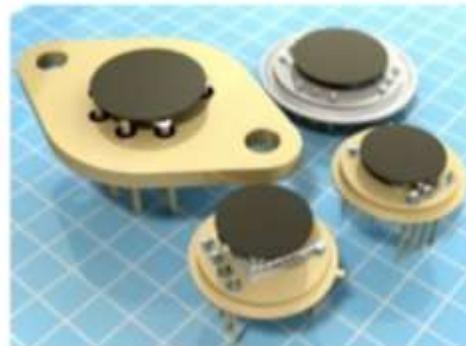
Refroidissement :  
diode lasers,  
superluminescent diodes (SLD),  
photodetectors,  
diode pumped solid state lasers (DPSS),  
charge-coupled devices (CCDs).



exemple:



boîtier classique TO46  
TEC 1mm x 1mm hauteur 0,9 mm  
 $\Delta T$  maximum 68K  
chaleur évacuée 140 mW  
avec courant de 0,9 A



### Cameras infrarouges

TEC sub-assemblies provide a temperature-controllable, uniform-temperature, high-emissivity surface used in calibrating infrared (IR) detector arrays and FLIR systems. (Infrared Cameras & Thermal Imagers )

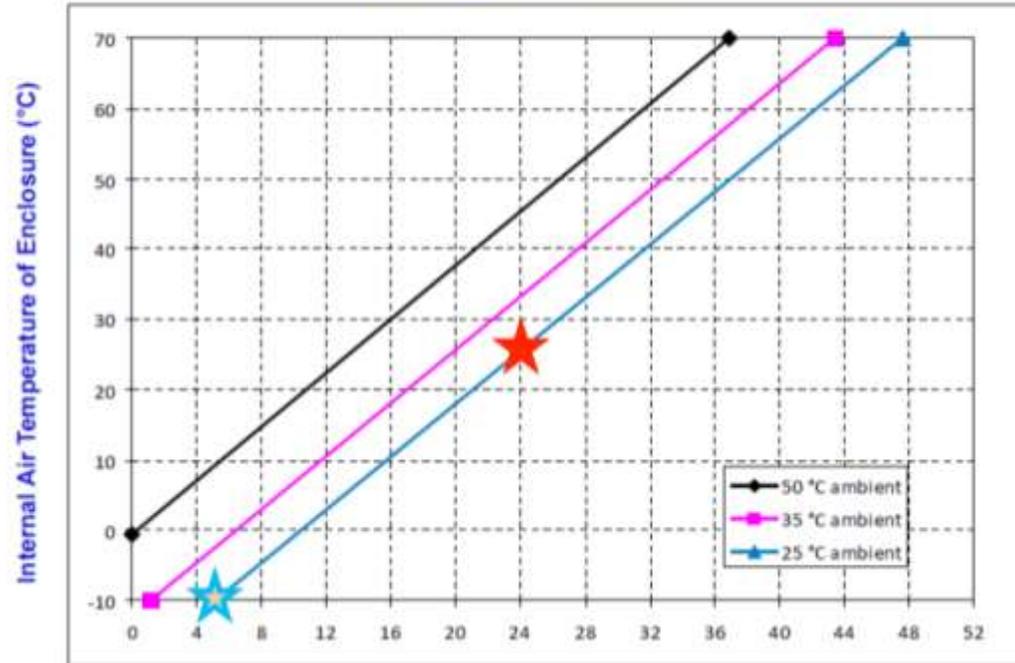
# Réfrigération petite puissance (< 500W)

## AC-027 Cooling Performance Graph

(removing heat from enclosure)



TE Technology AC-027



Heat Removed from Enclosure (watts)

- 1) Choisir l'ambient
- 2) Choisir la température de consigne
- 3) Lire la chaleur extraite

### Climatiseurs

#### Exemple : ambient 25°C

Consigne de température : 25°C  
 Chaleur extraite: 24 W COP = 0.37  
 12V 4,6 A ventilateurs 0.8A Pe=65W

Consigne de température : -10°C  
 Chaleur extraite: 5 W COP = 0.08  
 12V 4,6 A ventilateur 0.8A Pe=65W

## Exemples de glacière



*koolatron*

Koolatron 12 Volt Coolers and Warmers  
heat or cool your lunch and beverages.

Insensible à l'inclinaison, aux chocs ou aux vibrations  
(causes de pannes des réfrigérateurs classiques)

Un simple interrupteur transforme le réfrigérateur en  
réchauffeur pour casserole, hamburger ou biberon

## Conclusions

### Aujourd'hui

Un marché de niche avec une forte valeur ajoutée

- Espace et zones isolées
- Optoélectronique, capteurs autonomes

### Demain

Marché large

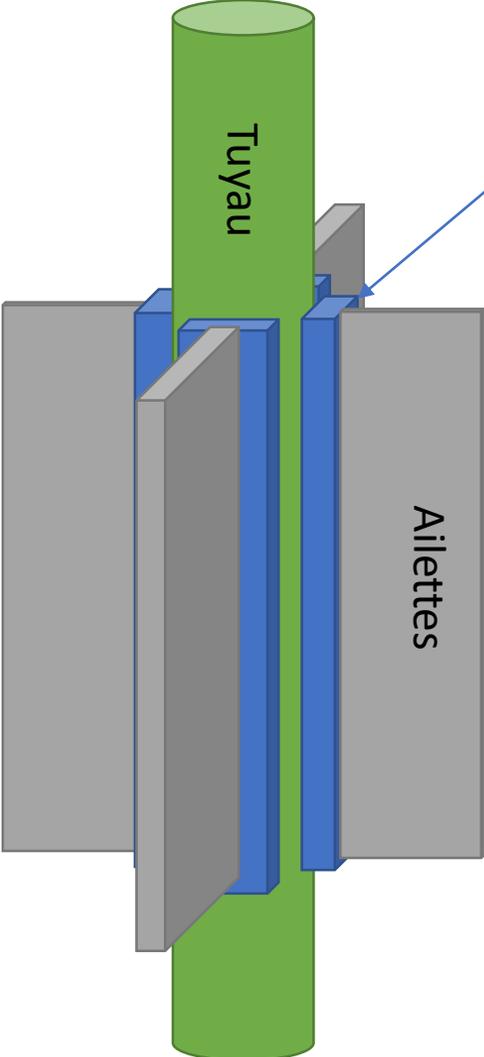
- Transports (véhicules et bateaux)
- Cogénération
- Pays en développement
- Métallurgie

### Futur

- Transports (avions)
- Solaire
- TEG organiques (polymères)



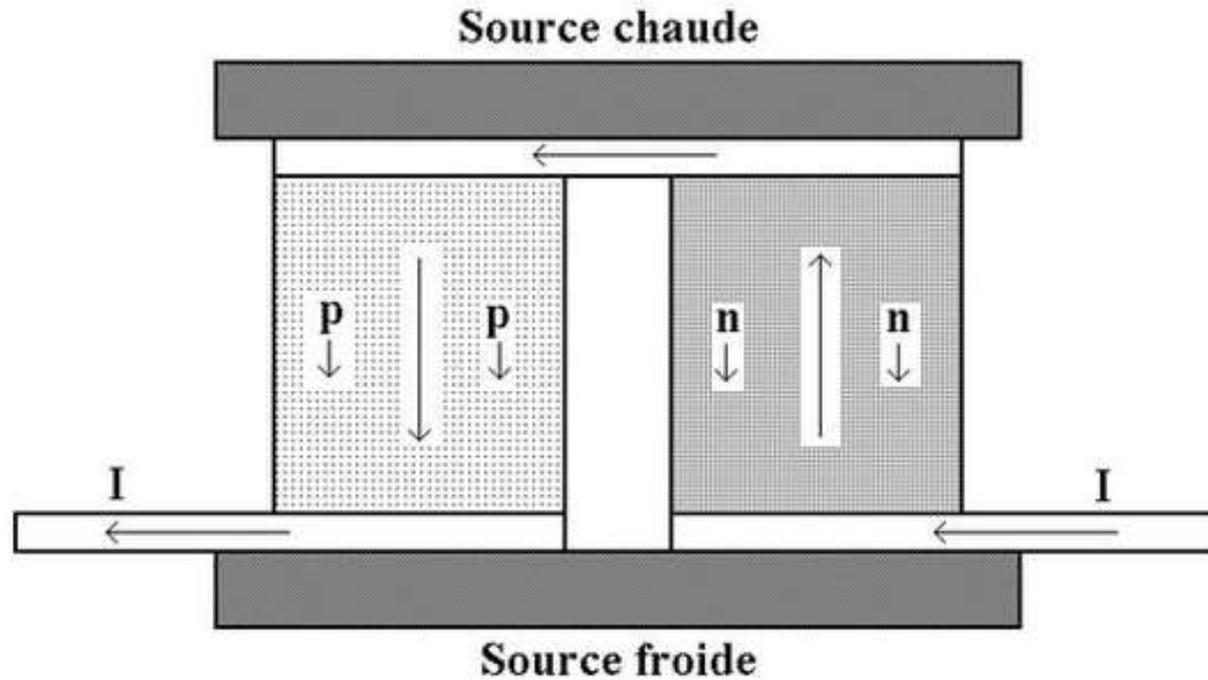
Calcul du rendement d'une cellule



25 Modules TE en serie



# Établissement du modèle



Pour établir le modèle, il suffit d'étudier une seule cellule.

Nous appelons les deux matériaux utilisés n et p. En pratique, il s'agit souvent de deux semiconducteurs.

## Fonctionnement d'une cellule en générateur électrique

L'agitation thermique tend à éloigner les porteurs de la source chaude, ce qui entretient un courant dans le sens indiqué sur le schéma. La borne positive du générateur est donc celle qui est connectée au matériau p.

Nous allons calculer le rendement en supposant que

- le pouvoir thermoélectrique des matériaux ne dépend pas de la température
- la puissance dissipée sous forme de chaleur par effet Joule est affectée pour moitié à la jonction chaude et pour moitié à la jonction froide. La première moitié garde donc une chance d'être à nouveau convertie en puissance électrique !

On a alors l'expression du rendement

$$\eta = \frac{\pi_{pn} \Delta T I - R I^2}{\pi_{pn} I T_c + K \Delta T - \frac{1}{2} R I^2}$$

où  $T_c$  est la température de la source chaude et  $K$  la conductance thermique de la cellule.

Effet peltier !!!

Écrivons le rendement en fonction d'un courant sans dimension

$$i = \frac{R}{\pi_{pn} \Delta T} I \quad \text{donc} \quad I = \frac{\pi_{pn} \Delta T}{R} i$$

Le rendement peut alors s'écrire

$$\eta = \frac{\frac{\pi_{pn}^2 \Delta T^2}{R} i - \frac{\pi_{pn}^2 \Delta T^2}{R} i^2}{\frac{\pi_{pn}^2 \Delta T}{R} T_c i + K \Delta T - \frac{1}{2} \frac{\pi_{pn}^2 \Delta T^2}{R} i^2}$$

soit

$$\eta = \frac{\frac{\pi_{pn}^2}{RK} \Delta T i - \frac{\pi_{pn}^2}{RK} \Delta T i^2}{\frac{\pi_{pn}^2}{RK} T_c i + 1 - \frac{1}{2} \frac{\pi_{pn}^2}{RK} \Delta T i^2}$$

Posons

$$Z = \frac{\pi_{pn}^2}{RK} \quad (\text{facteur de m\u00e9rite})$$

L'expression du rendement peut s'\u00e9crire

$$\eta = \frac{Z \Delta T i - Z \Delta T i^2}{Z T_c i + 1 - \frac{1}{2} Z \Delta T i^2}$$

ou encore

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_c} \frac{i - i^2}{\frac{1}{Z T_c} + i - \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T_c} i^2}$$

o\u00f9

$$\frac{\Delta T}{T_c}$$

n'est autre que le rendement de Carnot, toujours inf\u00e9rieur \u00e0 1 .

On sait que la valeur du courant qui donne la puissance électrique maximum est celle qui correspond à l'adaptation, soit

$$I = \frac{\pi_{pn} \Delta T}{2R}$$

ce qui correspond à

$$i = \frac{1}{2}$$

Cette valeur n'est cependant pas forcément celle qui correspond au rendement maximum. Examinons l'expression du rendement.

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_c} \frac{i - i^2}{\frac{1}{Z T_c} + i - \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T_c} i^2}$$

Le numérateur est positif si  $0 < i < 1$ .

Dans beaucoup de cas,  $Z T_c \ll 1$ , auquel cas le dénominateur dépend peu de  $i$ . Alors, la valeur optimum de  $i$  est bien proche de 0.5

Si  $Z T_c \ll 1$ , la valeur de  $i$  qui maximise le rendement est environ

$$i_p \approx \frac{1}{2}$$

La valeur maximum du rendement est avec une bonne précision celle qui correspond à cette valeur du courant (un maximum est toujours plat !)

$$\eta_p \approx \frac{\Delta T}{T_c} \frac{0.25}{\frac{1}{Z T_c} + 0.5 - \frac{1}{8} \frac{\Delta T}{T_c}}$$

Si  $Z T_c$  est vraiment très petit, le rendement maximum devient égal à

$$\eta_p \approx 0.25 Z \Delta T$$

et est aussi très petit dans ce cas. Si on arrivait à améliorer le rendement, les simplifications ci-dessous ne seraient plus valides.

$$\eta_p \approx 0.25 Z \Delta T$$

Cette expression approchée montre en tout cas que l'amélioration du rendement passe par l'augmentation du coefficient  $Z$ , qui est donc le facteur de qualité de la cellule.

Essayons d'écrire l'expression de  $Z$  en fonction des propriétés locales des matériaux et des dimensions géométriques. Si  $\ell_p$  et  $\ell_n$  sont les longueurs des deux tronçons,  $a_p$  et  $a_n$  étant leurs sections, on a

$$R = \rho_p \frac{\ell_p}{a_p} + \rho_n \frac{\ell_n}{a_n}$$

où  $\rho_p$  et  $\rho_n$  sont les résistivités électriques, et

$$K = \kappa_p \frac{a_p}{\ell_p} + \kappa_n \frac{a_n}{\ell_n} \quad \text{où } \kappa_p \text{ et } \kappa_n \text{ sont les conductivités thermiques.}$$

Le facteur de qualité de la cellule s'écrit alors

$$Z = \frac{\pi_{pn}^2}{R K} = \frac{\pi_{pn}^2}{\left(\rho_p \frac{\ell_p}{a_p} \frac{a_n}{\ell_n} + \rho_n\right) \left(\kappa_p \frac{\ell_n}{a_n} \frac{a_p}{\ell_p} + \kappa_n\right)}$$

Posons

$$X = \frac{\ell_p}{a_p} \frac{a_n}{\ell_n}$$

On peut écrire

$$Z = \frac{\pi_{pn}^2}{\left(\rho_p X + \rho_n\right) \left(\kappa_p \frac{1}{X} + \kappa_n\right)}$$

$$Z = \frac{\pi_{pn}^2}{(\rho_p X + \rho_n) \left( \kappa_p \frac{1}{X} + \kappa_n \right)}$$

Z est maximum si son dénominateur est minimum, ce qui se produit si

$$\rho_p \left( \kappa_p \frac{1}{X} + \kappa_n \right) - (\rho_p X + \rho_n) \kappa_p \frac{1}{X^2} = 0$$

soit

$$\rho_p \kappa_n - \rho_n \kappa_p \frac{1}{X^2} = 0$$

$$X = \sqrt{\frac{\rho_n \kappa_p}{\rho_p \kappa_n}}$$

Les dimensions optimum de la cellule dépendent donc des matériaux

$$\frac{\ell_p a_n}{\ell_n a_p} = \sqrt{\frac{\rho_n \kappa_p}{\rho_p \kappa_n}}$$

$$\frac{\ell_p a_n}{\ell_n a_p} = \sqrt{\frac{\rho_n \kappa_p}{\rho_p \kappa_n}}$$

Si les longueurs des deux tronçons sont identiques, on peut encore agir sur le rapport des sections. Dans d'autres structures, les sections sont identiques et on peut agir sur le rapport des longueurs.

A condition d'avoir choisi des dimensions optimum, on a

$$Z = \frac{\pi_{pn}^2}{(\rho_p \sqrt{\frac{\rho_n \kappa_p}{\rho_p \kappa_n}} + \rho_n)(\kappa_p \sqrt{\frac{\rho_p \kappa_n}{\rho_n \kappa_p}} + \kappa_n)}$$

Et finalement

$$Z = \frac{\pi_{pn}^2}{(\sqrt{\rho_n \kappa_n} + \sqrt{\rho_p \kappa_p})^2}$$

Si on peut optimiser séparément les deux matériaux, on utilisera l'expression

$$Z = \frac{(\pi_p - \pi_n)^2}{(\sqrt{\rho_n \kappa_n} + \sqrt{\rho_p \kappa_p})^2}$$

On définit le facteur de qualité des matériaux par

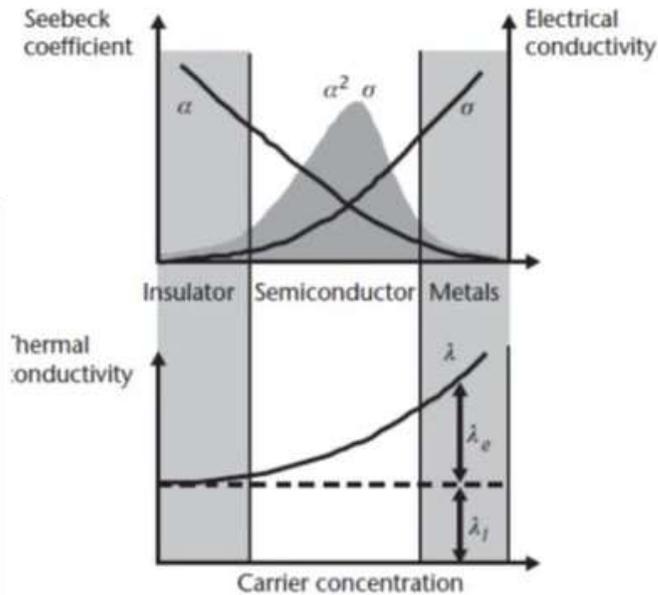
$$Z_i = \frac{\pi_i^2}{\rho_i \kappa_i}$$

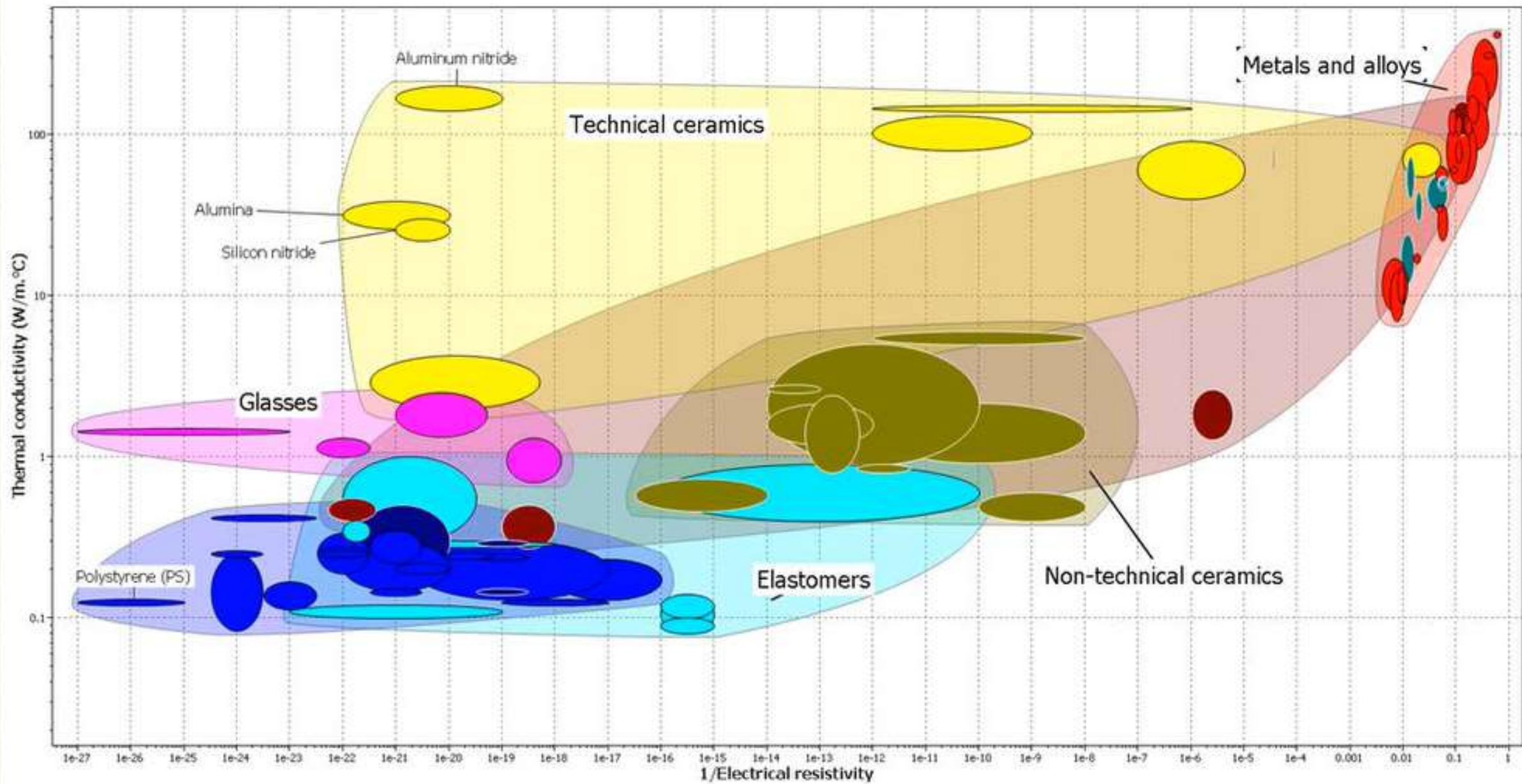
Si les deux matériaux ont le même facteur de qualité, mais avec des valeurs de  $\pi_i$  opposées, on voit aisément que le facteur de qualité de la cellule est égal à celui des matériaux. Attention: chaque  $\pi_i$  vaut seulement la moitié du pouvoir thermoélectrique du couple !

Améliorer les matériaux est un casse-tête car, pour réduire  $\rho$ , il faut des matériaux à grande densité d'électrons ... or les électrons contribuent à la conduction thermique de sorte que cela augmente  $\kappa$ .

Une petite modification de composition ou d'état métallurgique peut modifier fortement le facteur de qualité. Les chercheurs doivent donc tester un grand nombre de possibilités. Les matériaux obtenus doivent encore pouvoir être mis en œuvre !

$$Z_i = \frac{\pi_i^2}{\rho_i \kappa_i}$$





# Efficacité des matériaux thermoélectriques

## Efficacité

$$\eta_{\max} = \frac{W_{\text{elec}}}{Q_{\text{thermal}}} = \frac{\Delta T}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1+zT} - 1}{\sqrt{1+zT} + \frac{T_c}{T_h}}$$

L'efficacité est fonction de  $zT$  : **coefficient de mérite**

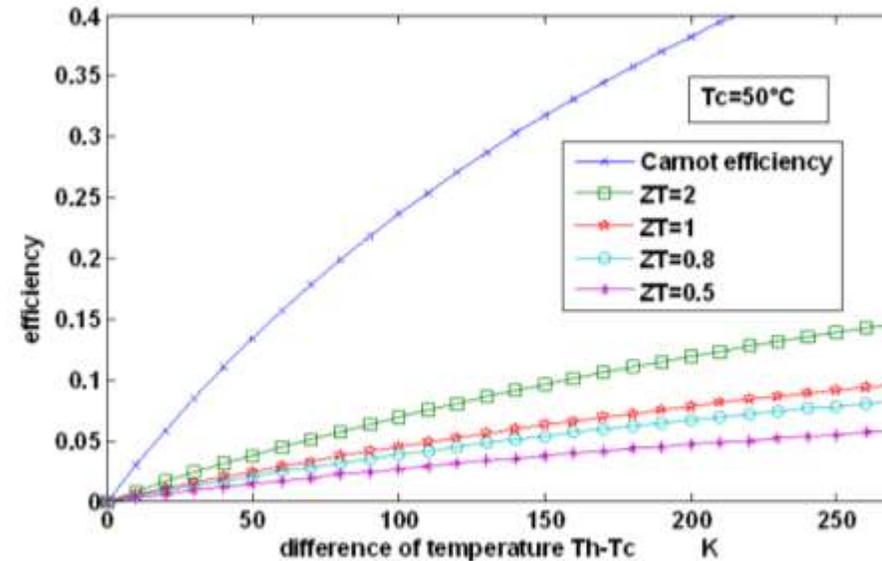
$$Z = \frac{\sigma \alpha^2}{\lambda}$$

$\alpha$  coefficient Seebeck  
 $\sigma$  conductivité électrique  
 $\lambda$  conductivité thermique

$$T = \frac{(T_h + T_c)}{2}$$

L'efficacité est fonction de  $\Delta T$  : **différence de température**

$$\Delta T = T_h - T_c$$

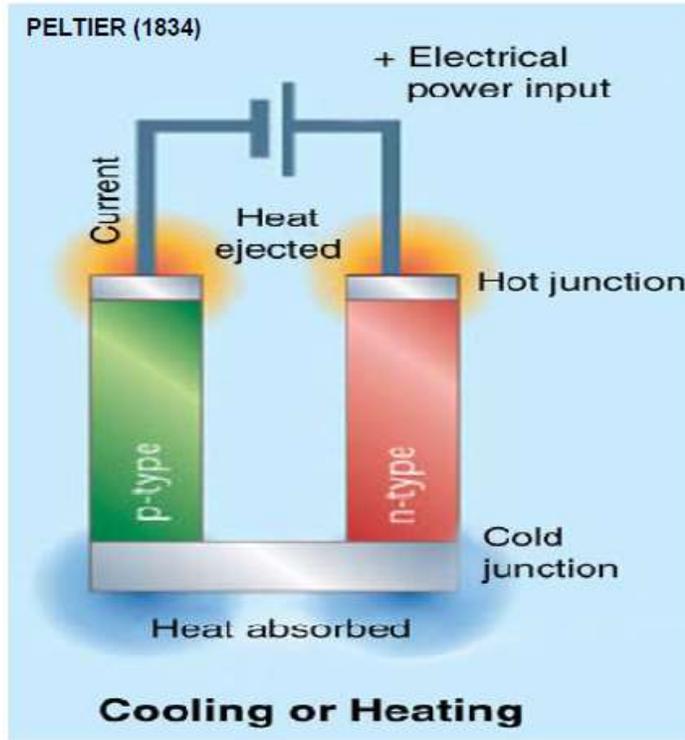


L'efficacité est faible

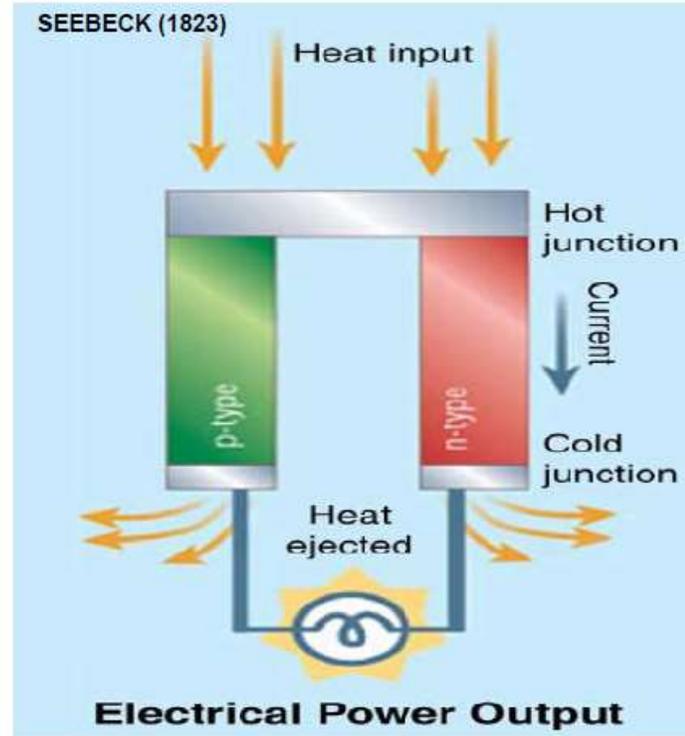
La thermoélectricité est intéressante uniquement là où les autres systèmes ne sont pas efficaces

# Les effets thermoélectriques

$$\Delta V \Leftrightarrow \Delta T$$



Facteur de mérite :  $Z = \frac{S^2}{\rho K}$



Facteur de puissance :  $PF = \frac{S^2}{\rho}$

For applications : n and p type materials with

$$ZT \sim 1$$

+ Nernst, Ettinghausen...

# Thermoelectric efficiency

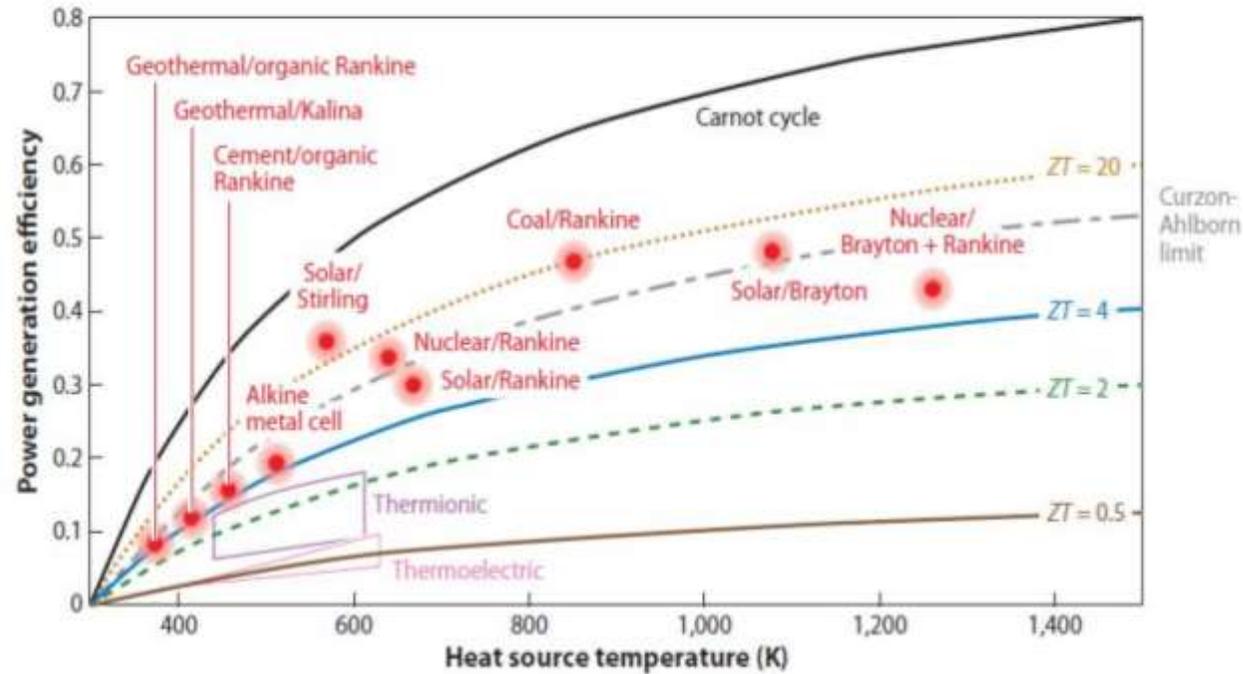


Figure 2

Thermoelectric power generation efficiency versus  $T_{\text{hot}}$  ( $T_{\text{cold}} = 300$  K). Efficiency for conventional mechanical engines as well as the Carnot limit and the Curzon-Ahlborn limit are also shown. Adapted from References 14 and 15.

Ali Shakouri, Ann. Rev. Mater. Res. 41, 399 (2011)

# Exercice sur le calcul du rendement

Semiconducteurs, porteur, conductivité  
électrique

# Conductivité thermique

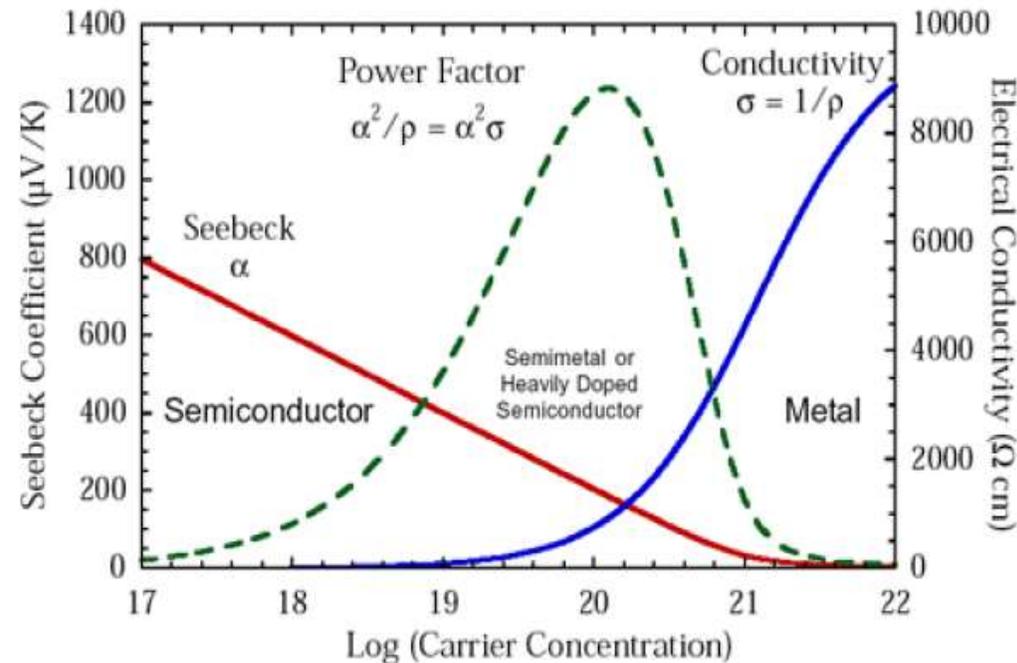
# Thermoelectric materials

How to get a large  $ZT = \frac{S^2 T}{\rho \kappa}$  ????

Problem :  $S$ ,  $\kappa$ ,  $\rho$  are linked through the Density of States ( $n$ )

$$PF = S^2/\rho$$

Heavily doped semi-conductors and semi-metals are the best candidates



Afin d'obtenir un facteur de mérite élevé, il faut simultanément un pouvoir thermoélectrique important pour convertir efficacement un gradient de température en différence de potentiel (ou un flux de chaleur en électricité), une faible résistivité électrique pour limiter l'effet Joule et une faible conductivité thermique pour imposer un gradient le plus grand possible.

Dans un solide, il y a deux contributions à la conductivité thermique, une du réseau par le biais des phonons  $\kappa_L$  et une autre directement par les électrons  $\kappa_e$  :

$$\kappa = \kappa_L + \kappa_e \quad (I.8)$$

La contribution des électrons à la conductivité thermique,  $\kappa_e$ , peut être liée à la conductivité électrique  $\sigma$  par : [3]

$$\kappa_e = L\sigma T \quad (I.9)$$

Où  $L$  est le facteur de Lorenz, qui vaut :  $2.4 \cdot 10^{-8} \text{ W } \Omega \text{ K}^{-2}$ . L'optimisation de  $ZT$  dépend à la fois du  $\kappa_e$  et de  $\sigma$ .

En effet, plus la conductivité électrique  $\sigma$  d'un matériau est bonne, plus la contribution électrique  $\kappa_e$  à la conductivité thermique  $\kappa$  est élevée.

Le lien entre la concentration de porteur  $n$  et le coefficient Seebeck  $S$  peut être compris grâce à des modèles de transport électronique. Le coefficient Seebeck peut s'écrire : [1]

$$S = \frac{8\pi^2 k_B^2}{3eh^2} m^* T \left(\frac{\pi}{3n}\right)^{2/3} \quad (I.10)$$

Où  $m^*$  est la masse effective des porteurs de charge,  $k_B$  la constante de Boltzmann,  $h$  la constante de Planck,  $e$  la charge élémentaire et  $T$  la température.

La conductivité électrique peut s'écrire en fonction de la concentration en porteur de charge :

$$\sigma = ne\mu \quad (I.11)$$

Un autre problème est lié à l'optimisation de  $ZT$ , la conductivité augmente avec le nombre de porteur de charge  $n$ , cela diminue le coefficient de Seebeck.

### I.2.7. Les différentes classes des matériaux utilisés en thermoélectricité :

Il existe trois types de matériaux, les métaux (sans gap), les semi-conducteurs (gaps petits) ainsi que les isolants (grands gaps). Le tableau I.1 donne quelques ordres de grandeur des propriétés thermoélectrique.

Propriétés	Métaux	Semi-conducteurs	Isolants
$S$ ( $\mu\text{V.K}^{-1}$ )	$\sim 5$	$\sim 200$	$\sim 10^3$
$\sigma$ ( $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ )	$\sim 10^6$	$\sim 10^3$	$\sim 10^{-12}$
$Z$ ( $\text{K}^{-1}$ )	$\sim 3 \cdot 10^{-6}$	$\sim 2 \cdot 10^{-3}$	$\sim 5 \cdot 10^{-17}$

Tableau I.1 : Propriété thermoélectrique des métaux, semi-conducteurs et isolants. [1]

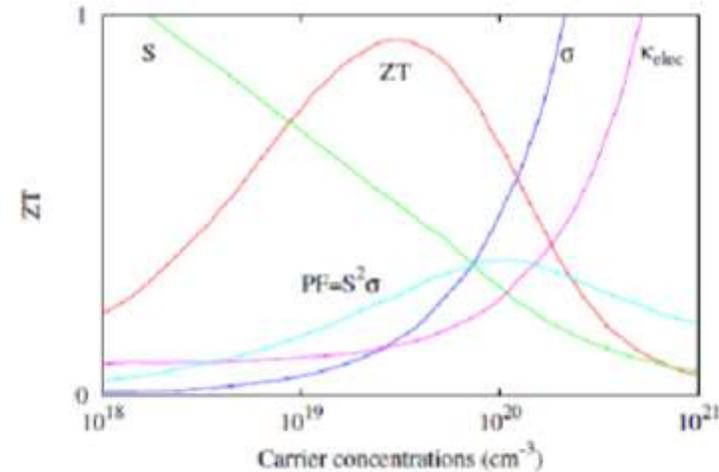
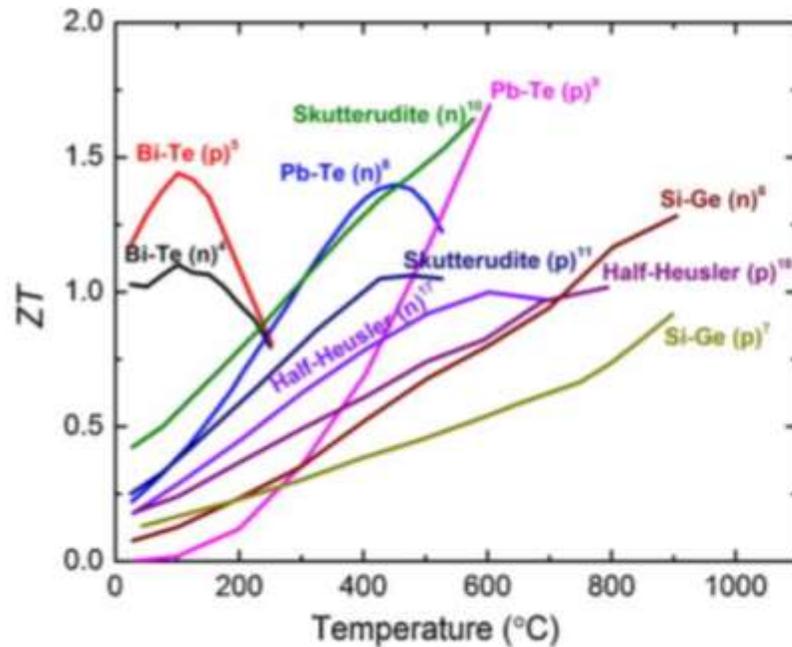


Figure I.5 : Evolution de la figure de mérite  $ZT$  et des différentes propriétés électriques et thermiques en fonction de la concentration en porteurs de charges. [3]

## Valeurs de ZT pour différents matériaux

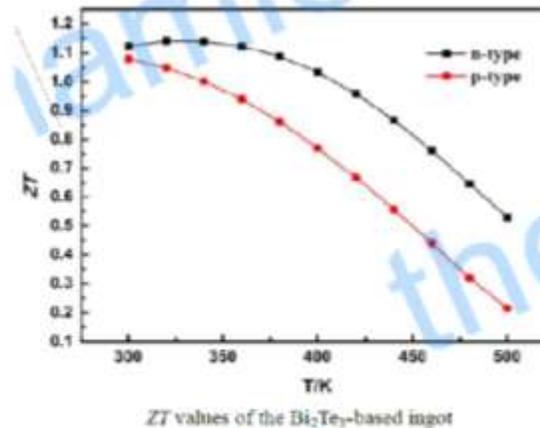
### Laboratoire



Valeur de ZT pour différents matériaux en laboratoire \*

### Industrie

#### Barreau industriel (Thermonamic 2015)



\* Shuo Chen, Zhifeng Ren Recent progress of half-Heusler for moderate temperature thermoelectric applications materials today

## Modules industriels

Fabricants	Matériaux	$\Delta T$	Puissance	disponibilité	T Max	informations
HIZ, Thermonamic, Lairdtech, Marlow, Komatsu etc.	$\text{Bi}_2\text{Te}_3$	300 K	20 W	40€-100€	300 °C	Historique Quantité limitée (terres rares)
Evident Thermoelectric	Half Heusler	500 K	15W	Bientôt disponible	600°C	Non toxique Peu cher Grande quantité
Shanghai Institute of Ceramics	skuterrudites	510 K	25W	Bientôt disponible	600°C	Non toxique Peu cher Grande quantité
TEGMA	skuterrudites			Bientôt disponible		
TECTEG MFR	Calcium/Manganese oxides	750 K	12.3W	disponible 360\$	800°C	Non toxique Peu cher Grande quantité
TECTEG MFR cascade modules	Calcium/Manganese oxides with $\text{Bi}_2\text{Te}_3$	435 K	11 W	disponible 560\$	600°C	
Hotblock Onboard	silicon based alloy	500 K	3.6W	disponible 200€	600°C	Non toxique, peu cher Grande quantité masse : 6 g
Romny Scientific	magnesium silicide					Faible coût \$/watt
Alphabet Energy	p-type tetrahedrites n-type magnesium silicide			Bientôt disponible		Tetrahedrite minéral de type p
	Organics TEG			laboratoire		



## Réfrigération et climatisation thermoélectrique

### TEC thermoelectric cooler



Thermoélectricité : généralités, applications et conception des générateurs thermoélectriques.

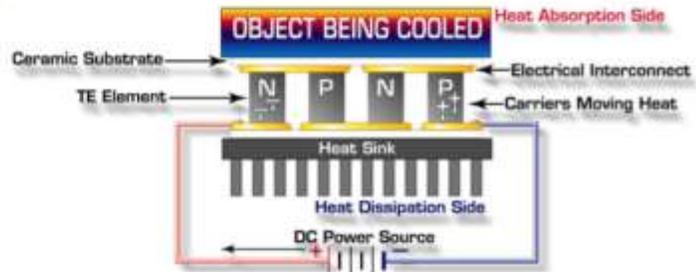
Daniel CHAMPIER

63e Congrès de l'Union des professeurs de physique et de chimie

53

Convertissez et modifiez des PDF  
avec Acrobat Pro

Demander l'essai gratuit



<http://www.ferrotec.com>

**Générateur électrique continu appliqué à un module TE : flux de chaleur**

Une face est refroidie, l'autre est réchauffée.

Phénomène réversible si on change le signe de la source.

**Conséquence : utilisation en refroidissement, chauffage et régulation de température**

Coefficient de performance

$$COP_{\max} = \frac{Q_c}{W_e} = \frac{T_c}{\Delta T} \frac{\sqrt{1+zT} - \frac{T_c}{T_h}}{\sqrt{1+zT} + 1}$$

Différence de température maximale

$$T_h - T_c = \frac{1}{2} Z T_c^2 = \frac{T_c}{2} Z T$$

## Réfrigération et climatisation thermoélectrique

### avantages

- absence de pièces mobiles : peu de maintenance
- grande fiabilité
- petite taille  $\neq$  compresseur
- Refroidissement ponctuel : un module Peltier peut refroidir juste une zone ou un composant spécifique.  
Inutile de refroidir l'ensemble de la pièce ou d'utiliser une enceinte.
- Aptitude à chauffer et à refroidir
- Régulation très précise de la température ( $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ) : (comportement linéaire)
- Absence de parasites électriques par opposition au compresseur
- Absence de bruit
- Fonctionnement dans toutes les orientations
- Alimentation électrique simple : une simple source électrique continue convient.

### inconvénients

- chute du COP lorsque la différence de température augmente
- dépendance élevée à la température ambiante

## Réfrigération et climatisation thermoélectrique

### avantages

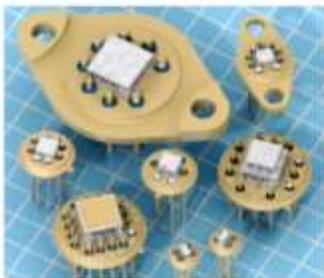
- absence de pièces mobiles : peu de maintenance
- grande fiabilité
- petite taille  $\neq$  compresseur
- Refroidissement ponctuel : un module Peltier peut refroidir juste une zone ou un composant spécifique.  
Inutile de refroidir l'ensemble de la pièce ou d'utiliser une enceinte.
- Aptitude à chauffer et à refroidir
- Régulation très précise de la température ( $\pm 0,1^\circ\text{C}$ ) : (comportement linéaire)
- Absence de parasites électriques par opposition au compresseur
- Absence de bruit
- Fonctionnement dans toutes les orientations
- Alimentation électrique simple : une simple source électrique continue convient.

### inconvénients

- chute du COP lorsque la différence de température augmente
- dépendance élevée à la température ambiante

## Applications optoélectroniques

### Miniature Thermoelectric Coolers for Telecom Applications



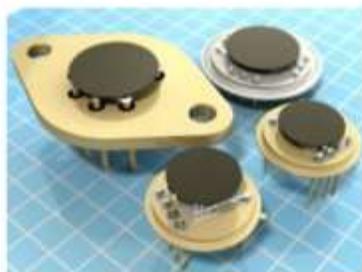
Refroidissement :  
diode lasers,  
superluminescent diodes (SLD),  
photodetectors,  
diode pumped solid state lasers (DPSS),  
charge-coupled devices (CCDs).



exemple:



boîtier classique TO46  
TEC 1mm x 1mm hauteur 0,9 mm  
 $\Delta T$  maximum 68K  
chaleur évacuée 140 mW  
avec courant de 0,9 A



### Cameras infrarouges

TEC sub-assemblies provide a temperature-controllable,  
uniform-temperature, high-emissivity surface used in  
calibrating infrared (IR) detector arrays and FLIR systems.  
(Infrared Cameras & Thermal Imagers )

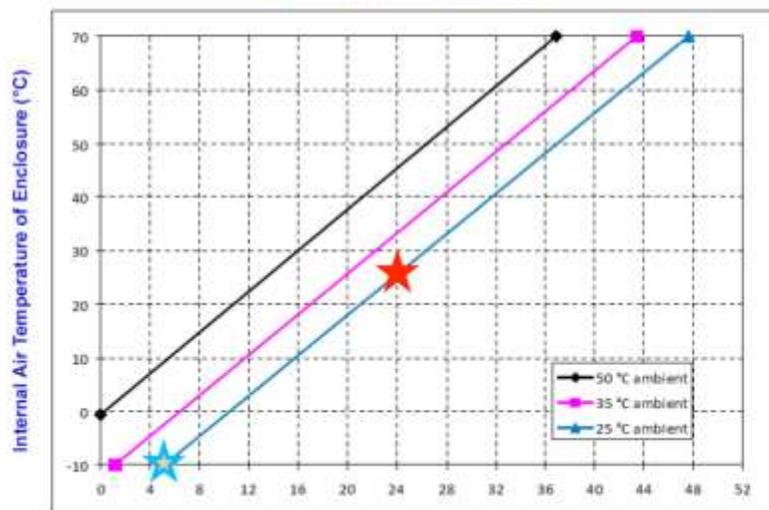


TE Technology AC-027

## Réfrigération petite puissance (< 500W)

### AC-027 Cooling Performance Graph

(removing heat from enclosure)



- Heat Removed from Enclosure (watts)
- 1) Choisir l'ambient
  - 2) Choisir la température de consigne
  - 3) Lire la chaleur extraite

### Climatiseurs

#### Exemple : ambient 25°C

Consigne de température : 25°C  
 Chaleur extraite: 24 W COP = 0.37  
 12V 4,6 A ventilateurs 0.8A Pe=65W

Consigne de température : -10°C  
 Chaleur extraite: 5 W COP = 0.08  
 12V 4,6 A ventilateur 0.8A Pe=65W



*koolatron*

## Exemples de glacière

Koolatron 12 Volt Coolers and Warmers  
heat or cool your lunch and beverages.

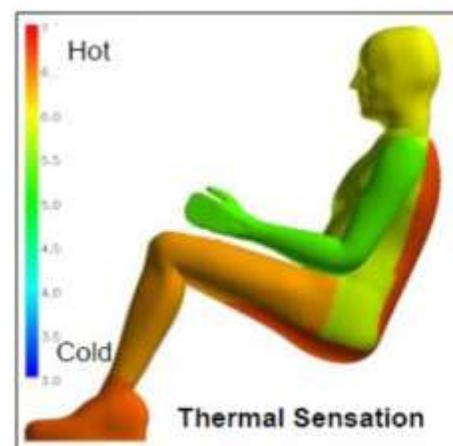
Insensible à l'inclinaison, aux chocs ou aux vibrations  
(causes de pannes des réfrigérateurs classiques)

Un simple interrupteur transforme le réfrigérateur en  
réchauffeur pour casserole, hamburger ou biberon

## Climatisation des véhicules

**Groupe Ford : Thermoelectric HVAC**  
(Heating, Ventilation and Air-Conditioning)

**Climatiser localement le chauffeur et les passagers**

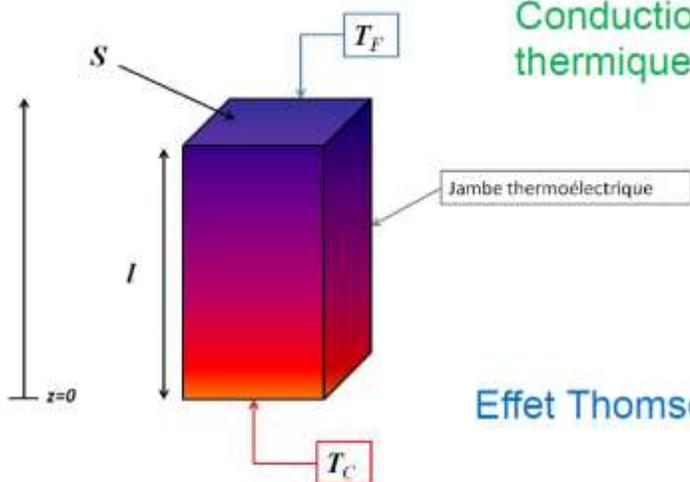


## Modèle thermoélectrique d'une jambe

Effet  
Seebeck

Effet Joule

Conduction  
thermique



Effet Thomson

Modèle standard (loffe)

$$Pe = \alpha \cdot l \cdot (T_C - T_F) - R_{\text{élec}} \cdot I^2$$

$$Q_{C,jambe} = \alpha \cdot l \cdot T_C - \frac{1}{2} \cdot R_{\text{élec}} \cdot I^2 - \frac{(T_F - T_C)}{R_{jambe}}$$

$$Q_{F,jambe} = \alpha \cdot l \cdot T_F + \frac{1}{2} \cdot R_{\text{élec}} \cdot I^2 - \frac{(T_F - T_C)}{R_{jambe}}$$

Modèle Thomson/  
Seebeck

$$Pe = (\alpha_C \cdot T_C - \alpha_F \cdot T_F) \cdot l - t \cdot (T_C - T_F) \cdot l - R_{\text{élec}} \cdot I^2$$

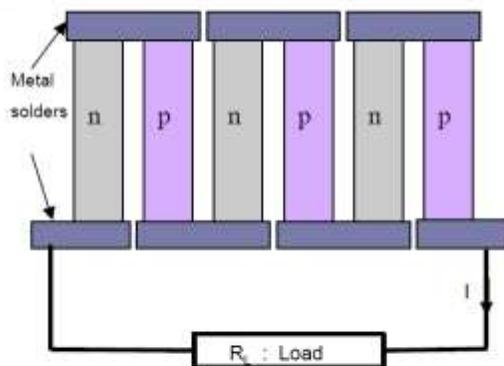
$$Q_{C,jambe} = \alpha_C \cdot l \cdot T_C - \frac{1}{2} \cdot R_{\text{élec}} \cdot I^2 - \frac{1}{2} \cdot t \cdot (T_C - T_F) \cdot l - \frac{(T_F - T_C)}{R_{jambe}}$$

$$Q_{F,jambe} = \alpha_F \cdot l \cdot T_F + \frac{1}{2} \cdot R_{\text{élec}} \cdot I^2 + \frac{1}{2} \cdot t \cdot (T_C - T_F) \cdot l - \frac{(T_F - T_C)}{R_{jambe}}$$

Modèle Thomson/Seebeck =  $R_{jambe}$  (thermique) et  $R_{\text{élec}}$  calculées à  $T_{\text{moyen}}$

Modèle Thomson/Seebeck Intégré =  $R_{jambe}$  et  $R_{\text{élec}}$  intégration entre  $T_C$  et  $T_f$

## Modèle électrique d'un module

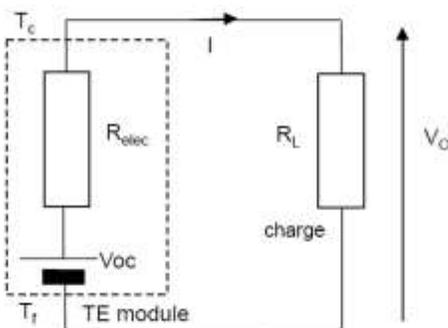


$$Q_C = \alpha \cdot I \cdot T_C - \frac{1}{2} R_{elec} \cdot I^2 + \frac{(T_C - T_F)}{R_{th}}$$

$$Q_F = \alpha \cdot I \cdot T_F + \frac{1}{2} R_{elec} \cdot I^2 + \frac{(T_C - T_F)}{R_{th}}$$

$$P_e = \alpha \cdot I \cdot (T_C - T_F) - R_{elec} \cdot I^2$$

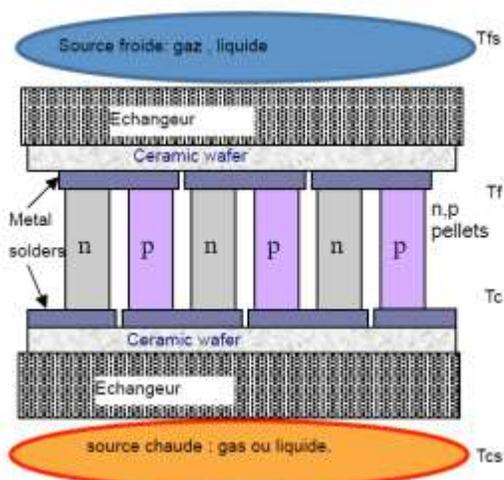
$$V_{oc} = \alpha (T_C - T_F)$$



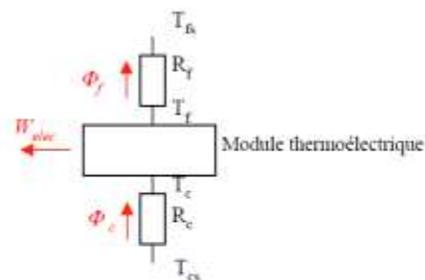
un module est modélisé par une source de tension  $V_{oc}$  avec une résistance interne  $R_{elec}$

## Générateur global

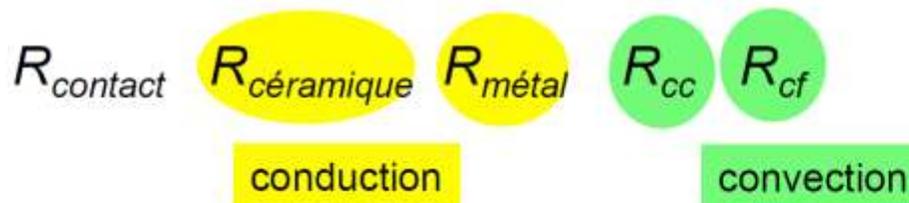
Il faut prendre en compte les échangeurs, les céramiques, les résistances de contact ...



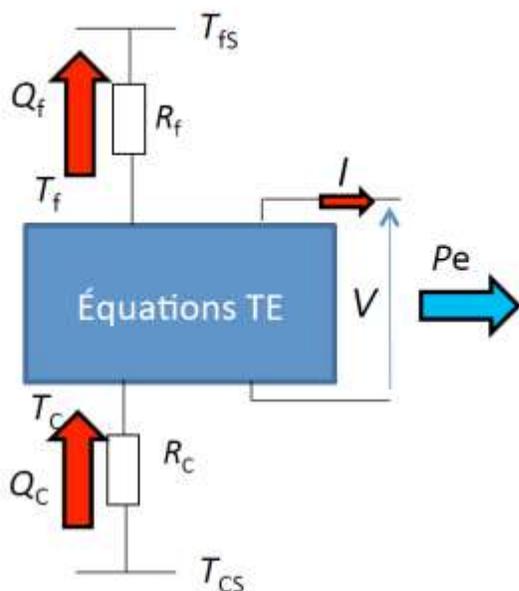
modèle du générateur avec résistances thermiques



Corrélations classiques pour déterminer les coefficients de transfert thermique



## Méthodologie



$$P_e = \alpha \cdot I \cdot (T_C - T_F) - R_{elec} \cdot I^2$$

$$Q_C = \alpha \cdot I \cdot T_C - \frac{1}{2} R_{elec} \cdot I^2 - \frac{(T_F - T_C)}{R_{th}}$$

$$Q_F = \alpha \cdot I \cdot T_F + \frac{1}{2} R_{elec} \cdot I^2 - \frac{(T_F - T_C)}{R_{th}}$$

$$Q_C = \frac{T_{Cs} - T_C}{R_C}$$

$$Q_F = \frac{T_F - T_{Fs}}{R_F}$$

$$AX = B$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_{th}} & -\left(\frac{1}{R_{th}} + \frac{1}{R_C}\right) - \alpha \cdot I & 0 \\ \left(\frac{1}{R_{th}} + \frac{1}{R_F}\right) - \alpha \cdot I & \frac{1}{R_{th}} & 0 \\ \alpha \cdot I & -\alpha \cdot I & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_F \\ T_C \\ P_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} R_{elec} \cdot I^2 - \frac{T_{Cs}}{R_C} \\ \frac{1}{2} R_{elec} \cdot I^2 + \frac{T_{Fs}}{R_F} \\ -R_{elec} \cdot I^2 \end{bmatrix}$$

$$R_{th} = f(T_C, T_F)$$

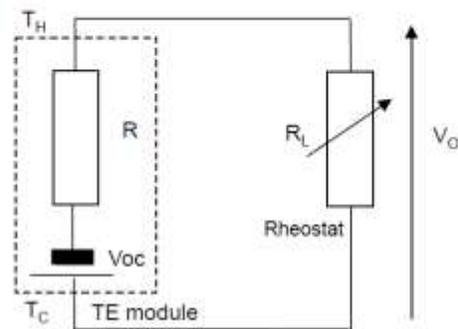
$$R_{elec} = f(T_C, T_F)$$

$$\alpha = f(T_C, T_F)$$

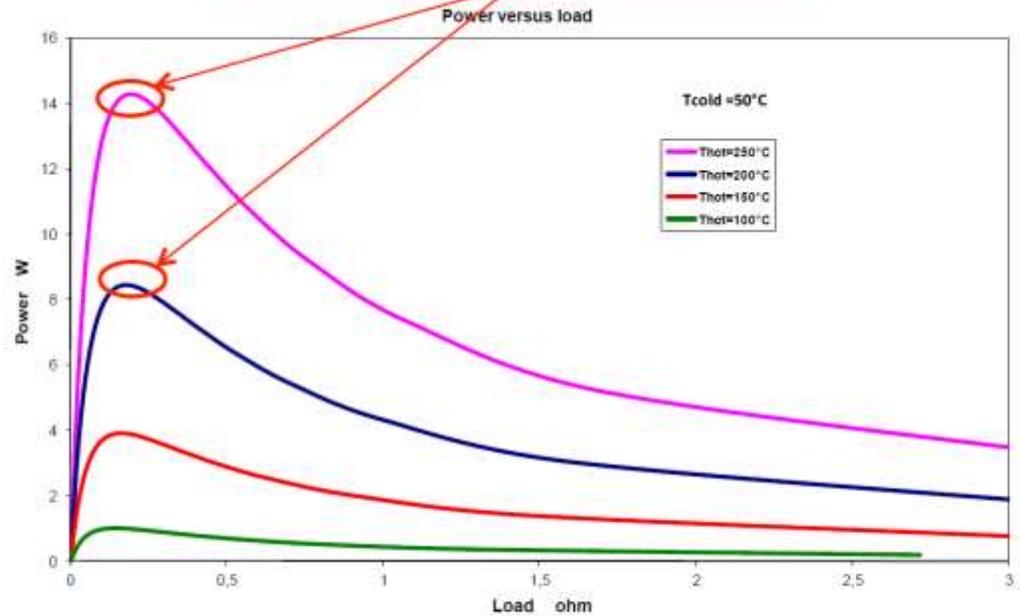


# Adaptation d'impédance : puissance maximale

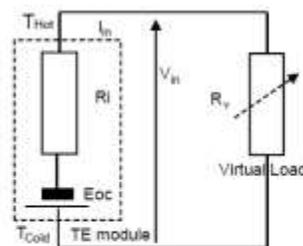
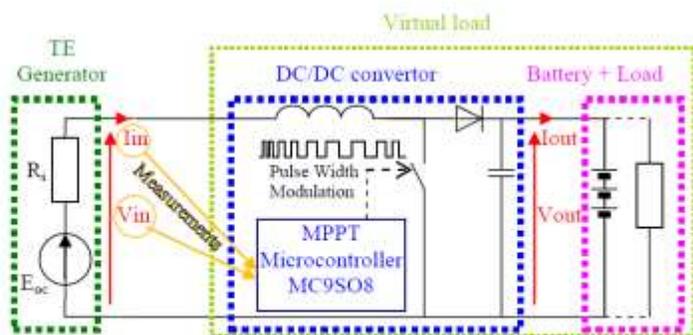
## Puissance électrique



Résistance optimale (adaptée)

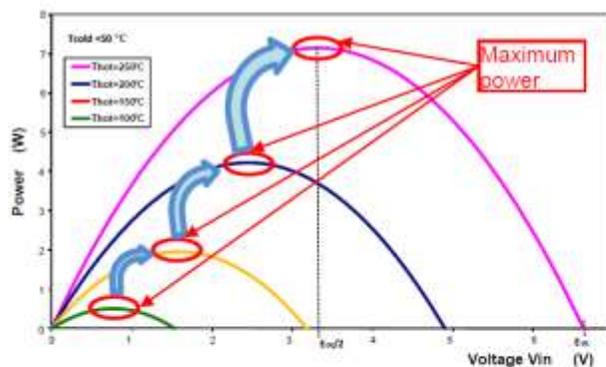


## Convertisseur DC/DC

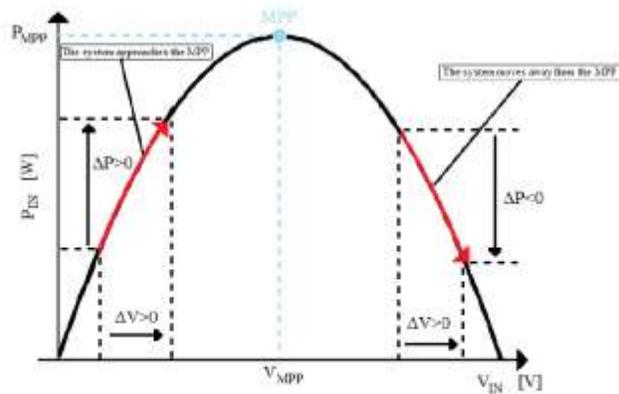


$V_{in}$  est contrôlé par le rapport cyclique dc  
Fraction de période pendant laquelle l'interrupteur est ouvert

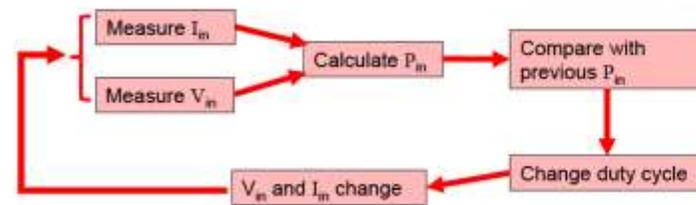
$$V_{in} = V_{out} (1-dc) = V_{batterie} (1-dc)$$



## Recherche du point de fonctionnement maximum (MPPT)



### Algorithme 'Perturb and Observe'



## Conclusions

### Aujourd'hui

- Un marché de niche avec une forte valeur ajoutée
  - Espace et zones isolées
  - Optoélectronique, capteurs autonomes

### Demain

- Marché large
  - Transports (véhicules et bateaux)
  - Cogénération
  - Pays en développement
  - Métallurgie

### Futur

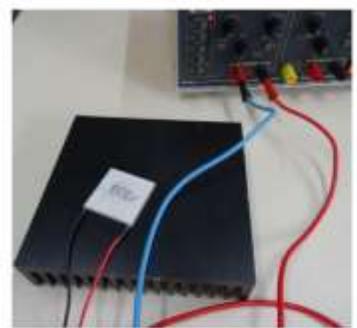
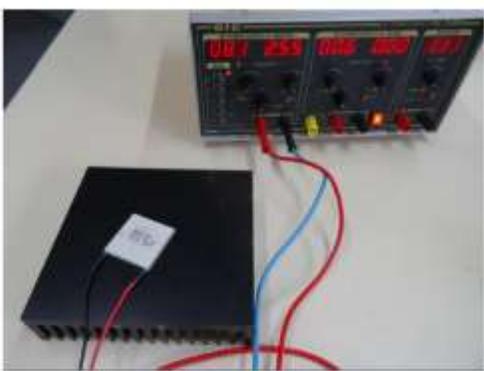
- Transports (avions)
- Solaire
- TEG organiques (polymères)







# Expérience collège refroidissement



Outils de recherche

- Commentaire
- Remplir et signer
- Autres outils



## Expérience sur les TEG

Vérifier que la tension en circuit ouvert est proportionnelle à la différence de température

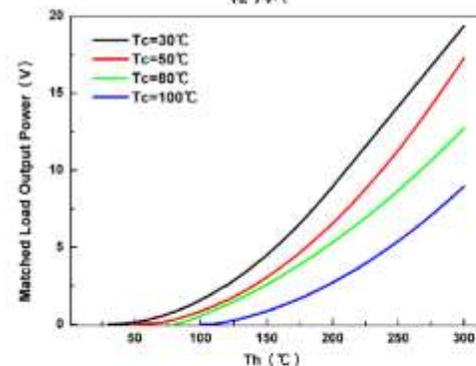
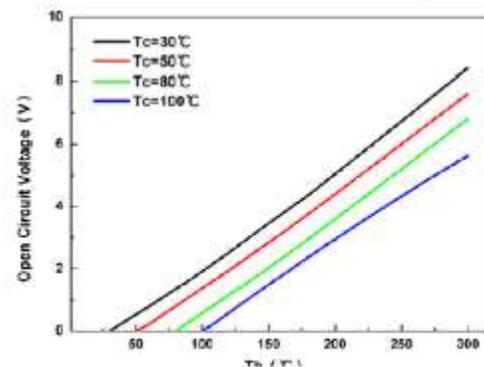
Vérifier que la puissance est proportionnelle au carré de la différence de température

$$V_{oc} = \alpha (T_c - T_f)$$

$$W_{elec} = R_L \cdot I^2 = \frac{R_L}{(R + R_L)^2} N^2 \cdot \alpha^2 \cdot \Delta T^2$$

$$W_{elec}^{Max} = \Delta T^2 \cdot \frac{N \cdot A}{8L} \cdot \sigma \cdot \alpha^2$$

Élément chauffant  
 Refroidissement à air ou à eau  
 Contact thermique (feuille de graphite)  
 Mise en pression  
 Résistance variable



# Thermoelectric efficiency

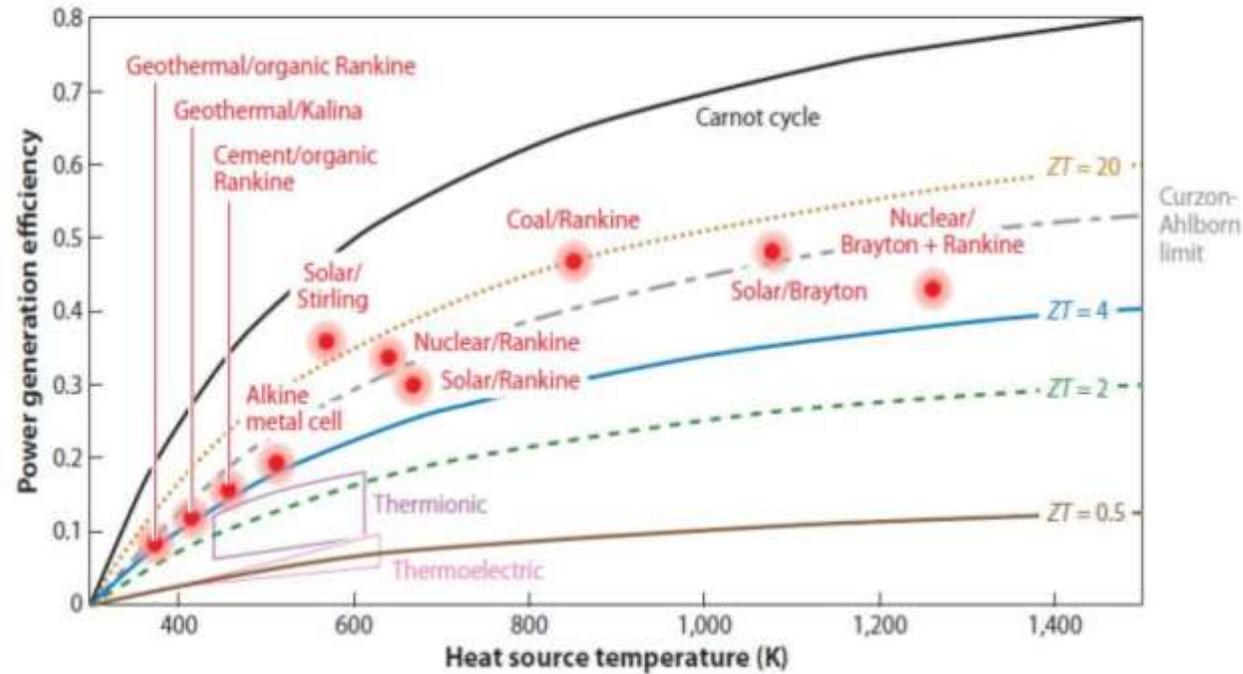


Figure 2

Thermoelectric power generation efficiency versus  $T_{\text{hot}}$  ( $T_{\text{cold}} = 300$  K). Efficiency for conventional mechanical engines as well as the Carnot limit and the Curzon-Ahlborn limit are also shown. Adapted from References 14 and 15.

Ali Shakouri, Ann. Rev. Mater. Res. 41, 399 (2011)

# L'optimisation des matériaux Thermoélectriques

