

LES REJETS THERMIQUES CHAUFFENT LES VÉHICULES

Pour le chauffage des bâtiments, les pompes à chaleur sont désormais une solution standard. L'utilisation de ces appareils pour le chauffage des véhicules est encore peu expérimentée. Dans le cadre d'un projet pilote et de démonstration de l'Office fédéral de l'énergie, un module compact de chauffage et de refroidissement pour petits tracteurs électriques a été testé. La solution impliquant une pompe à chaleur saumure-saumure avec deux circuits hydrauliques commutables pourrait faire école et être utilisée à l'avenir dans d'autres types de véhicules.



Un tracteur électrique pour l'entretien du gazon en action : à l'avant, le tracteur est équipé d'un souffleur de feuilles et à l'arrière, d'un scarificateur pour l'entretien du gazon. La cabine est chauffée par une pompe à chaleur qui utilise la chaleur dégagée par le moteur électrique et d'autres composants. Photo : Rigitrac

Les moteurs fonctionnant au diesel ou à l'essence produisent une chaleur résiduelle abondante à haute température. Celle-ci peut être utilisée directement pour le chauffage du véhicule. En revanche, les moteurs des véhicules électriques fonctionnent avec un rendement très élevé et ne dégagent qu'une quantité limitée de chaleur. Celle-ci a en outre une température plus basse et ne peut généralement pas être utilisée directement à des fins de chauffage. C'est pourquoi ces véhicules sont généralement chauffés à l'électricité, c'est-à-dire avec la batterie. Ce consommateur électrique supplémentaire réduit l'autonomie du véhicule.

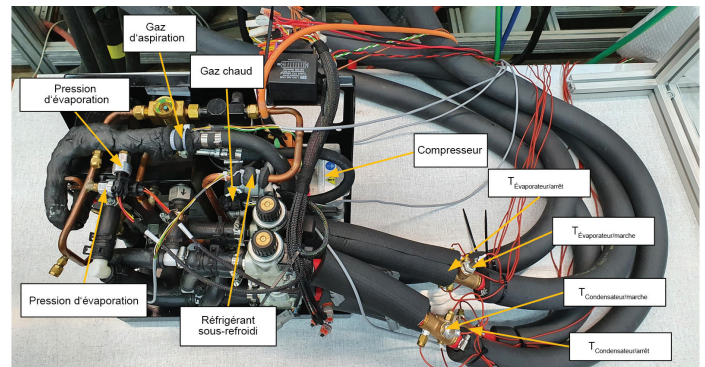
Pour réduire la consommation d'électricité nécessaire au chauffage de la cabine du véhicule, il est possible d'utiliser une pompe à chaleur. Celle-ci utilise notamment la chaleur résiduelle du moteur électrique et d'autres composants et fournit de la chaleur de chauffage avec moins d'électricité qu'un chauffage électrique. Selon les calculs de l'École polytechnique fédérale de Zurich, la consommation d'électricité pour les systèmes HVAC (chauffage, ventilation, climatisation) d'un bus électrique peut ainsi être réduite de près de 60%. (cf. article de l'OFEN « Conduire un bus avec beaucoup de confort et peu d'électricité », consultable sur le site www.bfe.admin.ch/ec-mobilite).

Construction compacte

Un bus a de la place pour l'installation d'une pompe à chaleur. Dans les petits véhicules, cela n'est pas possible sans autre mesure, car l'espace disponible est utilisé pour d'autres composants du véhicule - ou est à la disposition des utilisateurs comme siège ou espace de chargement. La société Rigitrac Traktorenbau AG de Küssnacht am Rigi, qui fabrique entre autres des tracteurs électriques compacts, ne s'est pas

PETITS TRACTEURS À PROPULSION ÉLECTRIQUE

La société Rigitrac Traktorenbau AG a été fondée en 2003 à Küssnacht am Rigi (SZ). L'entreprise construit et entretient des tracteurs destinés à être utilisés dans l'agriculture et comme véhicules communaux (entretien des pelouses, déneigement, etc.). L'entreprise familiale produit des tracteurs à moteur diesel d'une puissance de 110 CV. À partir de 2018, Rigitrac a développé un tracteur entièrement électrique (40 kW ou environ 54 CV), lequel est sur le marché depuis 2022. L'entreprise familiale emploie 50 personnes, dont huit apprentis.



Vue du module de chauffage et de refroidissement pendant les tests sur le banc d'essai de la Haute école de Lucerne. Photo : rapport final de l'OFEN

laissée décourager par cette situation initiale. Ses ingénieurs ont développé un système de chauffage et de refroidissement basé sur une pompe à chaleur pour les tracteurs électriques. La Haute école de Lucerne - Technique & Architecture a participé au projet en tant qu'institution scientifique partenaire. L'OFEN soutient le projet dans le cadre de son programme pilote et de démonstration.

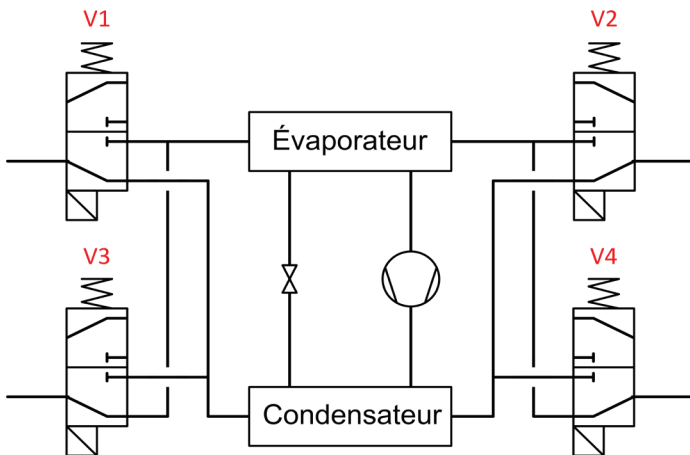
Compte tenu de l'espace restreint, un module de chauffage et de refroidissement compact de la société Aircontech GmbH (Vorarlberg/A) est utilisé. Il est placé sous le capot du tracteur électrique et a à peu près la taille d'une batterie de voiture (35x25x27 cm). Le module de commande HVAC (5x3x2 cm) est monté sous le tableau de bord. « Nous ne voulions pas équiper notre véhicule uniquement d'une climatisation pour les chaudes journées d'été, c'est pourquoi nous avons utilisé, au lieu d'un groupe frigorifique, une pompe à chaleur avec deux circuits hydrauliques commutables, laquelle nous permet de refroidir et de chauffer », explique Pirmin Zimmermann, ingénieur chez Rigitrac. « Par rapport à une simple installation de refroidissement, nous n'avons besoin ici que de quelques vannes supplémentaires. En choisissant soigneusement ces composants et en les disposant intelligemment en conséquence, nous avons pu construire le véhicule de manière compacte, bien qu'il contienne désormais en plus un chauffage efficace ».

Également pour les froides journées d'hiver

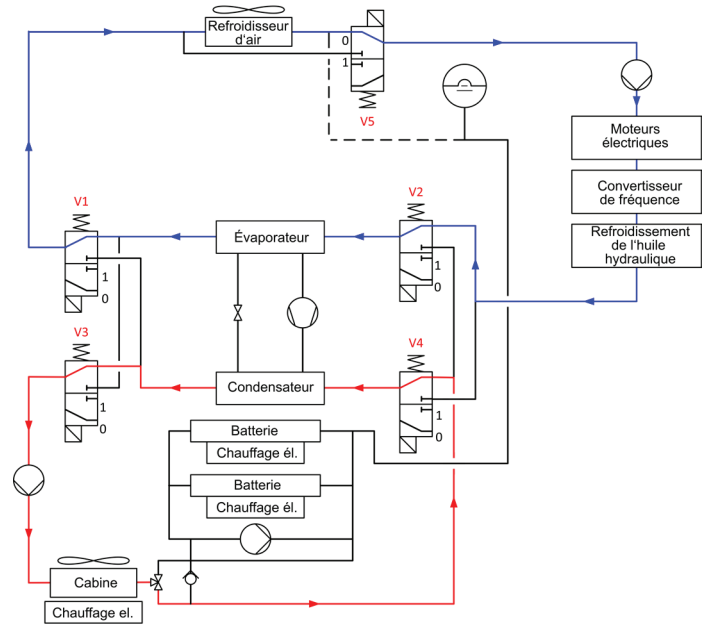
Le module de chauffage et de refroidissement d'Aircontech met à disposition, selon le « sens de fonctionnement », jusqu'à 7 kW de puissance de chauffage ou jusqu'à 4,5 kW de puissance de refroidissement. L'énergie de chauffage et de refroidissement est utilisée pour chauffer (hiver) ou refroidir (été) la cabine du conducteur, mais également pour refroidir

les moteurs électriques et les convertisseurs électriques ainsi que pour tempérer la batterie. Le module de chauffage et de refroidissement est conçu pour des températures extérieures comprises entre -15 et 35°C. Une pompe à chaleur saumure-saumure est utilisée pour fournir la chaleur. Elle utilise la chaleur résiduelle d'environ 30 degrés du moteur électrique, des convertisseurs de fréquence ou du refroidissement de l'huile hydraulique et l'amène au niveau de température souhaité. « Pour les situations exceptionnelles ou pour améliorer le confort, un chauffage d'appoint traditionnel (élément chauffant PTC) est installé », explique Pirmin Zimmermann.

La chaleur résiduelle est déjà partiellement utilisée aujourd'hui dans les voitures électriques haut de gamme. Mais dans le domaine des véhicules utilitaires, l'approche de Rigitrac est encore peu expérimentée. Dans le cadre du projet P+D, des experts de la Haute école de Lucerne (HSLU), dirigés par le professeur Beat Wellig, ont étudié la solution de chauffage et de refroidissement en laboratoire et lors d'essais sur le terrain en ce qui concerne la mesure des caractéristiques de foncti-



Les quatre vannes (V1, V2, V3 et V4) permettent de commuter le système entre le mode chaud et le mode froid. Illustration : rapport final de l'OFEN

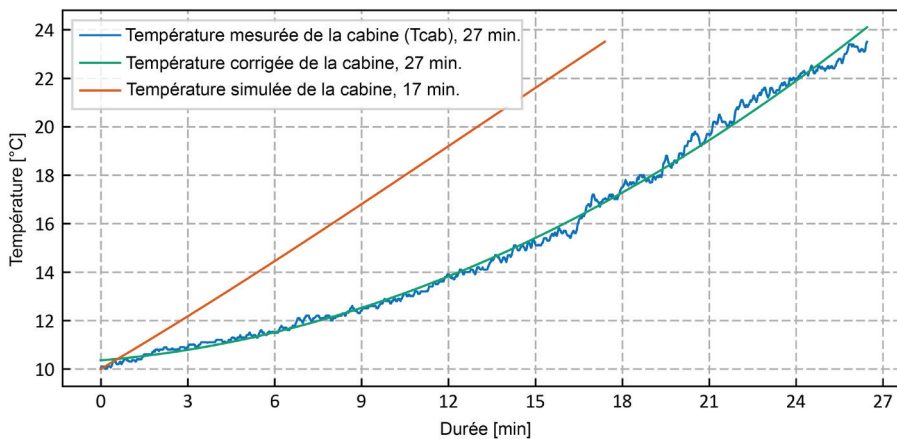


Représentation schématique simplifiée du système de chauffage et de refroidissement pour le tracteur électrique: les sources de chaleur utilisées sont les rejets thermiques de différents composants du véhicule (par ex. les moteurs électriques, les convertisseurs de fréquence ou le refroidissement de l'huile hydraulique). Les sources de chaleur sont exploitées par un circuit (bleu). La chaleur est portée à une température plus élevée par la pompe à chaleur et utilisée pour chauffer la cabine du conducteur (mais aussi pour tempérer la batterie) (circuit rouge). Illustration : rapport final de l'OFEN/révisé

onnement, la performance et l'efficacité. « Nos études ont confirmé que la solution de chauffage et de refroidissement était adaptée au marché », explique Stefan Flück, chef de projet à la HSLU. Les évaluations auraient montré que la chaleur résiduelle des différents composants pouvait être utilisée malgré la température relativement basse, par la pompe à chaleur ou même directement dans certaines situations. « La commande du module de chauffage et de refroidissement peut encore être optimisée sur certains points », ajoute Flück.

AUCUN PROBLÈME AVEC LE GIVRE

Les chauffages à pompe à chaleur pour les véhicules électriques ne peuvent pas utiliser facilement l'air extérieur comme source de chaleur, comme c'est le cas pour les bâtiments. La raison: si un tel chauffage fonctionnait à des températures inférieures à 0°C, de la glace se formerait sur l'évaporateur. Cela poserait problème dans la mesure où l'évaporateur ne peut pas être « dégivré » sur un véhicule aussi facilement que sur la pompe à chaleur d'un bâtiment. Le tracteur de Rigitrac contourne cet obstacle en n'utilisant pas l'air extérieur comme source de chaleur, mais uniquement la chaleur dégagée par la batterie et l'entraînement. De cette manière, le tracteur peut être utilisé avec le chauffage par pompe à chaleur même en cas de températures négatives, sans qu'il y ait de problème de dégivrage.



Selon les simulations de la HSLU (ligne rouge), la pompe à chaleur permet de chauffer la cabine du conducteur de 10 à 23,5°C en 17 minutes (pour un besoin en électricité de 231 Wh). Lors d'une mesure sur un tracteur, le temps de chauffage pour la cabine et la mise en température simultanée de la batterie était de 27 minutes (courbe bleue/verte). Pour comparer : pour le même processus, l'élément chauffant PTC a besoin de 50 minutes (besoin en électricité de 915 Wh). La pompe à chaleur ne nécessite qu'un tiers du temps et un quart de l'électricité. En pratique, la pompe à chaleur et le chauffage d'appoint (élément chauffant PTC) sont parfois combinés, ce qui réduit les temps de chauffage. Graphique : rapport final de l'OFEN

Une durée d'utilisation plus longue

Grâce à leurs mesures, les scientifiques de la HSLU ont déterminé l'avantage énergétique du nouveau chauffage. Pour la pompe à chaleur (en mode chauffage uniquement), ils ont calculé un rendement moyen de conversion de l'électricité en chaleur (COP) de 2,9. La pompe à chaleur est ainsi un peu moins efficace que les pompes à chaleur pour le chauffage des bâtiments (COP de 3 à 5), ce qui s'explique par la plus grande amplitude thermique interne de la pompe à chaleur pour tracteurs. Il faut garder à l'esprit que l'électricité nécessaire à la production de chaleur ne représente qu'une faible part de la consommation d'énergie des tracteurs électriques. Par conséquent, la pompe à chaleur ne peut pas réduire autant la consommation d'électricité du véhicule et, par conséquent, ne peut pas prolonger autant la durée d'utilisation du véhicule avec une charge de batterie: lorsque la puissance de travail est faible ou moyenne, comme les tracteurs électriques sont utilisés la plupart du temps dans la pratique, la durée d'utilisation augmente de 6 à 10% (ce qui correspond à 15 à 45 minutes).

Même si le gain en durée d'utilisation est limité par l'exploitation de la chaleur résiduelle, la pompe à chaleur est rentable, explique Theres Beutler, directrice de Rigitrac: « Si le véhicule a besoin de moins d'électricité pour la même durée d'utilisation grâce à la pompe à chaleur, nous pouvons installer une batterie plus petite, ce qui permet de faire des économies. Ces économies sont supérieures au surcoût des vannes nécessaires au fonctionnement réversible de la pompe à chaleur ».

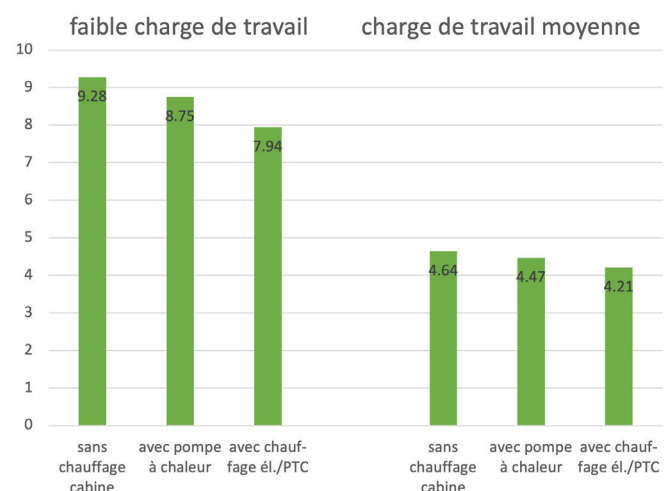
Transférable à d'autres véhicules

En 2023, Rigitrac a construit douze tracteurs électriques équipés du nouveau système de chauffage et de refroidis-

sement. La coopération avec le fabricant italien de machines agricoles Goldoni-Keestrack SRL devrait permettre d'augmenter le nombre d'unités à l'avenir. L'accent est mis sur les tracteurs destinés à une utilisation communale. En principe, le système de pompe à chaleur peut très bien être utilisé dans toutes les machines de travail, souligne Theres Beutler. Les machines de travail qui produisent une certaine chaleur résiduelle, mais dont la puissance ou la température n'est pas assez élevée pour être utilisée directement pour le chauffage, offriraient les meilleures conditions à cette fin. Avec la pom-

Durée d'utilisation du tracteur él.

(en heures)



Pour chauffer la cabine du conducteur, la pompe à chaleur a besoin de moins de courant de batterie que le chauffage électrique. En cas de faible charge de travail, la durée d'utilisation avec une pompe à chaleur est environ 10% plus longue qu'avec un chauffage électrique. En cas de charge de travail moyenne, la durée d'intervention est tout de même supérieure d'environ 6%. Illustration : B. Vogel sur la base du rapport final de l'OFEN



Vue de l'atelier de production Rigitrac à Küssnacht am Rigi. Photo : Rigitrac

pe à chaleur, la chaleur résiduelle des composants peut être augmentée pour atteindre un niveau utilisable. « Tant que le prix des batteries reste élevé ou que l'espace disponible ne permet pas d'installer une batterie plus grande, toute augmentation de l'efficacité est un gain pour le client ainsi que pour le producteur », explique Beutler.

Les auteurs du rapport final du projet prévoient une utilisation du système de chauffage et de refroidissement pour d'autres types de véhicules également: « De tels systèmes sont utilisables non seulement pour les < véhicules spéciaux > (par ex. les tracteurs, les camions ou les engins de construction), mais aussi pour les automobiles ». Dans ce contexte, un autre projet soutenu par l'OFEN est intéressant: il s'agit de construire un tracteur électrique à batterie pour l'agriculture et de convertir l'outillage (faucheuse, mélangeur de fourrage, etc.) de l'entraînement hydraulique à l'entraînement électrique. L'essai en conditions réelles a pour but d'étudier les potentiels d'économie d'énergie possibles en considérant globalement de telles combinaisons tracteur-appareil dans des fermes produisant leur propre électricité.

➤ Le **rapport final** du projet « Chauffage efficace par pompe à chaleur pour véhicules agricoles et communaux électriques » est disponible sur :

www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=48584

➤ Men Wirz (men.wirz@bfe.admin.ch), responsable du programme pilote et de démonstration de l'OFEN, et Stephan Renz (info@renzconsulting.ch), responsable externe du programme de recherche sur les pompes à chaleur

PROJETS P+D DE L'OFEN

Le projet présenté dans le texte principal a été soutenu par le programme pilote et de démonstration de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Avec ce programme, l'OFEN encourage le développement et l'expérimentation de technologies, de solutions et d'approches innovantes, lesquelles contribuent de manière significative à l'efficacité énergétique ou à l'utilisation des énergies renouvelables. Les demandes d'aide financière peuvent être soumises à tout moment.

➤ www.bfe.admin.ch/pilotdemonstration

et la technique du froid de l'OFEN, communiquent 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 pompes à chaleur et la technique du froid sur le site www.bfe.admin.ch/ec-pac-froid.