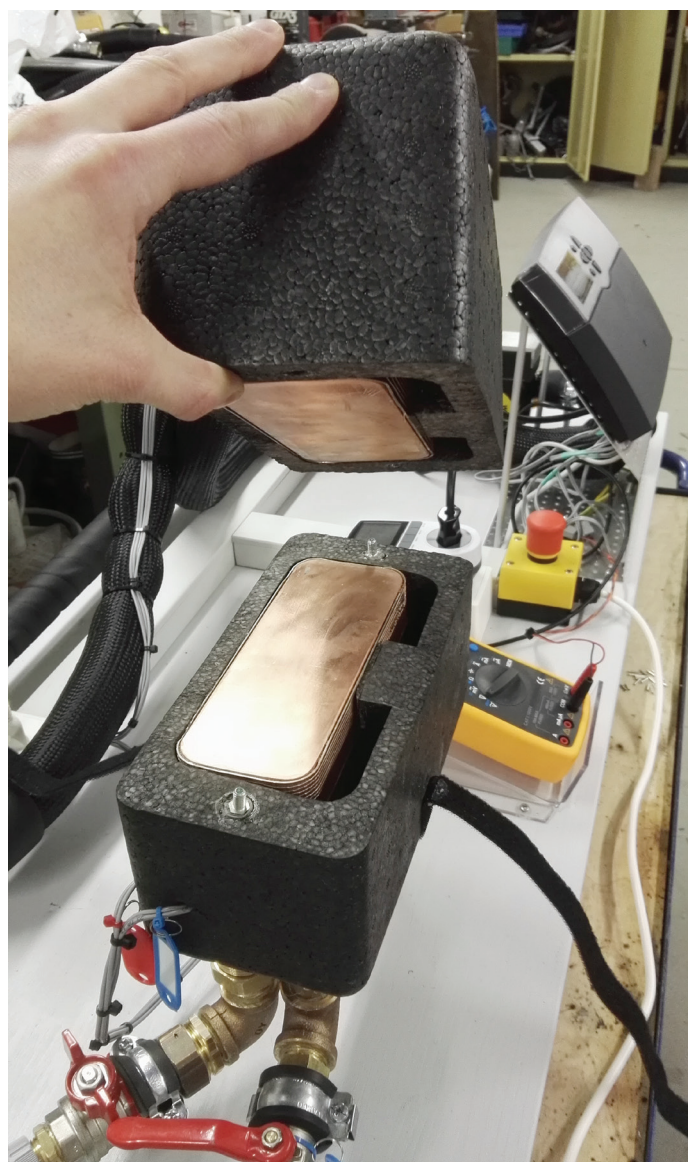


LE POTENTIEL DE LA THERMO-ELECTRICITE

Jusqu'à présent, la thermoélectricité, la conversion directe d'un flux de chaleur en électricité, a été utilisée uniquement pour de rares applications. Une étude réalisée sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie a réévalué le potentiel de cette forme de transformation énergétique. Le potentiel dans le domaine de la chaleur résiduelle industrielle serait élevé mais actuellement non rentable pour l'utilisation dans l'industrie de production. Les perspectives auprès des installations d'incinération d'ordures ménagères, dans le domaine du bâtiment et auprès des applications Off-Grid, par exemple dans les véhicules, sont prometteuses.

La présence de deux niveaux de température permet de générer une tension électrique. Le physicien allemand Thomas Johann Seebeck a décrit l'effet « thermoélectrique » depuis bientôt 200 ans. D'emblée, l'utilisation d'une différence de température pour l'acquisition d'électricité semble attrayante. Des ingénieurs et des passionnés ont ensuite sans cesse tenté d'utiliser « l'effet Seebeck » pour la production d'électricité. Malgré ces longs efforts, cette transformation énergétique connaît aujourd'hui des degrés d'efficacité de



Démonstrateur d'une puissance de transmission de 1 kW comme il est construit dans le contexte de l'étude de l'OFEN sur la thermoélectricité. Sur l'image : Échangeur thermique divisé pour l'admission d'un élément thermoélectrique. Photo : W. Neumann Consult AG

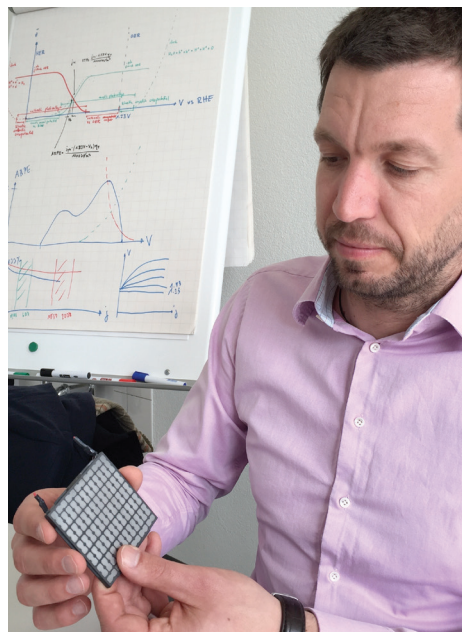
seulement 2 à 7% en fonction de la différence de température et de la plage de température utilisée, du matériau et de l'intégration au système. Ainsi, la thermoélectricité a plutôt été utilisée dans des applications de niche comme, par exemple, l'aéronautique : lorsque les sondes spatiales opèrent trop loin du soleil, la production d'énergie par le photovoltaïque n'est plus possible. L'énergie pour l'exploitation de la sonde est alors générée de manière thermoélectrique à partir de la chaleur émise lors de la désintégration du plutonium 238 et la température ambiante (4 Kelvin). Un fabricant américain de conteneurs utilise également la thermoélectricité pour l'utilisation mobile de la chaleur résiduelle. Ces conteneurs permettent par exemple d'utiliser la chaleur résiduelle d'alésages isolés pour la production décentralisée d'électricité. En Suisse, l'ETH-Spin-off GreenTEG (Zurich) développe des mini-générateurs thermoélectriques dont le courant permet de réguler des vannes de chauffage de manière autonome du point de vue énergétique dans le cadre de systèmes de gestion de bâtiment (cf. l'article spécialisé « Une vanne de radiateur autonome et connectée » sur www.bfe.admin.ch/CT/electricite). Les applications sont également connues pour l'effet inverse, c'est-à-dire pour la transformation directe du courant en froid avec l'effet Peltier : le courant est ainsi utilisé pour le refroidissement de caméras infrarouges ou appliqué dans des réfrigérateurs spéciaux.

Des technologies alternatives plus efficaces

L'idée d'appliquer la production d'énergie thermoélectrique pour la récupération de l'énergie dans la chaleur résiduelle des circuits réfrigérants industriels coule de source. En effet, de nombreux processus industriels produisent de la chaleur résiduelle qui est émise aujourd'hui inutilisée dans l'air ambiant. En 2014, une étude réalisée sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) a localisé un potentiel considérable d'utilisation thermoélectrique de la chaleur résiduelle dans les secteurs industriels de la chimie, du métal, du papier et de l'alimentation. Ce potentiel jusqu'à présent inexploité est une raison de réaliser des recherches sur la thermoélectricité en Suisse mais également dans le monde entier. Une nouvelle étude de l'OFEN réalisée en 2016 a évalué quelle part de ce potentiel peut être concrètement et judicieusement utilisée pour la production d'énergie thermoélectrique. L'Empa, les laboratoires fédéraux d'essai des matériaux et de recherche (Empa), la Haute École Spécialisée de la Suisse du Nord-Ouest et la société d'ingénierie W. Neumann Consult AG (Windisch) ont participé à cette étude.

Les auteurs de l'analyse sont arrivés à la sobre conclusion que

la plus grande partie de la chaleur résiduelle industrielle ne se prête pas à être transformée en électricité de manière économique par la voie thermoélectrique. En effet, la chaleur résiduelle peut être utilisée beaucoup plus efficacement par déplacement de chaleur au sein d'une exploitation industrielle ou pour le chauffage à distance. La production d'électricité avec les cycles eau/vapeur classiques (plage de température de 250 à 650 °C) ou avec les cycles basse température (plage de température de 80 à 350 °C) s'avère plus efficace que la



A l'Empa, l'institut de recherche pour les sciences des matériaux, le Dr. Corsin Battaglia analyse des applications thermoélectriques, par exemple pour la production d'électricité à partir des gaz d'échappement. Sur l'image, Battaglia montre un générateur thermoélectrique à base de tellure de bismuth proposé sur le marché. Photo : B. Vogel

thermoélectricité. Parmi ces derniers figure l'Organic Rankine Cycle (ORC) qui implique l'utilisation de liquides organiques qui s'évaporent à des températures relativement basses. Les processus ORC ont un haut degré d'efficacité proche du maximum théoriquement réalisable (limite de Carnot).

Domaine d'application UIOM

L'application de la thermoélectricité est judicieuse pour les températures d'eau de refroidissement inférieures à 65 °C car dans ce cas, les cycles thermodynamiques ne fonctionnent plus efficacement. Mais même dans cette situation, la rentabilité n'est pas garantie dans la mesure où les délais d'amortissement acceptés dans l'industrie sont de trois à cinq années et les applications thermoélectriques ne permettent actuellement pas d'atteindre ces valeurs. Concernant les circuits de refroidissement industriels, la thermoélectricité serait rentable pour l'utilisation de la chaleur résiduelle industrielle uniquement si le prix de l'électricité s'élevait à 50 cents/kWh (c'est-à-dire environ 55 Rp./kWh) : un tarif beaucoup plus élevé que le prix actuel du marché. La thermoélectricité reste-

rait dans une position difficile, même si le prix de l'électricité se remettait de cette dépression. Le co-auteur Thomas Helbling, professeur de marketing à la Haute École Spécialisée de la Suisse du Nord-Ouest (FHNW), affirme clairement : « Pour les applications On-grid dans le contexte actuel, la thermoélectricité n'est pas une solution économique pour la chaleur résiduelle des eaux de refroidissement industrielles. »

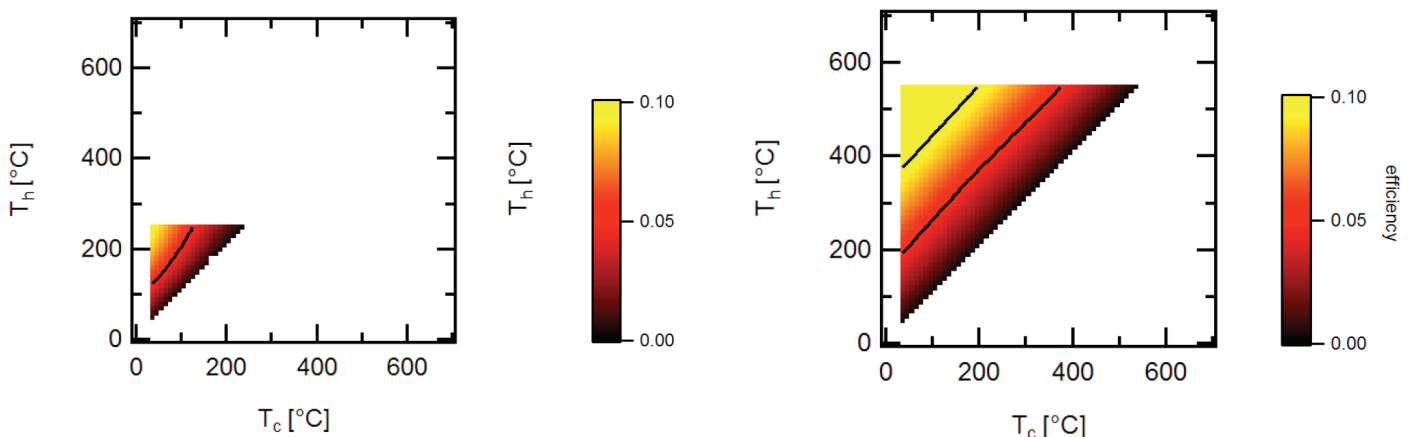
La situation concernant les installations d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) est différente. Ces installations impliquent des durées d'amortissement pouvant atteindre 20 années et la production d'électricité implique le soutien financier public des UIOM (à l'aide de la rétribution à prix coûtant). C'est pourquoi la transformation thermoélectrique d'une partie de la chaleur résiduelle des processus de condensation d'UIOM semble intéressante aux yeux des auteurs de l'étude. Selon leur calcul, les 28 UIOM suisses pourraient produire une puissance électrique de 10 MW (ce qui correspond à la puissance de deux à trois grandes éoliennes).

Potentiel dans le domaine du bâtiment

Conclusion des considérations décrites : les chances de la thermoélectricité se situent à des chaleurs résiduelles de températures inférieures à 65 °C dans des domaines d'application qui n'impliquent ni conditions économiques restrictives, ni brefs délais d'amortissement. Les auteurs voient également une chance pour la thermoélectricité dans le domaine

du bâtiment dans lequel les durées d'amortissement de 25 ans sont acceptées ou courantes. « Le refroidissement est de plus en plus courant dans le domaine du bâtiment. Tous les processus de refroidissement qui dégagent une chaleur de 50 à 60 °C dans l'air ambiant sont intéressants pour la thermoélectricité », affirme le co-auteur Wolfgang Neumann, directeur de la société d'ingénierie du même nom. Neumann et les co-auteurs de l'étude de l'OFEN pensent en premier lieu aux entrepôts frigorifiques, aux grands immeubles de bureaux équipés de climatiseurs et aux salles de serveurs qui produisent également un volume considérable de chaleur résiduelle. Sur l'exemple d'un entrepôt frigorifique à Neuendorf (SO), les auteurs montrent que l'utilisation thermoélectrique de l'air extrait de 65 °C provenant de l'agrégat de réfrigération permet de produire 875 MWh d'électricité par an, ce qui correspond aux besoins en électricité de 290 foyers de quatre personnes.

Dans le cadre de son activité en tant que conseiller énergétique, Neumann a calculé un projet de refroidissement de serveurs à Kloten. Ce faisant, il s'agit d'un bien immobilier composé de logements, de locaux commerciaux et d'une salle de 20 m² contenant environ 50 serveurs. « Si nous pouvons assurer l'utilisation thermoélectrique de 2,5% des 10 kW de chaleur résiduelle, il serait possible de produire une puissance de 250 Watt en permanence ou d'assurer un rendement annuel de 2190 kWh. Cela correspond pratiquement aux



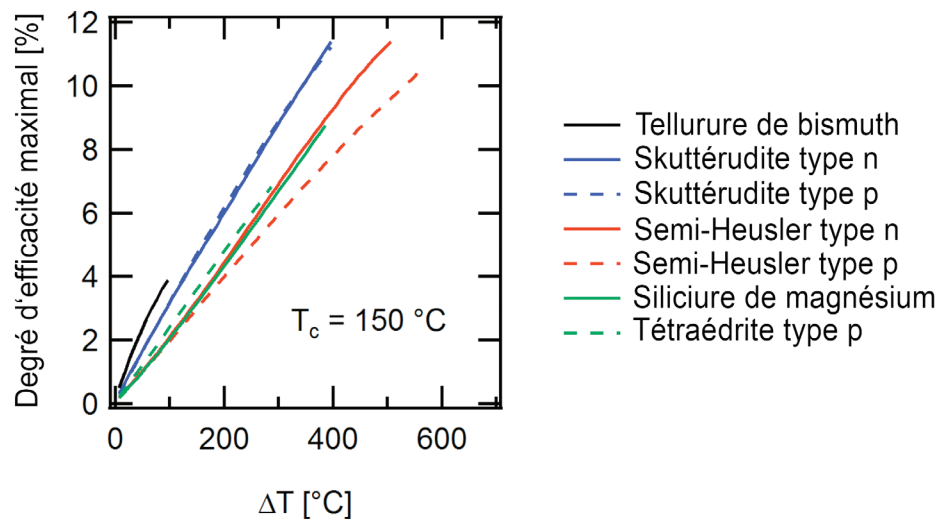
Efficacité maximale dans le domaine d'application d'un générateur thermoélectrique à base de tellurure de bismuth (gauche) et de skuttérudite (droite) conformément aux calculs de l'Empa selon les propriétés mesurées des meilleurs matériaux actuellement développés : le tellurure de bismuth permet des applications à des températures pouvant atteindre 250 °C et lors de l'exploitation de la différence de température entre 250 et 50 °C, il atteint actuellement une efficacité de 9% maximum. La ligne noire montre la plage de température qui permet au matériau d'atteindre une efficacité de 5%. C'est le cas, par exemple, lorsque la température est de 200 °C sur la face chaude et de 100 °C sur la face froide. Les skuttérudites permettent des applications avec des températures pouvant atteindre 550 °C. Les lignes noires montrent les plages de température qui permettent au matériau d'atteindre une efficacité de 5 et 10%. L'efficacité maximale de 10% est assurée, par exemple, lorsque la température est de 500 °C sur la face chaude et de 150 °C sur la face froide. Graphique : Empa

TRANSFORMATION DIRECTE DE LA CHALEUR EN ÉLECTRICITÉ

Au cours des cinq dernières décennies, le photovoltaïque est passé d'une technologie destinée à l'espace à un processus de production d'électricité largement appliqué. Ce succès est le modèle que les promoteurs de la transformation thermoélectrique de la chaleur en électricité souhaitent imiter. Comme le photovoltaïque, la thermoélectricité se base sur des semi-conducteurs. Dans une application thermoélectrique, une température plus élevée règne sur une face du semi-conducteur et une température plus basse sur l'autre face. Sur le côté chaud, les porteurs de charge se déplacent plus rapidement sous l'influence de la température plus élevée. Cela provoque un déficit de charge sur le côté chaud et un excédent de support de charge sur le côté froid, ce qui génère une tension électrique exploitable.

Comme avec le principe photovoltaïque, le choix et le design du matériau a une influence décisive lors de la transformation énergétique thermoélectrique. Par conséquent, les connaissances acquises lors des recherches sur les matériaux, comme celles obtenues à l'Empa de Dübendorf, sont très importantes.

Un matériau adapté pour les applications thermoélectriques dispose d'une conductivité électrique élevée et d'une faible conductivité thermique. « Il s'agit d'exigences paradoxales car comme l'électricité, la chaleur est transmise par les électrons », affirme Dr. Corsin Battaglia, chercheur à l'Empa. « Les conducteurs électriques classiques comme le cuivre sont également de bons conducteurs thermiques et les isolants classiques comme le verre isolent également de la chaleur. Nous devons résoudre ce paradoxe dans la recherche sur les matériaux thermoélectriques. »



Selon le matériau utilisé, la transformation directe de la chaleur en électricité atteint différents degrés d'efficacité. Les degrés d'efficacité dépendent des propriétés du matériau et de la différence de température (cf. graphique). Dans les applications astronautiques, des générateurs thermoélectriques ont démontré qu'ils peuvent fonctionner sans problème pendant des décennies.

Sans pièces mobiles, l'électricité peut être acquise de manière thermoélectrique mais également, par exemple, de manière magnétocalorique (cf. article « Strom aus handwarmem Wasser » sur : www.bfe.admin.ch/CT/electricite). BV

besoins en électricité d'un petit foyer », affirme Neumann, « avec ce projet, nous souhaitons accumuler des expériences puis s'attaquer à d'autres projets. »

Applications Off-grid intéressantes

Outre le domaine du bâtiment, les auteurs ont localisé le se-

cond domaine d'application pour la thermoélectricité dans les applications Off-grid. Ici, malgré la pression constante du prix, la technologie n'entre pas en concurrence avec le prix du courant de secteur. En plus des applications sur les bateaux ou dans les avions, l'application est particulièrement intéressante dans l'industrie automobile. « Les construc-

teurs automobiles subissent une grande pression concernant l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules à moteurs à combustion afin de respecter les restrictions relatives aux émissions de CO₂ de plus en plus strictes », affirme Dr. Corsin Battaglia qui s'est auparavant penché sur la production d'électricité photovoltaïque et qui dirige aujourd'hui le laboratoire « Matériaux pour la conversion de l'énergie » de l'Empa. « Environ deux tiers de l'énergie contenue dans le carburant s'échappe sous forme de chaleur dont la moitié par le pot d'échappement », dit Battaglia, « la thermoélectricité permet de récupérer une partie de cette énergie. » Cela semble également judicieux dans la mesure où les voitures consomment de plus en plus d'électricité on board. Différents groupes automobiles recherchent des solutions. Le fabricant automobile suédois Scania a récemment mis un camion test équipé d'un système de récupération thermoélectrique de l'énergie en circulation.

Battaglia est assis dans son bureau de l'Empa à Dübendorf et montre un module thermoélectrique disponible sur le marché au visiteur. Il fonctionne à base de tellurure de bismuth (Bi₂Te₃) qui est actuellement le matériau standard pour les applications thermoélectriques. Le tellurure de bismuth n'est pas adapté pour l'application sur les voitures car il est prévu uniquement pour une température maximale de 200 °C et fond en présence de températures plus élevées comme c'est le cas dans le pot d'échappement. Techniquement, le tellurure de plomb (PbTe) serait un matériau adapté mais le plomb n'est plus autorisé dans les composants électriques en raison de sa toxicité. Pour permettre des applications avec des températures de 250 à 700 °C, la recherche sur les matériaux privilégie aujourd'hui des matériaux alternatifs comme la skutterudite (R_xCo₄Sb₁₂), les alliages semi-Heusler (comme TiNiSn), le siliciure (concrètement : Mg₂Si) et la tétraédrite (comme Cu₁₂Sb₄S₁₃). Ces semi-conducteurs promettent des taux de conversion de l'énergie thermique en énergie électrique pouvant atteindre 10%. Ils pourraient permettre aux fabricants de voiture d'augmenter l'efficacité. En Allemagne, un projet autour d'une collaboration réunissant différents participants académiques et industriels vise à permettre l'application en série de la thermoélectricité dans les voitures à moyen terme. Ce projet sera réalisé jusqu'en 2018. La question à savoir si les modules thermoélectriques généreront suffisamment d'énergie pour pouvoir renoncer complètement à l'alternateur dans les voitures reste ouverte.

Au printemps 2016, l'Empa a démarré un projet financé par l'OFEN en vue d'apporter une réponse.

- Vous trouverez le **rapport final** du projet sur : <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=36371>
- Roland Brüniger (roland.brueeniger[at]r-brueniger-ag.ch), directeur du programme de recherche sur les technologies de l'électricité de l'OFEN, communique des **informations supplémentaires**.
- Vous trouverez d'autres **articles spécialisés** concernant les projets phares et de recherche, les projets pilotes et les démonstrations dans le domaine des technologies de l'électricité sur : www.bfe.admin.ch/CT/electricite.