

L'industrie lourde consomme environ 30 % de l'énergie mondiale finale, dont la majorité sous la forme de chaleur à haute température. Une part de cette énergie est aujourd'hui rejetée sans valorisation : fumées de fours, gaz de procédé et parois rayonnantes libèrent une chaleur fatale souvent supérieure à 400°C. Le relevage thermique à haute température (RTHT) pourrait être une solution permettant de revaloriser en cycle fermé cette chaleur industrielle, que les récupérateurs classiques ne peuvent réintroduire dans le procédé. À plus long terme, les réacteurs nucléaires modulaires de type SMR (températures de sortie ~300°C), et AMR à haute température (>500°C), pourraient fournir une chaleur bas-carbone aux procédés industriels, et viser des applications à plus haute température grâce au RTHT.

Les pompes à chaleur à compression de vapeur plafonnent à 200-250°C, en raison des limites thermiques des fluides frigorigènes et des lubrifiants. Au-delà, le coefficient de performance (COP, le rapport entre chaleur fournie et énergie électrique consommée) baisse significativement et n'est plus rentable. Pour franchir cette frontière, plusieurs voies technologiques sont à l'étude.

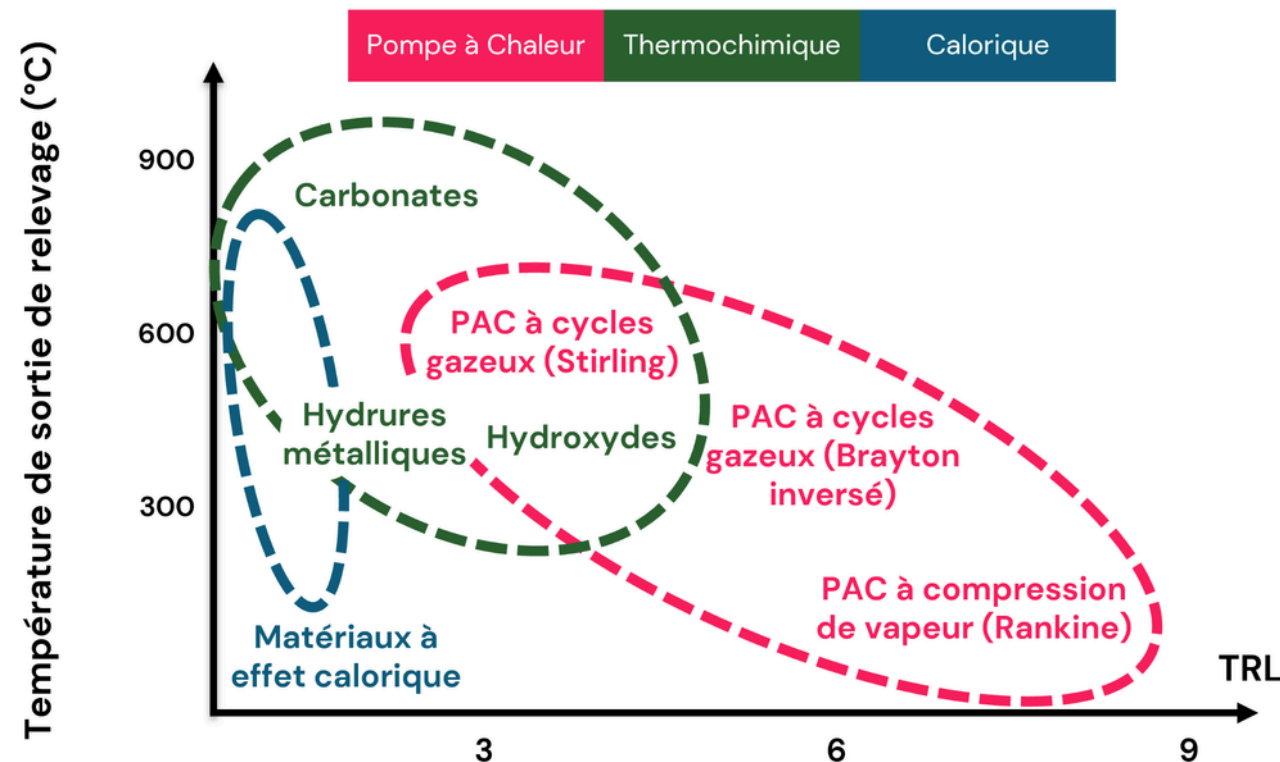


Figure – Principales voies technologiques pour relever la chaleur industrielle HT de ~100°C (sur la base des données de Yoo et al., 2023)

La première, à l'instar des pompes à chaleurs, exploite le cycle de Brayton inversé mais en remplaçant le fluide frigorigène par un gaz inerte (air, hélium, CO2 supercritique) qui ne change pas d'état (TRL 4-6). On s'affranchit ainsi des limites chimiques des réfrigérants. Ce cycle devient plus performant que la compression de vapeur dès 215°C de température de sortie et peut, théoriquement, atteindre 1 000°C. Ses points communs avec les AMR à gaz à haute température, qui peuvent utiliser l'hélium comme caloporteur, la rendrait compatible avec les projets de couplage nucléaire-industrie.

La deuxième voie repose sur des réactions chimiques réversibles (évoqués dans notre décryptage sur le stockage thermochimique) : déshydratation et réhydratation d'oxydes métalliques comme l'oxyde de calcium, ou cycles de carbonatation (TRL 3-5). L'intérêt de ces composés est de pouvoir restituer une chaleur à une température plus élevée que celle qui les a rechargés. Des sorties entre 500°C et 800°C seraient ainsi accessibles à partir de sources à 300-400°C. Ce relevage, purement thermique, permettrait de valoriser une chaleur fatale sans connexion électrique puissante.

La troisième voie, au stade de la recherche, mobilise des matériaux à effet calorifique (électrocaloriques, magnétocaloriques) qui changent de température sous l'effet d'un champ extérieur, sans fluide ni pièce mobile (TRL 2-3). La première simulation d'une telle pompe à chaleur opérant entre 360 °C et 420 °C obtint un COP simulé de 2,7. Ces technologies visent à terme des températures jusqu'à 1 300°C.

L'intérêt de ces voies de relevage est d'avoir un COP dépassant 1, ce qui signifie qu'elles sont plus efficaces qu'un chauffage électrique direct (résistances, induction), dont la conversion électricité-chaleur (COP) est plafonnée à 1. Cet avantage thermodynamique s'amenuise à mesure que la température de sortie monte et que les écarts à franchir s'élargissent. Pour un relevage de 300-400°C vers des températures supérieures à 600-800°C, le COP des technologies disponibles approcherait ainsi difficilement 1,5.

À ces niveaux, le chauffage électrique direct, plus simple et mature (TRL 7-9), et déjà déployé industriellement, demeure compétitif, non pas en efficacité énergétique, mais en coût, en fiabilité et en horizon de déploiement. La pertinence du RTHT par rapport au chauffage direct est donc une question de contexte industriel : disponibilité de l'électricité, coût du kWh, existence d'une source de chaleur fatale exploitable, et amplitude de l'écart de température à franchir.