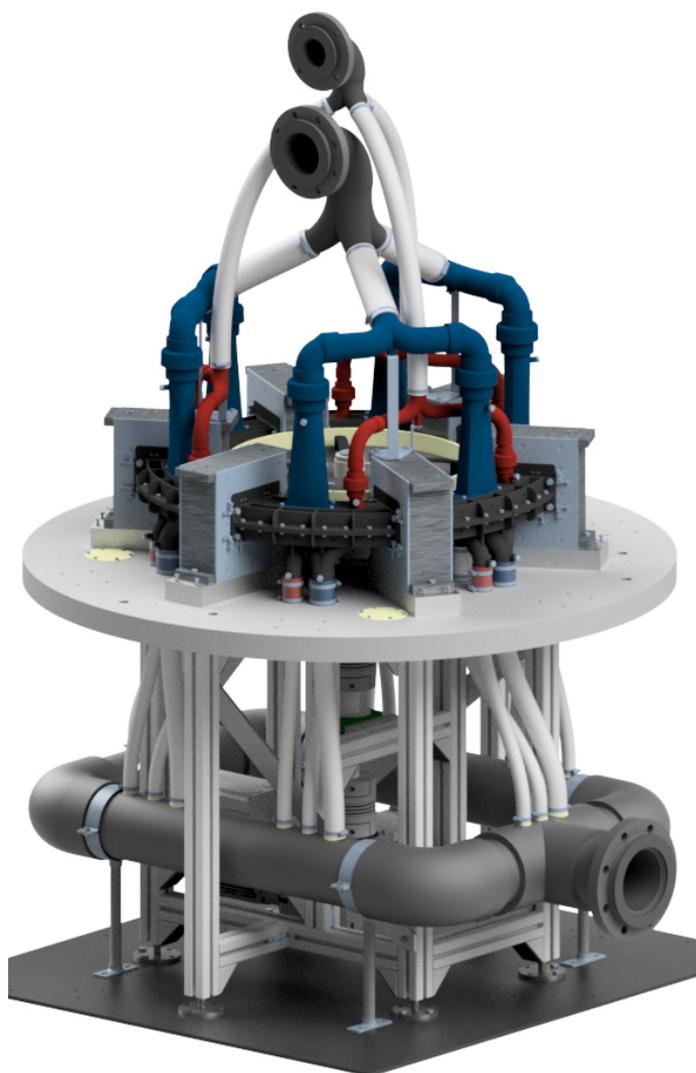


# DE L'ÉLECTRICITÉ À PARTIR DE REJETS THERMIQUES À BASSE TEMPÉRATURE

Les exploitations industrielles ou les centrales électriques produisent des rejets thermiques en grandes quantités. Aujourd'hui, les rejets thermiques d'une température inférieure à 80 °C sont utilisés pour fournir de l'eau chaude ou de l'énergie de chauffage. Toutefois, la chaleur à basse température pourrait également servir à la production d'électricité à l'avenir. Les ingénieurs de l'entreprise argovienne Swiss Blue Energy AG montrent comment y parvenir dans la pratique avec le modèle fonctionnel d'un moteur thermo-magnétique. Il reste cependant un long chemin à parcourir avant que ce nouveau type de petite centrale électrique n'atteigne sa maturité industrielle.

Plusieurs solutions s'offrent à quiconque souhaite produire de l'électricité. Un procédé largement utilisé consiste à produire de la vapeur chaude par combustion d'énergies fossiles ou non fossiles, par fission nucléaire ou à partir de la géothermie profonde, cette vapeur entraînant une turbine et un



La pièce maîtresse du modèle fonctionnel du TMM est le rotor, dans lequel circule alternativement un liquide chaud et un liquide froid. Les flux de liquide chauffent et refroidissent les échantillons de gadolinium placés sur le rotor en alternance rapide, ce qui crée un mouvement de rotation. Le rotor en lui-même n'est pas visible sur la représentation ; il est entouré par le tube circulaire noir. Illustration: Rapport final de l'OFEN

## VOICI COMMENT FONCTIONNE LE MODÈLE FONCTIONNEL

Le principe de fonctionnement du moteur thermo-magnétique repose sur l'utilisation d'un matériau magnétocalorique: Celui-ci est magnétique en dessous de la température dite de Curie, mais perd sa propriété magnétique lorsqu'il atteint une température supérieure. La température de Curie du gadolinium est de 19,3 °C. Les développeurs de Swiss Blue Energy ont déposé le gadolinium sur un rotor dans leur modèle fonctionnel du TMM. Le graphique représente le mode de fonctionnement sous forme de schéma: Dans la phase 1, le gadolinium est refroidi par un courant d'eau froide et devient ainsi magnétique. Il est ensuite attiré par l'aimant permanent et se déplace vers la droite (phase 2). Lors du passage du gadolinium à travers l'aimant permanent, il est chauffé par l'eau chaude et devient ainsi non-magnétique (phase 3). Lorsque le gadolinium quitte l'aimant permanent, il est à nouveau refroidi par de l'eau froide (phase 4), ce qui lui permet de redevenir magnétique et de se diriger vers l'aimant permanent suivant. Un mouvement de rotation continu résulte de l'alternance constante entre le refroidissement et le réchauffement. L'énergie mécanique peut être transformée en électricité par le biais d'un générateur.

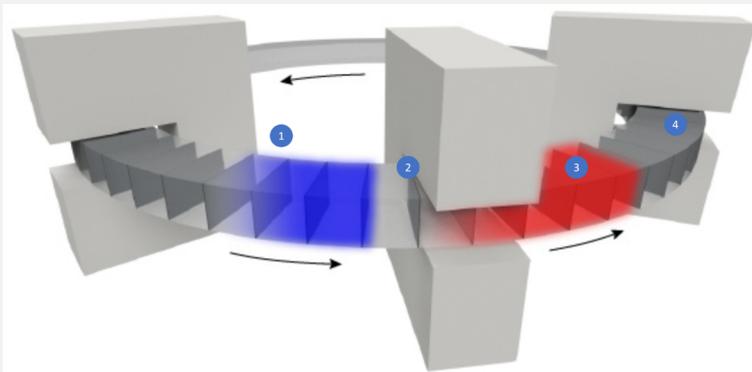
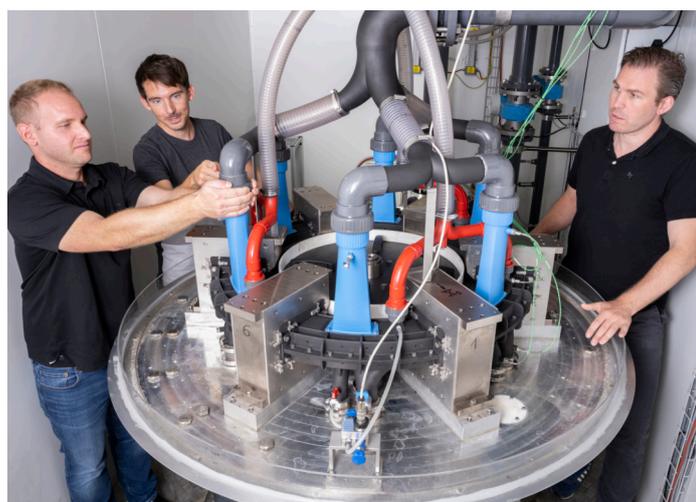


Illustration: Rapport final OFEN

générateur d'électricité couplé à celle-ci. Si en revanche la température des rejets thermiques disponibles est de 80, 60 ou 40 °C, la production directe d'électricité via une turbine à vapeur est impossible. C'est la raison pour laquelle les rejets thermiques sont généralement utilisés aujourd'hui à des fins thermiques, c'est-à-dire pour la production d'eau chaude et de chauffage, mais pas pour la production d'électricité.

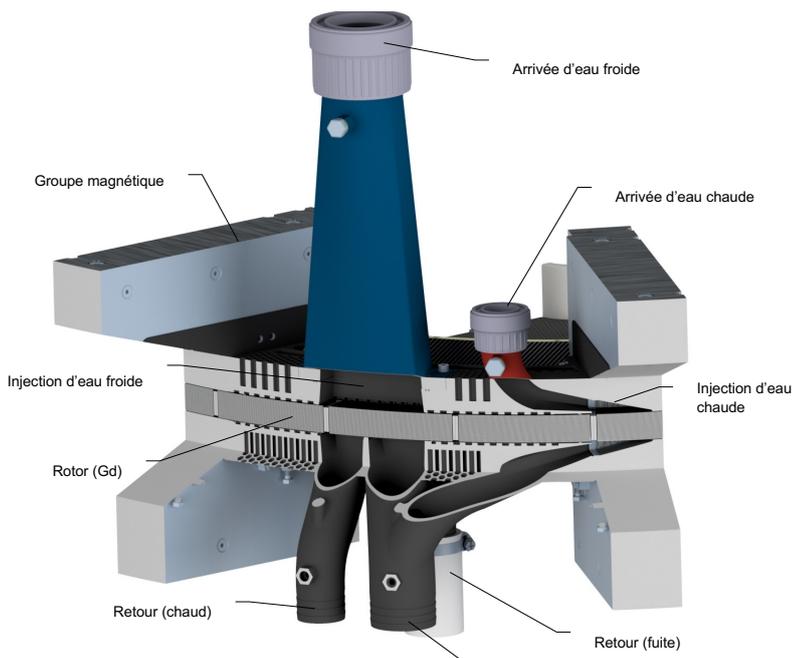


L'équipe d'ingénieurs de Swiss Blue Energy avec le prototype du moteur thermo-magnétique (de g. à dr.) : Daniel Wymann, Jan Brechbühler et Silvio Krauss. Photo : Alex Spichale

### Exploitation de l'effet magnétocalorique

En réalité, il existe d'autres possibilités. Les rejets thermiques - concrètement de l'eau sur une plage de température de 20 à 80 °C - peuvent être transformés en électricité, à condition qu'un flux continu d'eau froide soit disponible simultanément. En raison de la température relativement basse des rejets thermiques, il faut s'attendre à un rendement électrique plus faible que pour les turbines à vapeur. Cependant, compte tenu de la grande soif d'électricité de notre société, cette conversion d'énergie pourrait également présenter un intérêt. La production d'électricité à partir de chaleur à basse température est possible grâce à l'utilisation de l'effet magnétocalorique. Il s'agit de la propriété physique de certains matériaux de changer plus ou moins brusquement de magnétisme à une certaine température (« température de Curie »). Ces matériaux sont donc magnétiques ou non magnétiques selon la température. En s'y prenant bien, de tels matériaux magnétiquement « commutables » peuvent permettre de construire un moteur pour entraîner un générateur et produire de l'électricité. Les spécialistes parlent d'un moteur thermo-magnétique, TMM en bref.

Un TMM utilisable commercialement est l'objectif à long terme de trois ingénieurs qui travaillent à Bad Zurzach (AG) sur un projet de développement sous l'égide de la Swiss Blue Energy AG. Les ingénieurs ont construit à Win-



Section du rotor avec les segments magnéto-caloriques de l'échangeur de chaleur en gadolinium. L'illustration indique que les flux d'eau chaude et d'eau froide sont séparés. Illustration: Rapport final de l'OFEN

disch (AG), avec le soutien de la Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse, un modèle fonctionnel de TMM d'une puissance de 500 watts (pour le principe de construction, voir l'encadré). Pour la petite centrale électrique, ils utilisent de l'eau à 60 degrés provenant d'une centrale de chauffage (20 m<sup>3</sup>/h) et un flux d'eau froide à 13 °C (40 m<sup>3</sup>/h). Le gadolinium, une terre rare, est utilisé comme matériau magnéto-calorique. « Nous avons construit un moteur thermo-magnétique unique au monde, probablement le plus puissant qui ait jamais existé », se réjouit Daniel Wymann, directeur technique chez Swiss Blue Energy.

### Une puissance d'un demi-kilowatt

Le TMM de Windisch est un modèle fonctionnel. La construction montre que l'idée technique fonctionne fondamentalement. Dans le cas présent, cela signifie qu'il est effectivement possible de produire de l'électricité à partir de rejets thermiques à basse température, et même plus d'électricité que n'en consomment les pompes du TMM. La puissance mécanique brute est de 701 watts, moins la puissance de la pompe (64 watts), il reste 637 watts. Le générateur en tire une puissance électrique de 531 watts, ce qui correspond à 0,1 % de l'énergie thermique contenue dans le flux d'eau chaude. Cette puissance est suffisante pour alimenter un scooter électrique. Toutefois, ce nouveau développement est encore loin d'une application rentable.

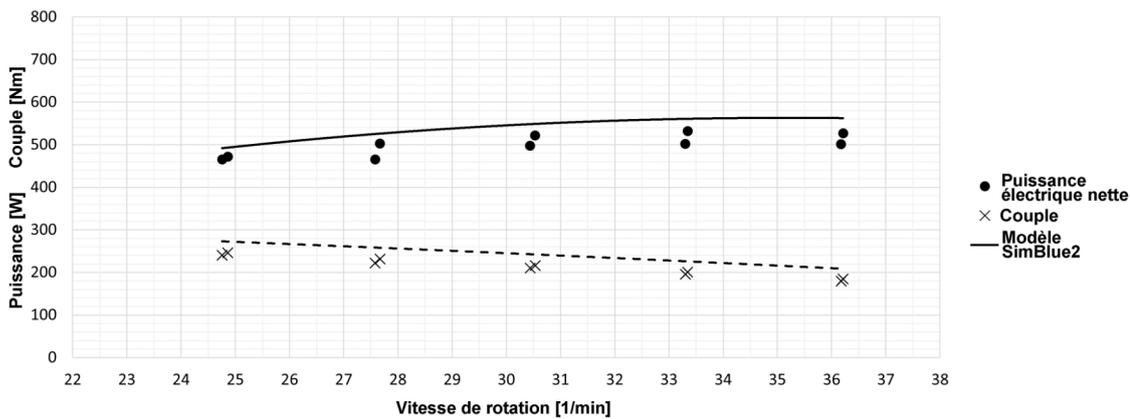
Le modèle fonctionnel est le résultat d'un projet de recherche

de deux ans soutenu par l'OFEN qui s'est achevé mi-2022. Les travaux préparatoires remontent à plusieurs années. Le Dr Nikolaus Vida, ophtalmologue intéressé par la technique, travaille sur cette idée depuis 2005. Depuis, il a construit trois structures avec l'aide de différents ingénieurs et a fondé en 2012 la société Swiss Blue Energy AG pour les développer. Au fil des années, des chercheurs de l'Institut d'ingénierie thermique et des fluides de la FHNW ont apporté leur soutien scientifique.

### Une innovation constructive

La dernière version du TMM est également la première à produire de l'électricité en quantité suffisante, c'est-à-dire à produire plus d'énergie qu'il n'en faut pour faire fonctionner les pompes. Ce progrès est principalement le résultat d'une innovation en matière de construction: Les flux d'eau chaude et d'eau froide sont désormais séparés dans un système fermé et la direction du flux est passée de l'horizontale à la verticale. Les pertes de charge et donc la puissance de pompage nécessaire au fonctionnement du TMM ont ainsi pu être réduites d'un facteur 30 par rapport au modèle précédent.

En séparant largement les deux flux d'eau, ils ne se mélangent que très peu. Selon les ingénieurs impliqués, cela pourrait ouvrir la possibilité de construire un futur TMM en plusieurs étapes, chaque étape exploitant un gradient de température clairement défini et produisant de l'électricité. La séparation des flux de fluides « montre un potentiel de



Le graphique illustre l'évolution de la puissance du modèle fonctionnel du TMM en fonction de la vitesse de rotation. Les points et les croix représentent les valeurs mesurées, la ligne étirée indique la puissance nette telle qu'elle a été calculée avec l'outil de simulation SimBlue2. Graphique: Rapport final de l'OFEN

cascade énergétique (multi-étages) pour de futures augmentations d'efficacité et l'échelonnement nécessaire des performances », écrivent les concepteurs dans le rapport final du projet.

### Réduction des pertes de pression au minimum

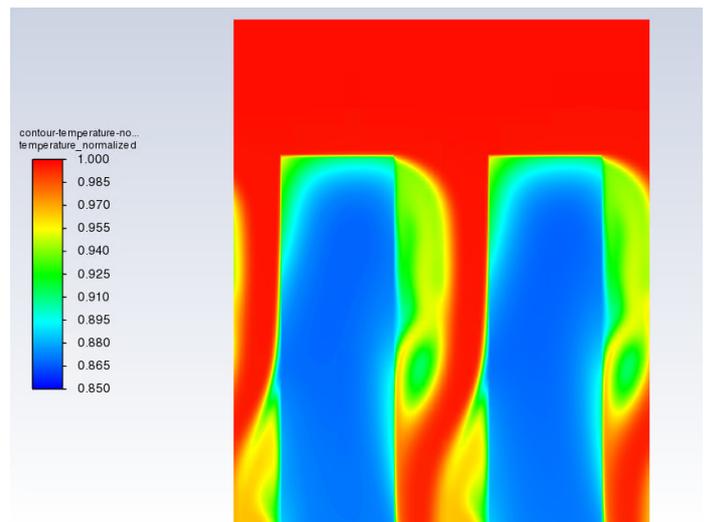
Les scientifiques de la FHNW ont soutenu le projet de développement de Swiss Blue Energy à plusieurs égards. Ils ont contribué à la conception des composants à l'aide de simulations numériques et ont fourni des mesures précises de l'échauffement/refroidissement des matériaux ou de la circulation dans le rotor. L'université des sciences appliquées a également mené des études détaillées afin de mieux comprendre les processus physiques à l'intérieur du TMM. Cela permet de mieux comprendre les processus de magnétisation, le comportement de la circulation et de la température du fluide chaud et froid ainsi que les pertes de pression à l'intérieur du TMM. L'objectif à long terme est une construction qui assure une circulation à faible résistance à travers le rotor tout en minimisant l'impact sur les forces magnétiques.

Les détails de construction ne sont qu'un aspect de la poursuite du développement du modèle de fonction TMM en un prototype potentiellement commercialisable. Le problème principal est plutôt que le gadolinium, le matériau magnétocalorique actuellement utilisé, ne permettra pas d'obtenir un TMM performant et efficace, comme le reconnaissent les auteurs de l'étude. « Une exploitation économique du TMM avec du gadolinium n'est pas possible pour plusieurs raisons: l'efficacité insuffisante, le prix élevé, la mauvaise compatibilité avec l'environnement ».

### Deux catégories de matériaux en vue

L'inadéquation du gadolinium est connue depuis longtemps.

Pour trouver une alternative viable, les développeurs argoviens placent notamment leurs espoirs dans l'Université technique de Delft (Pays-Bas). La chaire du professeur Ekkes Brück y mène des recherches sur les matériaux magnétocaloriques. Pour le développement d'un TMM, deux catégories de matériaux sont au premier plan: d'une part, un composé de manganèse, de fer, de phosphore et de silicium, d'autre part, l'alliage lanthane-fer-silicium que l'entreprise allemande Vakuumschmelze (Hanau) commercialise sous le nom de Calorivac. Les deux catégories de matériaux promettent un effet magnétocalorique très fort, une « température de commutation » facilement réglable (par le biais de la composition du matériau), et également des coûts de fabrication supporta-



Des scientifiques de la FHNW ont utilisé la mécanique des fluides assistée par ordinateur (Computational Fluid Dynamics/CFD) pour étudier le comportement des flux d'eau et l'échange thermique transitoire dans le TMM. L'image montre deux lamelles en matériau magnétocalorique entourées d'eau chaude et ainsi réchauffées. Illustration: Rapport final de l'OFEN

bles. En contrepartie, il existe des inconvénients qui limitent encore l'utilisation de ces catégories de matériaux dans un TMM: mauvaises propriétés thermiques, faible résistance et processus de fabrication complexes.

Malgré de tels obstacles, les ingénieurs de Swiss Blue Energy veulent poursuivre leur travail de développement, à condition de trouver un investisseur qui croit également en l'avenir du moteur thermo-magnétique. « Nous souhaitons passer à l'une des deux catégories de matériaux lors de la prochaine étape », explique Daniel Wymann de Swiss Blue Energy. « Ces matériaux nécessitent toutefois un processus différent de celui du gadolinium pour produire de l'électricité. Nous devons donc revoir entièrement la conception technique du TMM. »

- Pour **visiter le modèle fonctionnel à Windisch**, les professionnels ou les investisseurs potentiels sont priés de s'adresser à Daniel Wymann:  
[daniel.wymann@sbe-ag.ch](mailto:daniel.wymann@sbe-ag.ch)
- Le **rapport final** du projet « Réalisation du modèle fonctionnel K2 du moteur thermo-magnétique » (TMM) est disponible sur:  
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=48555>
- Roland Brüniger ([roland.brueeniger@atlr-brueniger-ag.ch](mailto:roland.brueeniger@atlr-brueniger-ag.ch)), directeur du programme de recherche sur les technologies de l'électricité de l'OFEN, communique des **informations** à ce sujet.
- Vous trouverez plus d'**articles spécialisés** concernant les projets pilotes, de démonstration et les projets phares dans le domaine des batteries sur  
[www.bfe.admin.ch/ec-electricite](http://www.bfe.admin.ch/ec-electricite).