

Préface

Philippe MARTY

LEGI, CNRS, Grenoble INP, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France

Stocker la chaleur a toujours été une préoccupation : lorsque les hommes préhistoriques chauffaient une pierre dans le feu afin de l'immerger ultérieurement dans un morceau de bois évidé et rempli d'eau pour cuire leur nourriture, n'étaient-ils pas en train de réaliser une première expérience de stockage de la chaleur ? Les Perses, quant à eux, stockaient de la glace en plein désert dans des constructions en forme de dôme munies d'épais murs d'argile.

Aujourd'hui, la question du stockage est au centre des débats sur le développement des énergies renouvelables. Il est admis qu'un développement massif de ces énergies doit être couplé à d'importantes possibilités de stockage pour faire face à l'irrégularité du vent ou de l'ensoleillement. Dans l'industrie, nombre de procédés rejettent une chaleur fatale qui n'est pas valorisée. Une étude de l'ADEME indique que près de 100 TWh de chaleur fatale inexploitée sont rejetés chaque année, chiffre correspondant à environ un tiers des besoins de ce secteur. Dans les bâtiments, les méthodes de stockage de chaleur actuellement développées sont essentiellement basées sur une accumulation d'eau dans des ballons.

Concernant le réseau électrique national, la solution massive la plus couramment mise en œuvre consiste à remonter de l'eau en altitude afin de la turbiner ultérieurement. Une STEP (station de transfert d'énergie par pompage) stocke donc de l'énergie électrique sous forme gravitaire. Cette technologie ne sera pas

abordée dans ces ouvrages. Il en est de même du stockage électrochimique sur batteries ou des techniques basées sur le vecteur hydrogène qui font l'objet d'autres ouvrages de l'encyclopédie SCIENCES.

Les deux volumes que nous présentons aujourd'hui ont été rédigés par des experts européens reconnus dans le domaine du stockage thermique et des matériaux associés à ce domaine. Ils sont exclusivement dédiés au stockage de chaleur et de froid en considérant de manière exhaustive toutes les solutions physiques et techniques envisageables. C'est ainsi que seront développées les méthodes de stockage par chaleur sensible, dans lesquelles la température d'un corps est modifiée pour stocker ou restituer de l'énergie. La technique mettant en œuvre un changement de phase sera également présentée en détail. Le stockage thermochimique ou par sorption, extrêmement prometteur du fait de sa plus grande densité volumique fera l'objet d'un volume à part.

Le volume 1, *Stockage de la chaleur et du froid 1 : stockage sensible et latent* se consacre uniquement à ces deux types de transferts d'énergie. L'état de l'art sur les applications classiques du stockage pour le bâtiment est rappelé et une attention particulière est consacrée au stockage de longue durée. Effectivement, dans un pays où l'ensoleillement n'est pas garanti chaque jour, l'autonomie énergétique d'un bâtiment passe par la possibilité d'un stockage de long terme également appelé intersaisonnier. Le stockage souterrain offre à cet égard des possibilités qui seront passées en revue.

Le stockage de l'électricité sous forme de chaleur est étudié dans la présentation d'un nouveau procédé à haute température. Cette technologie prometteuse est envisagée pour des installations de très grande puissance et peut être vue comme une alternative aux STEP ou à l'utilisation du vecteur hydrogène comme solution de stockage temporaire de l'électricité.

Les matériaux à changement de phase (MCP) sont une alternative attirante lorsque les différences de température entre le matériau de stockage et le milieu externe deviennent trop faibles. Rappelons que le principe consiste à jouer sur la transition de phase, le plus souvent solide-liquide, pour accumuler ou restituer la chaleur échangée sous forme latente. La grande valeur de l'enthalpie de changement de phase de certains matériaux, comparée à leur capacité calorifique, permet ainsi d'augmenter la densité volumique de stockage. Une présentation détaillée des matériaux disponibles est proposée. Les MCP ont rapidement vu naître une très vaste gamme d'applications aussi bien pour le stockage de la

chaleur que du froid. On les retrouve par exemple dans les coulis de glace sous forme de matériaux encapsulés. La préparation par micro- ou nano-encapsulation, ainsi que l'imprégnation de milieux poreux, est un enjeu immense mettant en œuvre des techniques délicates qui sont présentées en détail dans le volume 1. En plus d'une grande stabilité mécanique et chimique, les matériaux synthétisés doivent avoir une conductivité thermique suffisante pour garantir des temps de transferts d'énergie raisonnables. Cette exigence amène à l'incorporation de matériaux très conducteurs dans le MCP afin d'en améliorer les performances. Les applications à l'industrie et au bâtiment de ces matériaux font l'objet d'un chapitre complet (chapitre 8), incluant le cas particulier du stockage intégré dans les centrales solaires.

Le stockage du froid est essentiel dans bon nombre d'applications notamment alimentaires. Parmi les solutions performantes, le stockage sur hydrates est une piste d'avenir qui fera l'objet d'un chapitre particulier (chapitre 7).

Le cas particulièrement prometteur des centrales solaires thermodynamiques est également abordé dans le chapitre 8. Bien que les centrales actuelles mettent en œuvre essentiellement des sels fondus, donc basés sur le principe d'un stockage sensible, de futurs développements de systèmes latents et thermo-chimiques sont présentés.

Le volume 2 s'intitule *Stockage de la chaleur et du froid 2 : stockage thermo-chimique*. De même que le stockage électrochimique est capable de stocker de l'énergie électrique de manière durable, le stockage thermo-chimique ou par sorption, est capable de stocker de la chaleur ou du froid sur une durée *a priori* infinie. Contrairement au stockage sensible ou latent, cette caractéristique justifie l'attrait immense des énergéticiens pour cette technique qui présente de plus une très forte densité énergétique volumique pouvant atteindre plusieurs centaines de kWh/m³. Cette méthode de stockage sous forme de potentiel chimique de l'énergie comporte deux classes distinctes, selon que le phénomène en jeu est physique (forces de van der Waals) ou chimique (liaisons de covalences).

Ce volume introduit d'abord les principes de la sorption de manière très pédagogique et définit les critères de sélection des matériaux à mettre en œuvre. Vient ensuite une description détaillée du fonctionnement d'un cycle à absorption qui pointera les enjeux futurs de cette méthode. Développer de nouveaux concepts d'échangeurs réacteurs, imaginer de nouveaux cycles, mettre en œuvre

de nouveaux matériaux, tels sont les challenges des chercheurs et industriels qui travaillent aujourd'hui dans ce domaine.

Une place particulière est offerte aux procédés par adsorption : après un rappel des fondements de ce phénomène et une description minutieuse des cycles et systèmes à adsorption solide-gaz, de nombreux exemples d'installations prototypes sont présentés.

Ces deux ouvrages sont à destination de plusieurs communautés : les chercheurs y trouveront une synthèse des avancées des diverses universités sur le thème du stockage tandis que les enseignants y trouveront une présentation pédagogique des procédés mis en œuvre. Les ingénieurs des centres de recherche y verront quels sont les enjeux technologiques actuels. Tant de secteurs restent à améliorer : matériaux et techniques de fabrication ou de caractérisation associées, appareillages, échangeurs thermiques, nouveaux cycles, etc.