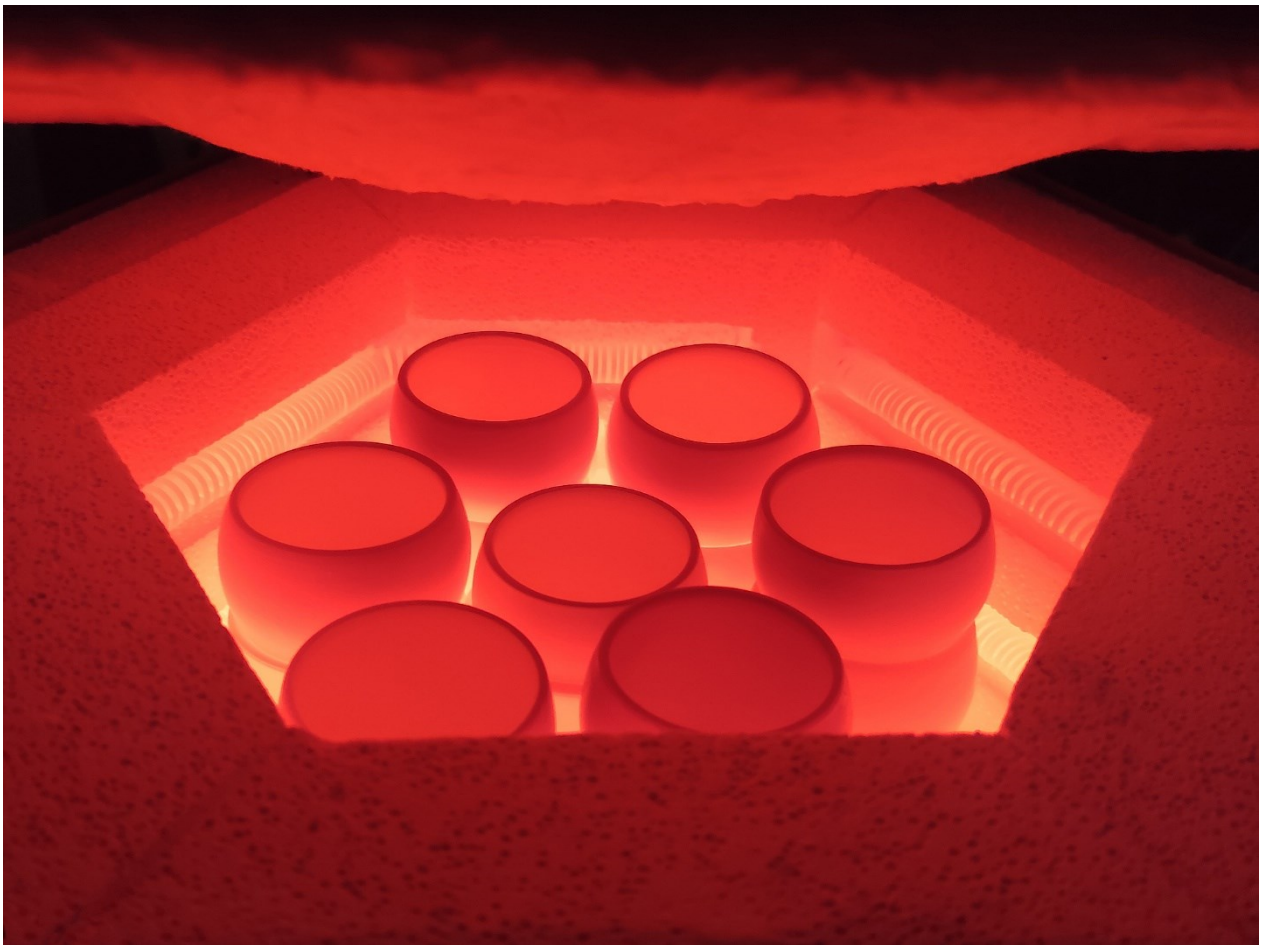


Rapport final, mars 2025

Potentiel de décarbonation de la chaleur industrielle à haute température grâce à l'électrification en Suisse



© iStock-1301402497

Auteurs

Dr Kirsten Kubin

Paurnima Kulkarni

Saskia Lengning

Dr Fabian Muralter

Dr Alexander Piégas (chef de projet)

Dr Noha Saad

Aurel Wunsch

Numéro du projet

B101411

La présente étude a été élaborée pour le compte de SuisseEnergie.
La responsabilité du contenu incombe exclusivement aux auteurs.

1. Aperçu de l'entreprise Prognos

Afin de prendre aujourd'hui les bonnes décisions pour demain, il faut disposer de bases solides. Telle est la mission de Prognos : fournir des informations impartiales, concrètes et scientifiquement fondées. Depuis 1959, nous élaborons des analyses pour des entreprises, des associations, des fondations et des autorités publiques. Nous œuvrons côte à côte avec nos clients, afin de leur offrir la marge de manœuvre nécessaire pour relever les nouveaux défis. Nos piliers : recherche, conseil et suivi. Les modèles éprouvés de Prognos AG constituent le fondement de prévisions et de scénarios fiables. Forte d'environ 180 experts, l'entreprise compte neuf sites : Bâle, Berlin, Brême, Bruxelles, Düsseldorf, Fribourg, Hambourg, Munich et Stuttgart. Les équipes de projet travaillent de manière interdisciplinaire, reliant théorie et pratique, science, économie et politique. Notre objectif est toujours le même : vous donner une longueur d'avance, en matière de connaissances, de temps et face à la concurrence.

2. Aperçu et conclusion

2.1 Motivation

Début 2023, l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) a publié la « Stratégie Chaleur 2050 » [OFEN 2023], dont l'objectif est de rendre le secteur de la chaleur neutre en CO₂ d'ici 2050. Elle s'appuie sur les Perspectives énergétiques 2050+ de l'OFEN élaborées en 2021 [OFEN 2021]. Une décarbonation complète de l'ensemble du secteur de la chaleur est une condition essentielle pour atteindre l'objectif de zéro émission nette de CO₂ d'ici 2050 en Suisse. Il est donc essentiel de pouvoir produire de la chaleur, que ce soit pour le chauffage ou la chaleur industrielle, sans avoir recours aux énergies fossiles.

Des alternatives aux combustibles fossiles existent déjà aujourd'hui et un grand nombre sont disponibles sur le marché. Les pompes à chaleur les plus modernes peuvent atteindre des températures allant jusqu'à 200 °C et utilisent à cet effet des sources de rejet de chaleur existantes ou des sources de chaleur issues de l'environnement. L'énergie solaire thermique transforme directement la radiation solaire en chaleur utile pouvant atteindre 140 °C, voire 400 °C dans le cas de l'énergie solaire thermique à concentration. Dans de nombreux cas, le remplacement des agents énergétiques fossiles constitue un défi. Le recours au biométhane, à l'hydrogène et à d'autres combustibles synthétiques représente une alternative aux combustibles fossiles utilisés aujourd'hui. Cela permettrait de minimiser la nécessaire adaptation des installations et d'utiliser en partie les infrastructures existantes (par exemple le réseau de gaz). Bien qu'une électrification directe soit, en théorie, réalisable sur le plan technique pour la plupart des processus, elle nécessite souvent des modifications importantes des installations et des procédés de production. Par ailleurs, il faut s'attendre à des conséquences pour le système électrique si des sites de production électrifient massivement leur chaleur à haute température. La présente étude se concentre sur l'examen de l'électrification de la chaleur industrielle à haute température ainsi que de la production de vapeur. Elle vise à identifier le potentiel, les avantages et les risques de l'électrification de la chaleur à haute température dans l'industrie suisse.

2.2 Résumé

Le chapitre 2 dresse un état des lieux de la chaleur industrielle à haute température dans l'industrie suisse et la définit comme une chaleur industrielle égale ou supérieure à 400 °C. Sur la base du modèle industriel de Prognos, il a été calculé que les 19 procédés décrits dans l'industrie ont consommé en moyenne entre 2015 et 2023 un total de 151 PJ / 42 TWh, dont 85 PJ / 24 TWh (56 %) pour la chaleur industrielle. Sur ces 85 PJ / 24 TWh, 53 PJ / 15 TWh (62 %) sont imputables à la chaleur industrielle à haute température, les combustibles représentant quant à eux 45 PJ / 13 TWh (85 %) de ces 53 PJ / 15 TWh. Les procédés de chaleur industrielle à haute température émettent 2300 kt d'éq.-CO₂, soit 57 % des 4050 kt d'éq.-CO₂ émises par le secteur industriel lors de la combustion de combustibles fossiles. Afin de valider les hypothèses de modélisation, les distributions relatives des volumes de chaleur industrielle spécifiques

à chaque branche à des niveaux de température définis sont également comparées à celles issues de la littérature existante.

Le chapitre 3 montre les technologies présentant selon les sources examinées un potentiel important ou non pour l'électrification de la chaleur industrielle à haute température. Des fiches signalétiques techniques détaillées se trouvent en annexe. L'effet (maximal) de cette électrification est déterminé à l'aide d'un scénario « business as usual » et d'un autre basé sur une électrification maximale de la chaleur industrielle à haute température et de la production de vapeur, sous réserve de la faisabilité technique et des cycles d'investissement : augmentation de la consommation d'électricité d'environ 20 PJ / 6 TWh (+ 40 %) et diminution de la consommation de combustible (à l'exception de la chaleur renouvelable et de réseau) de 27 PJ / 8 TWh (- 44 %) et des émissions de gaz à effet de serre de 1200 kt d'éq.-CO₂ (- 54 %). L'électrification de la chaleur industrielle à haute température et de la production de vapeur contribuent environ pour moitié à la réduction des GES.

Dans le cadre de l'étude, des entretiens avec des experts ont été réalisés, afin d'évaluer qualitativement les options possibles d'électrification de la chaleur industrielle à haute température. Ils sont résumés à la fin du deuxième chapitre. Les entreprises soulignent les impondérables liés à l'électrification, comme la sécurité de l'approvisionnement en énergie et en électricité, l'influence sur les prix de l'électricité et les coûts du capital, ainsi que les obstacles comme les émissions générées par les procédés qui subsistent même après l'électrification et l'absence de programmes d'encouragement. Par conséquent, les entreprises n'ont actuellement aucun plan concret de mise en œuvre pour électrifier la chaleur industrielle à haute température.

Le chapitre 4 décrit les conséquences d'une électrification complète de la chaleur industrielle à haute température et de la production de vapeur pour le système électrique suisse. L'électrification de la chaleur industrielle à haute température a un faible impact sur le système électrique, mais elle augmente la dépendance à l'égard des importations. D'un point de vue politique et social, il peut être souhaitable de compenser les besoins supplémentaires par des capacités de production indigènes, afin d'accroître la résilience. Une mesure plus rentable pour garantir le même niveau de sécurité d'approvisionnement et d'indépendance est de flexibiliser les besoins supplémentaires en électricité : en cas de congestion, les besoins pourraient être reportés à plus tard ou des installations bivalentes pourraient recourir à des sources d'énergie stockables.

Le chapitre 5 donne une vue d'ensemble de toutes les lois et de tous les programmes d'encouragement importants pour les entreprises au niveau fédéral et régional, ainsi que de leur lien avec l'électrification. Les programmes existants offrent aux entreprises de multiples possibilités de soutien pour améliorer leur efficacité énergétique, réduire la consommation d'électricité et mettre en place des méthodes de production plus durables, notamment électrifiées. Il n'existe pas d'encouragement ciblé de l'électrification de la chaleur industrielle.

Une stratégie globale cohérente pour la décarbonation de la chaleur industrielle est également décrite à l'aide d'un modèle à quatre niveaux : l'augmentation de l'efficacité énergétique et exergétique est prioritaire. L'exploitation de sources de chaleur renouvelables comme l'énergie solaire thermique ou la géothermie arrive en deuxième place. Viennent ensuite des technologies alternatives pour la fourniture de chaleur industrielle, notamment l'électrification (directe). L'utilisation d'autres combustibles, comme la biomasse, les déchets ou les agents énergétiques synthétiques (PtX), ou encore le captage de carbone dans certaines branches, constitue la quatrième et dernière option.

D'un point de vue technique et systémique, la production de vapeur à l'aide d'une pompe à chaleur à compression ou d'une chaudière à électrodes pourrait remplacer complètement la production de vapeur conventionnelle avant 2045. Cela s'explique par la grande capacité d'intégration de ces deux technologies dans les infrastructures de production de vapeur existantes. Concernant l'industrie du verre, la métallurgie (tous les métaux), le génie mécanique et le bâtiment, l'électrification de la chaleur industrielle à haute température est également probable sur le plan technique d'ici 2045. Cela est dû à ses avantages (meilleure efficacité énergétique et régulation, aucun gaz d'échappement) et à la préférence supposée pour une électrification directe plutôt que pour d'autres combustibles. En revanche, l'industrie du ciment présente des émissions de CO₂ élevées en raison de la calcination du calcaire. L'électrification directe ne constitue donc pas une option pour la décarbonation complète des procédés de production. L'utilisation accrue de combustibles secondaires en combinaison avec le captage de carbone est plus probable.

2.3 Conclusion

La modélisation a permis d'identifier des technologies d'électrification qui, d'un point de vue technique et systémique, promettent d'être un levier important pour la décarbonation des procédés de production dans l'industrie suisse. Dans l'ensemble, une utilisation à grande échelle de ces technologies peut permettre de réduire les émissions de GES d'environ 1,2 Mt d'éq.-CO₂ dans l'industrie suisse.

Des technologies d'électrification pertinentes sont les pompes à chaleur (à haute température) et les chaudières à électrodes pour la production de vapeur dans les branches de l'alimentation, du papier et de la chimie/pharmacie, le chauffage à résistance direct et indirect pour la fabrication du verre, ainsi que les fours à induction à courant alternatif et le chauffage à résistance indirect pour toutes les branches de la métallurgie (fer/acier, aluminium, cuivre).

Les conséquences d'une électrification de la chaleur industrielle à haute température pour le système électrique sont minimales. La dépendance à l'égard des importations peut toutefois augmenter si des capacités supplémentaires de production d'électricité ne sont pas créées au niveau national. Une flexibilisation des besoins en électricité de l'industrie peut contribuer à stabiliser le réseau.

Les programmes d'encouragement existants ne ciblent pas vraiment une électrification directe des procédés de production. Les instruments prévus dans le cadre de la loi sur le climat et l'innovation doivent combler cette lacune du dispositif d'encouragement. Un tel encouragement technologique vise à soutenir de premières installations et leur intégration au niveau des modes de production existants, afin de promouvoir une utilisation généralisée de ces technologies.

Les programmes déjà mis en place dans d'autres pays en vue d'électrifier la chaleur industrielle fournissent des modèles de stratégies d'encouragement. Il est recommandé de comparer le type et la conception des instruments, l'objet de l'encouragement, les volumes et les conditions de financement ainsi que les évaluations des conséquences (si elles existent), afin de déterminer une forme d'encouragement adaptée à la situation en Suisse.

L'approche en matière d'encouragement devrait tenir compte non seulement des CAPEX, mais aussi des OPEX. Ces derniers constituent un obstacle majeur au passage aux technologies d'électrification, car d'une manière générale, le rapport entre le prix de l'électricité et celui du gaz, en relation avec l'amélioration de l'efficacité, est déterminant pour la rentabilité d'une installation électrique. Un renforcement des lois existantes (LCl, LEne, loi sur le CO₂, etc.) serait également judicieux.