

Stefan Wolf, collaborateur scientifique (IER, Université de Stuttgart)  
Roman Flatau, collaborateur scientifique (IER, Université de Stuttgart)  
Peter Radgen, Professeur des Universités, chaire efficacité énergétique (IER, Université de Stuttgart)

## Conditions-cadre pour l'utilisation de pompes à chaleur grande puissance dans l'industrie suisse

*La technologie des pompes à chaleur est encore peu répandue dans l'industrie suisse. De ce fait, l'objet de la présente étude est l'analyse et l'évaluation de la situation actuelle de la technologie des pompes à chaleur et l'identification des facteurs déterminants pour l'utilisation des pompes à chaleur dans l'industrie suisse. A cet effet, une enquête a été réalisée auprès de 42 experts issus des domaines de la technologie des pompes à chaleur, de l'industrie, du conseil en planification et en énergie, de l'économie de l'énergie et des sciences. Les résultats de l'enquête montrent que la grande majorité des experts consultés évaluent positivement l'avenir de la technologie des pompes à chaleur en Suisse. Les priorités retenues en matière de progrès technique sont l'extension de la plage de températures et la réduction des coûts d'investissement. Les principaux facteurs cités comme obstacles sont d'ordre économique. Ce travail fournit une base quantitative pour la définition de stratégies de marché, politiques et de recherche.*

*So far heat pump technology is rarely applied in the Swiss industry. Therefore, this paper evaluates the state of the art of heat pump technology and identifies success factors for the application of heat pumps in the Swiss industry. For this purpose, a survey has been conducted amongst 42 experts in the fields of heat pump technology, industry, planning and consulting, energy sector and science. The analysis of the survey results show that these experts see a rather positive future for heat pump technology in Switzerland. Research and development focus areas are the increase of the temperature range and a decrease in heat pump investment costs. Economic factors are seen as major obstacles for a more widespread application of heat pump technology in the industrial sector. In summary this paper provides a quantitative foundation for the definition of market, policy and research strategies.*

### Motivation

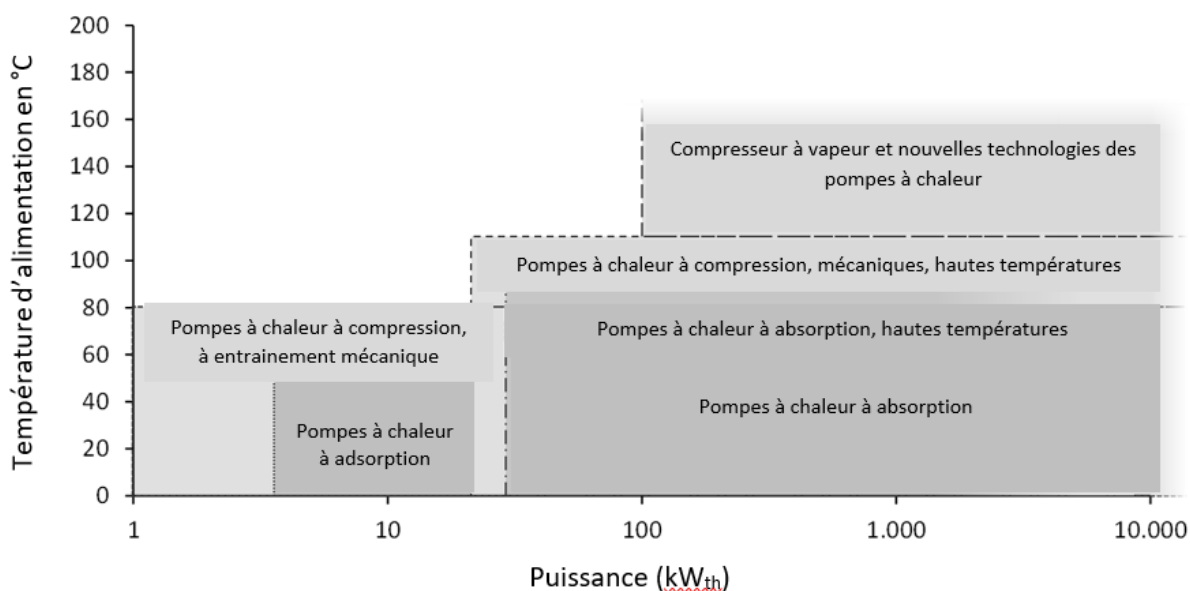
La majeure partie de l'énergie utilisée pour la production industrielle est en dernier lieu transformée en chaleur. Si la température de cette chaleur est trop faible pour pouvoir être directement réutilisée, cette chaleur est évacuée dans l'environnement sous forme de rejets de chaleur (p. ex. tours de refroidissement, refroidissement naturel ou flux d'eau). La technologie de la pompe à chaleur permet de transférer la chaleur d'un fluide vers un deuxième fluide qui, grâce à sa température plus élevée, peut être exploité. En raison de la grande diversité des conditions-cadres techniques, l'utilisation des pompes à chaleur dans l'industrie constitue un défi important [1]. Par conséquent, le but de cette étude est de faire un bilan de la situation actuelle de la technologie des pompes à chaleur et d'examiner les facteurs de réussite indispensables à un déploiement de cette technologie dans l'industrie suisse.

## Situation actuelle de la technologie des pompes à chaleur grande puissance

L'approvisionnement en chaleur et en froid des exploitations industrielles se distingue à bien des égards de celui de la technique du bâtiment. Des installations à forte puissance de chauffe sont requises d'une part, et, d'autre part, la chaleur produite doit être mise à disposition à des températures plus élevées (le plus souvent  $> 80\text{ °C}$ ). Les sources de chaleur disponibles (par exemple eaux usées, refroidissement de machines, procédés industriels) ont également un niveau de température plus élevé.

Les pompes à chaleur fonctionnant en circuit fermé se prêtent particulièrement bien aux applications industrielles. Les pompes à chaleur fonctionnant en circuit ouvert, appelées compresseurs de vapeur, peuvent être utilisées pour la récupération des vapeurs. Il s'agit cependant d'une application spécifique, étant donné que dans ce cas une récupération de chaleur directe par le biais d'échangeurs de chaleur est souvent aussi possible.

Les pompes à chaleur fonctionnant en circuit fermé offrent une grande polyvalence d'utilisation et peuvent aujourd'hui atteindre des températures de condensation allant jusqu'à  $110\text{ °C}$ . En outre, de nouvelles technologies de pompes à chaleur se trouvent au stade de prototype ou de démonstration. Des températures de condensation allant jusqu'à  $160\text{ °C}$  peuvent être atteintes grâce à de nouveaux fluides frigorigènes, processus cycliques et types de compresseurs. En outre, les pompes à chaleur sont disponibles dans un large spectre de puissance, de quelques  $\text{kW}_{\text{th}}$  à plusieurs  $\text{MW}_{\text{th}}$ . Des puissances thermiques encore plus importantes peuvent être générées par le montage en parallèle de plusieurs unités de pompes à chaleur. Ainsi, la technologie des pompes à chaleur disponible satisfait aux exigences des applications industrielles. Le Schéma 1 offre une synthèse de la technologie des pompes à chaleur disponible. Y figurent différents types de pompes à chaleur ainsi que leur spectre de puissance respectif et les températures d'alimentation atteignables.



**Schéma 1: Domaines d'application des différents types de pompes à chaleur [2]**

En raison de leur grande polyvalence d'utilisation ainsi que de leur large spectre de puissances et de températures, les pompes à chaleur à compression à entraînement mécanique et les pompes à chaleur à absorption à entraînement thermique se prêtent à une grande diversité d'applications

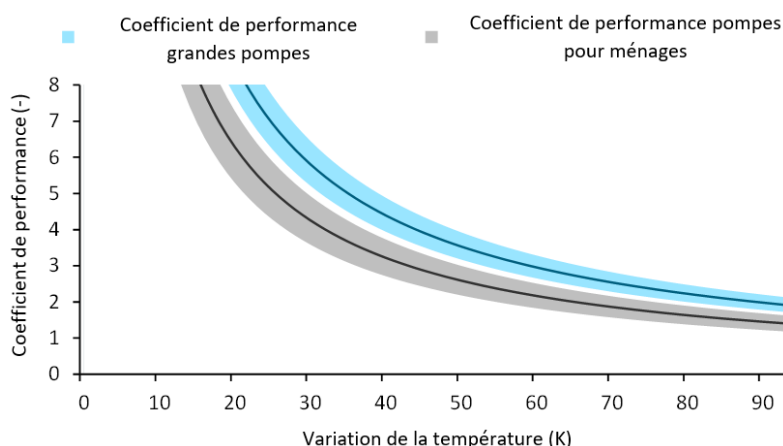
industrielles. Le Tableau 1 présente un aperçu des caractéristiques de ces types de pompes à chaleur.

**Tableau 1: Aperçu des caractéristiques des pompes à chaleur fonctionnant en circuit fermé, à entraînement mécanique et thermique [2]**

Catégorie	Pompes à chaleur à compression à entraînement mécanique	Pompes à chaleur à absorption à entraînement thermique
Propulsion	Moteur électrique/à combustion	Rejets de chaleur, brûleur gaz/pétrole
Puissance thermique nominale	2 kW <sub>th</sub> à 20 MW <sub>th</sub>	25 kW <sub>th</sub> à 20 MW <sub>th</sub>
Température max.	110 °C (160 °C).	90 °C
Différence de température max. par niveau	50 K	50 K
Coefficient de performance pour 40 K de différence de température	3,9 à 4,9	1,2 à 1,5
Durée de vie moyenne	20 ans	18 ans
Investissement, installation incluse (500 kW <sub>th</sub> )	450 à 700 euros/kilowatt <sub>th</sub> 480 à 750 CHF/kW <sub>th</sub>	500 à 800 euros/kilowatt <sub>th</sub> 530 à 850 CHF/kW <sub>th</sub>
Investissement, installation incluse (10 MW <sub>th</sub> )	250 à 400 euros/kilowatt <sub>th</sub> 265 à 425 CHF/kW <sub>th</sub>	300 à 450 euros/kilowatt <sub>th</sub> 320 à 480 CHF/kW <sub>th</sub>

Les pompes à chaleur à compression à entraînement mécanique sont la plupart du temps mues par des moteurs électriques. Une propulsion par moteur à combustion est également possible, mais moins fréquent. Le spectre de puissance varie entre 2 kW<sub>th</sub> et 20 MW<sub>th</sub>. La variation maximale de température par niveau est de 50 K. A cause des caractéristiques particulières du processus supercritique, les pompes à chaleur utilisant le fluide frigorigène R744 (CO<sub>2</sub>) peuvent produire des différences de température plus importantes. La dissipation de chaleur dans l'échangeur thermique de ces pompes à chaleur a lieu avec un important gradient de température en raison de la forte surchauffe dans le domaine supercritique. Par conséquent, tout comme les procédés reposant sur les gaz froids, ces pompes à chaleur se prêtent surtout au réchauffement de fluides présentant de grande différences de température.

Le coefficient de performance de la pompe à chaleur à entraînement mécanique dépend fortement de la différence de température à surmonter. Dans Schéma 2, le coefficient de performance atteignable de la pompe à chaleur à entraînement mécanique est indiqué en fonction de la différence de température. La représentation établit une distinction entre les pompes à chaleur pour les ménages dont la plage de puissance va de 5 à 20 kW<sub>th</sub> et les grandes pompes à chaleur avec plusieurs MW<sub>th</sub> de puissance de chauffage. Un intervalle de confiance est indiqué dans une teinte plus claire. Les coûts d'investissement spécifiques pour les pompes à chaleur à compression électriques se situent entre 250 et 700 euros/kW<sub>th</sub> (265-750 CHF/kW<sub>th</sub>), coûts d'installation inclus.



### **Schéma 2: Coefficients de performance atteignables pour des pompes à chaleur à compression à entraînement mécanique, en fonction de la variation de température [2]**

Les pompes à chaleur à absorption, en particulier celles ayant de grandes puissances de production de chaleur de l'ordre du  $MW_{th}$ , ne sont proposées que par quelques fabricants. Les coefficients de performance sont bien moins élevés que ceux des pompes à chaleur à compression. Si la pompe à chaleur est mue par les rejets de chaleur, ce désavantage en termes d'efficacité ne doit pas être pris en compte. Les coûts d'investissement spécifiques des pompes à chaleur à absorption sont légèrement supérieurs à ceux des pompes à chaleur à compression à entraînement mécanique (voir Tableau 1).

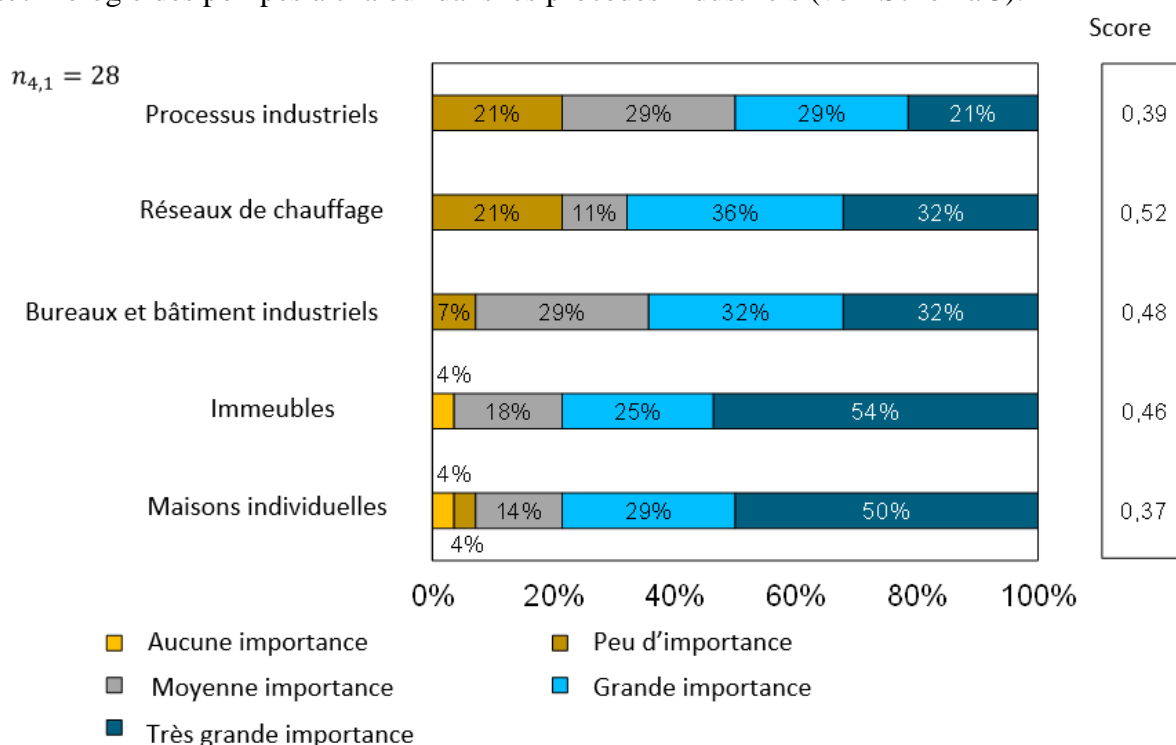
D'ici 2020, on estime que la technologie des pompes à chaleur devrait permettre d'atteindre des températures allant de 130 °C à 160 °C. En outre, des combinaisons de procédés de vapeur froide et de compresseurs de vapeur sont envisageables et susceptibles de produire de la vapeur jusqu'à 200 °C. Viser des températures supérieures ne semble pour le moment pas nécessaire, étant donné que les sources de chaleur présentes dans l'industrie sont généralement à des températures allant de 20 à 60 °C. Une augmentation de la température de condensation entraîne, par conséquent, aussi une augmentation de la différence de température entre la source de chaleur et le dissipateur thermique. Ainsi le coefficient de performance diminue, ce qui a une incidence négative sur l'efficacité, mais également sur les coûts d'exploitation de la pompe à chaleur. En ce qui concerne l'efficacité, il subsiste encore un fort potentiel de progrès au niveau des procédés de pompes à chaleur et de l'amélioration des composants de pompes à chaleur à compression classiques.

## **Conditions-cadres pour les pompes à chaleur industrielles en Suisse**

Une enquête a été menée auprès d'experts, afin d'évaluer les conditions-cadres pour l'utilisation de pompes à chaleur dans l'industrie suisse. Au total 42 experts issus des domaines de la technologie des pompes à chaleur, de l'industrie, du conseil en planification et en énergie, de l'économie de l'énergie et des sciences., ont été contactés par téléphone ou par e-mail. Le taux de réponse s'est élevé à 67 %. 89 % de ces réponses provenaient de la Suisse et les 11 % restant d'entreprises allemandes actives sur le marché suisse. De ce fait, les résultats de l'enquête ne fournissent certes pas une image représentative de la Suisse mais l'enquête résume plutôt les connaissances d'experts et les synthétise sous forme de déclarations fondamentales à prendre en considération dans les conditions-cadres pour les pompes à chaleur industrielles en Suisse. Cette étude permet d'avoir un aperçu des opinions sur la situation actuelle du marché suisse et

sur son évolution future. En outre, les applications possibles des pompes à chaleur dans l'industrie, les obstacles à leur utilisation ainsi que l'actuel besoin en recherche et développement du point de vue des centres de recherche et des fabricants, ont été analysés. L'enquête a été réalisée en novembre et décembre 2016.

Les potentiels d'utilisation de la technologie des pompes à chaleur dans différents secteurs sont actuellement évalués par les experts comme suit : 50 % resp. 54 % estiment que la technologie des pompes à chaleur a une « très grande » importance dans les secteurs des maisons individuelles et des immeubles. 32 % considèrent que la technologie a une « très grande » importance dans les secteurs bureaux et bâtiments industriels ainsi que les réseaux de chauffage. 21 % des participants prêtent un « très grand » potentiel aux pompes à chaleur dans les procédés industriels. Enfin, 50 % des participants voient une « grande » à « très grande » importance de la technologie des pompes à chaleur dans les procédés industriels (voir Schéma 3).



### Schéma 3: Résultats de l'enquête sur l'importance de l'utilisation des pompes à chaleur dans certains secteurs du marché

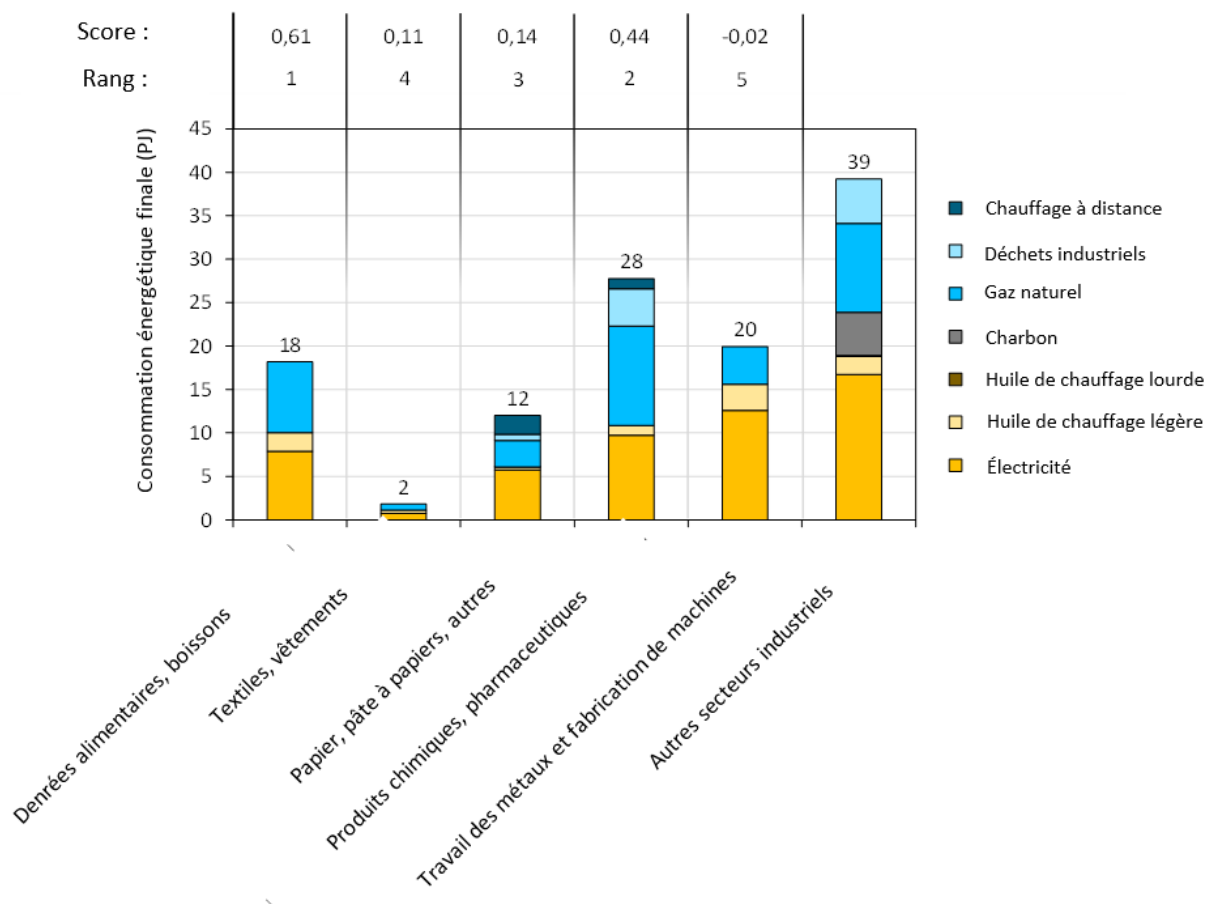
La tendance au cours des cinq prochaines années a été scindée en cinq catégories allant de « forte diminution de l'importance » à « forte augmentation de l'importance ». En quantifiant ces catégories sur une échelle graduée à intervalles de 0.5 allant de -1 (forte diminution de l'importance) à +1 (forte augmentation de l'importance) et en appliquant l'équation 1, on obtient pour chaque catégorie un score ( $S_n$ ) qui indique la perspective de développement dans chaque secteur de marché. Dans l'équation 1,  $n$  est l'unité de mesure (dans ce cas, le secteur de marché),  $k$  la catégorie d'importance,  $P_{n,k}$  le pourcentage de la catégorie d'importance et  $W_k$  le facteur d'évaluation (de -1 à +1). Le résultat est un score qui représente l'évolution du marché attendue sur une échelle allant de -1 à +1. Ce score figure également dans le Schéma 3. Plus le score est élevé, plus les conditions du secteur de marché concerné sont considérées comme favorables.

$$S_n = \sum_{k=1}^5 P_{n,k} \cdot W_k \quad (1)$$

Avec:  $S_n$  Score  
 $n$  Unité de mesure  
 $k$  Catégorie d'importance  
 $P_{n,k}$  Pourcentage de la catégorie d'importance  
 $W_k$  Facteur d'évaluation avec  $W_k \in \{-1, -0.5, 0, 0.5, 1\}$

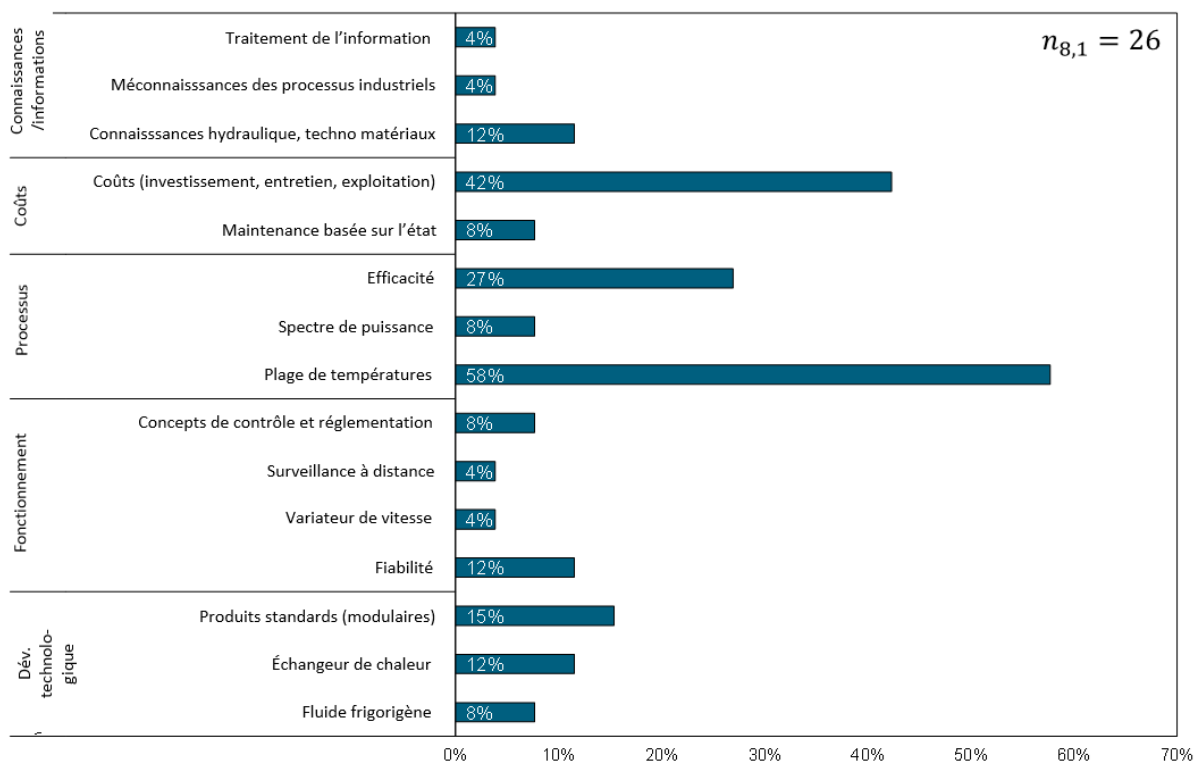
Les scores démontrent que les personnes interrogées prévoient une évolution positive pour tous les secteurs de marché. La plus grande évolution est prévue dans le secteur des réseaux de chauffage. Dans la dynamique de développement, l'industrie est à positionner entre les secteurs immeubles et maisons individuelles.

En outre, il a été demandé d'estimer le potentiel d'application pour les pompes à chaleur dans l'industrie suisse de manière qualitative. À cet effet, il a été demandé aux personnes interrogées d'évaluer le potentiel de la technologie sur une échelle de cinq niveaux allant de « forte diminution de l'importance » à « forte augmentation de l'importance ». Sur la base de ce classement qualitatif, un score a été calculé au moyen de la méthodologie décrite dans l'équation (1), afin d'évaluer le potentiel des pompes à chaleur dans chaque secteur industriel. Le Schéma 4 présente le score et le classement du potentiel qui en résulte sur la consommation énergétique finale de l'industrie suisse. Les données sur la consommation énergétique finale de l'industrie proviennent de statistiques de l'année 2015 [3].



#### **Schéma 4: Potentiel des pompes à chaleur et consommation énergétique finale dans l'industrie suisse**

Dans le cadre de l'enquête ont également été recueillies les opinions sur les avancées requises en termes de recherche pour le développement de la technologie des pompes à chaleur. À cet effet, une distinction a été faite entre les besoins en termes de recherche scientifique et ceux en termes de développement appliqué. Pour les deux catégories, la plage de température des pompes à chaleur a été identifiée comme l'un des principal domaine de recherche (développement: 58 %, recherche: 19 %). Du côté des besoins en termes de développement appliqué, la réduction des coûts d'investissement, d'entretien et d'exploitation a été identifiée comme deuxième thème de recherche principal, avec 42 % (voir Schéma 5). Au métaniveau, les domaines de recherche cités peuvent être ordonnés en cinq catégories comme suit, en fonction de leur part dans le nombre total de réponses: processus (41 %), coûts (22 %), développement technologique (16 %), exploitation (12 %), ainsi que connaissances et informations (9 %).

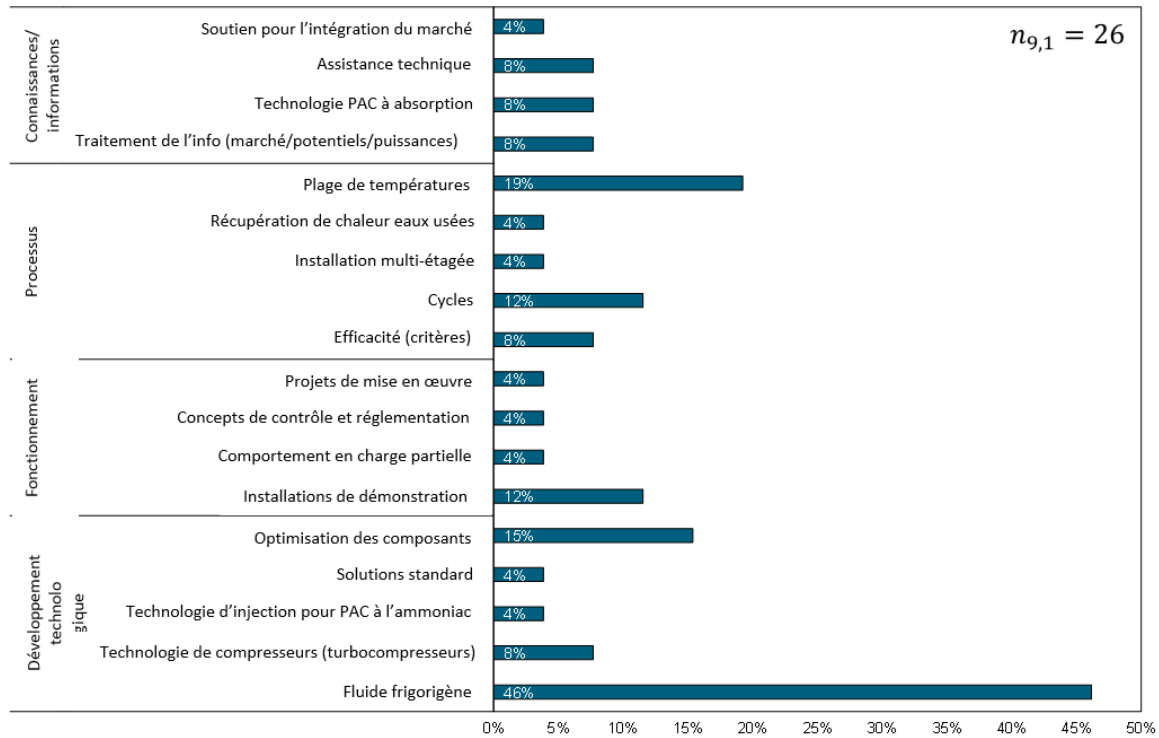


### Schéma 5: Besoins en termes de développement appliqué dans la technologie des pompes à chaleur

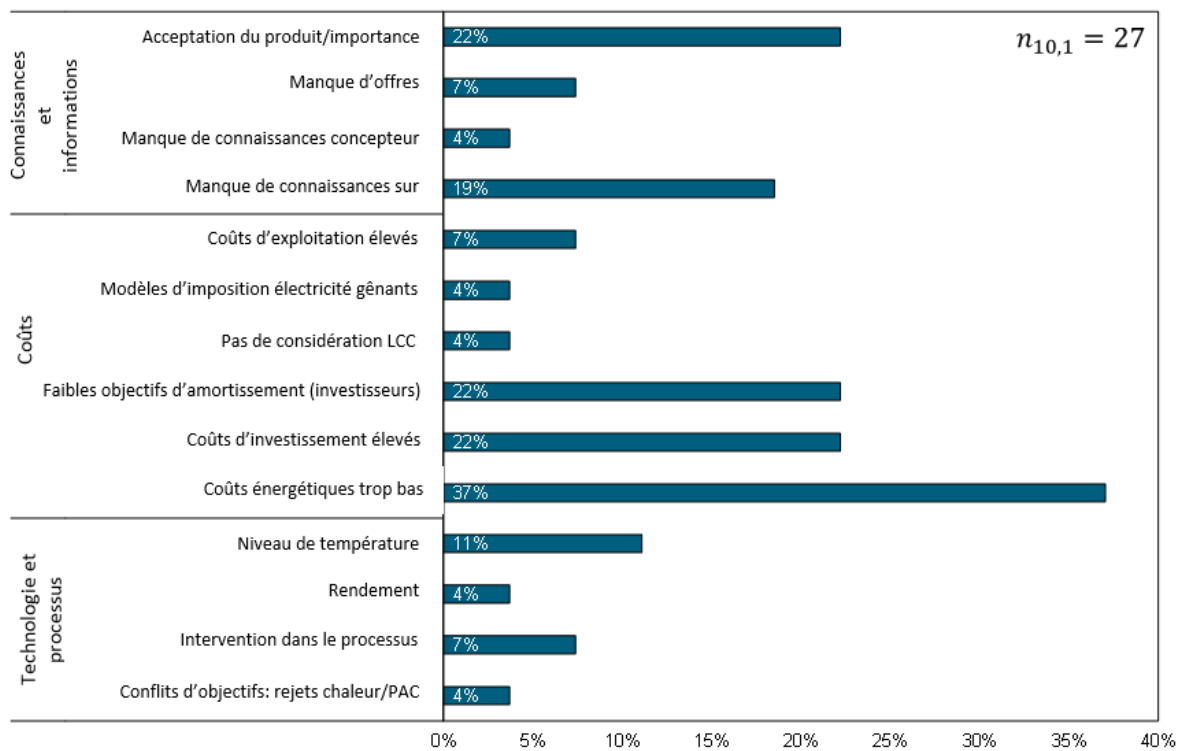
Pour la recherche scientifique, l'évolution des fluides frigorigènes constitue pour 46 % des personnes interrogées le point central, et 15 % considèrent l'amélioration des composants par la recherche/science comme particulièrement importante (voir Schéma 6). On peut classer les besoins en recherche scientifique en quatre catégories, dans l'ordre d'importance décroissant suivant: développement technologique (44 %), processus (27 %), connaissances et informations (16 %) ainsi que exploitation (13 %). L'analyse montre que la nécessité de la recherche pour la réduction des coûts et pour l'utilisation de systèmes de maintenance intelligents (basés sur l'état) sont alloués aux fabricants, tandis que la priorité de la recherche scientifique est vue dans le domaine du développement technologique ainsi que de l'amélioration des procédés.

Les obstacles identifiés par les personnes interrogées peuvent être subdivisés dans les catégories: technologie et processus, coûts ainsi que connaissances et informations. Les prix actuels de l'énergie représentent le plus grand obstacle, avec 37 %, suivis par les fortes attentes à l'égard de la durée d'amortissement, l'acceptation du produit et les investissements élevés (chacun 22 %). L'absence d'acceptation du produit peut être par exemple motivée par un manque d'expertise. Un manque de connaissances sur les possibilités d'utilisation de la technologie des pompes à chaleur dans l'industrie représente pour 19 % un autre obstacle. En outre, il existe une série de réponses spécifiques, par exemple « manque de connaissances du concepteur », « modèles gênants d'imposition de l'électricité », « aucune considération des LCC », « rendement » ainsi que « conflit d'objectif entre utilisation directe des rejets thermiques et pompes à chaleur » (voir Schéma 7). Dans une situation de surplus de rejets thermiques, on peut chercher un client potentiel à l'extérieur de l'exploitation, afin d'éviter le conflit d'objectif entre l'utilisation directe des rejets thermiques et les pompes à chaleur.





**Schéma 6: Avancées scientifiques requises dans la technologie des pompes à chaleur**



**Schéma 7: Obstacles rencontrés lors de l'utilisation des pompes à chaleur dans l'industrie suisse**

## Conclusions

En résumé, la technologie des pompes à chaleur offre une multitude d'utilisations possibles dans l'industrie suisse.. Le potentiel de la technologie est perçu comme étant un peu moins important dans le secteur de l'industrie que dans les autres secteurs du marché (comme par exemple celui des maisons individuelles). La majorité des experts interrogés, soit 55 %, prévoit cependant un développement positif du marché des pompes à chaleur dans l'industrie. L'analyse de l'état actuel de la technologie des pompes à chaleur et des possibilités d'application dans l'industrie a montré que les pompes à chaleur actuellement disponibles peuvent déjà couvrir une multitude de cas d'application. Jusqu'en 2020, on s'attend à une nouvelle augmentation des températures atteignables à 130°C, peut-être même à 160 °C. Il serait ainsi possible d'utiliser les pompes à chaleur pour la production de vapeur, ce qui ouvrirait de nouvelles perspectives pour l'industrie du papier et de la chimie. Il convient également de noter que, pour toutes les utilisations possibles, l'intégration de pompes à chaleur contribue à optimiser le système global. La rentabilité de l'utilisation des pompes à chaleur constitue le principal obstacle à une diffusion accélérée de la technologie des pompes à chaleur dans le secteur industriel. Il s'agit, d'une part, pour les grandes pompes à chaleur de fabrications spécifiques individuelles ou de produits fabriqués en très petites séries. En produisant en plus grandes séries, des gains de productivité pourraient être réalisés grâce aux économies d'échelle. Une piste permettant d'aller dans ce sens serait une plus forte modularisation de la production. Certaines pièces du circuit de refroidissement ou de l'intégration hydraulique pourraient ainsi être fabriquées en plus grandes séries. Dans la mesure où l'espace de montage sur place est suffisant, l'on peut envisager de connecter plusieurs pompes à chaleur de taille standard et les faire fonctionner comme une seule grande installation de pompe à chaleur. En outre, les attentes en termes de rentabilité des investissements dans l'industrie sont élevées (période d'amortissement < 2 ans). Étant donné que l'amortissement ne tient compte que du temps de retour du capital investi et néglige les bénéfices futurs réalisés au-delà de cette période, cet indicateur est essentiellement pertinent pour des investissements risqués à court terme. Le taux de rendement interne ou l'analyse du Total Cost of Ownership (TCO) prennent en compte les bénéfices futurs et se prêtent donc mieux à l'évaluation d'investissements à long terme. En outre, il existe également des moyens politiques pour intervenir sur le marché, soit des aides financières (par exemple, subventions aux investissements, exonération d'impôts et de taxes) ou des interventions de l'État (par exemple, objectifs contraignants en matière d'efficacité, White Certificates).

Un autre obstacle à la diffusion de la technologie des pompes à chaleur dans l'industrie est le manque d'informations disponibles sur les possibilités d'utilisation, la planification et l'exploitation industrielle des installations de pompe à chaleur. Les moyens pour y remédier sont l'élaboration de directives, de programmes de formation pour les planificateurs d'installation et les conseillers en énergie, et la mise à disposition de supports d'information sur une plate-forme Internet. La mise en œuvre de projets de monitoring documentés permet de renforcer la confiance à l'égard de la technologie.

Même si la technologie actuelle des pompes à chaleur est susceptible de couvrir déjà de nombreux cas d'applications, il manque encore des solutions techniques pour certains secteurs industriels. Cela vaut en particulier pour l'élargissement du spectre de températures qui est directement lié au besoin en nouveaux fluides frigorigènes. Dans le cadre de fluides frigorigènes naturels, des températures plus élevées ne peuvent être atteintes que par le développement de compresseurs fonctionnant à très hautes pressions (> 80 bar), ou par l'introduction de nouveaux procédés de pompes à chaleur (pompes à chaleur rotatives, pompes à chaleur thermoacoustiques). Cependant, des fluides frigorigènes tels que le R1336mzz-Z (GWP 9,4) ou le Novec

649 (GWP 1), dont les substances présentent un risque insignifiant pour le réchauffement planétaire, pourraient aussi être exploités pour les pompes à chaleur grande puissance.

En conclusion, la technologie des pompes à chaleur devrait acquérir une importance croissante dans l'industrie suisse dans les années à venir. La mise sur le marché de nouvelles pompes à chaleur à haute température qui, pour certaines, pourront atteindre des températures allant de 130 °C à 160 °C devrait accentuer ce phénomène. Par ailleurs, l'utilisation de la technologie des pompes à chaleur est promue par une tendance générale à la décarbonisation de l'approvisionnement énergétique. En raison des faibles émissions de CO<sub>2</sub> spécifiques du mix électrique suisse, la technologie des pompes à chaleur à entraînement électrique est particulièrement appropriée pour soutenir cette tendance.

Les travaux présentés dans le cadre de cette étude ont été financés par l'Office fédéral de l'énergie. Le rapport final sur le projet ainsi qu'une traduction française du présent dossier de conférence comme résumé sont disponibles sur le site Internet SuisseEnergie et sur la page d'accueil de l'OFEN sous la rubrique chaleur ambiante.

[www.energieschweiz.ch](http://www.energieschweiz.ch)

[www.bfe.admin.ch/themen/00490/00502/index.html?lang=fr&dossier\\_id=03725](http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00502/index.html?lang=fr&dossier_id=03725)

### Sources:

- [1] Wolf S., Fahl U., Blesl M., Voß A. u. Jakobs R.: Analyse des Potenzials von Industrierärmepumpen in Deutschland (Analyse du potentiel des pompes à chaleur industrielles en Allemagne) Forschungsbericht (Rapport de recherche), FKZ 0327514A. Stuttgart. 2014
- [2] Wolf S., Flatau R., Radgen P., Blesl M.: Systematische Anwendung von Großwärmepumpen in der Schweizer Industrie (Utilisation systématique de pompes à chaleur dans l'industrie suisse). Abschlußbericht (Rapport final). Office fédéral de l'énergie (OFEN), Ittigen. 2017
- [3] Sauvini L., Scherer R., Ferster M., Sterzel J. G. und Muff S.: Energieverbrauch in der Industrie und im Dienstleistungssektor (Consommation d'énergie dans l'industrie et dans le secteur des services) Résultats de 2015. Berne. 2016