



SEMAINE 8 : LE MIX ÉNERGÉTIQUE

Ce document contient les transcriptions textuelles des vidéos proposées dans la partie « Le stockage thermique de l'énergie » de la semaine 8 du MOOC « Énergies renouvelables ». Ce n'est donc pas un cours écrit au sens propre du terme ; le choix des mots, l'articulation des idées et l'absence de chapitrage sont propres aux interventions orales des auteurs.

La chaleur sensible

Xavier PY

Professeur – Université de Perpignan Via Domitia

Alors, le stockage de l'énergie thermique sous forme de chaleur sensible est certainement le mode de stockage d'énergie le plus simple et le plus ancien. Alors il est particulièrement utilisé au niveau des énergies renouvelables qui sont à la base sous forme thermique, alors soit la biomasse lors d'une combustion, soit le solaire une fois qu'on a converti le rayonnement solaire en chaleur et dans ce cas-là, et bien on va stocker effectivement cette chaleur en chaleur sensible, c'est-à-dire en faisant varier la température d'une certaine masse de matériaux, une certaine quantité de matière sans qu'il y ait de changement de structure ou de réactions chimiques.

Alors, ça concerne essentiellement pour les énergies renouvelables la biomasse et le solaire, et le principe même de ce stockage est tel que la quantité d'énergie que l'on va stocker est directement proportionnelle à la quantité de matières utilisées, à la différence de température entre la phase de stockage et de déstockage et est directement proportionnelle à la capacité intrinsèque du système de la matière à stocker l'énergie, ce que l'on appelle le CP du matériau, sa capacité calorifique.

- Alors c'est un mode de stockage extrêmement ancien puisque l'on peut remonter au paléolithique.

- Les hommes préhistoriques utilisaient déjà ce mode de stockage pour gérer des problèmes effectivement énergétiques liés à la biomasse.
- ⇒ Alors, un exemple très simple, dans certains pays, dans certaines contrées, les hommes préhistoriques n'avaient que des combustibles très rapides comme la paille et ils devaient quelquefois faire des cuissons très longues pour convertir certains aliments sur le plan nutritionnel en nutriments qui soient acceptables par l'organisme. Donc quelquefois des cuissons de plusieurs heures et des combustibles très rapides.
- ⇒ Dans ce cas-là, ils rajoutaient dans les foyers du paléolithique des galets ou des roches qui stockaient la chaleur, ils brûlaient énormément de combustibles donc rapides et ensuite ils disposaient d'un stock d'énergie thermique qui permettait des cuissons de plusieurs heures, voire une dizaine d'heures.
- ⇒ Une autre application du paléolithique, c'est l'inadéquation entre quelquefois l'usage et la source et donc par exemple lorsque l'homme du paléolithique a voulu faire bouillir de l'eau, la première fois il a dû jeter l'eau sur le feu et à sa grande surprise il a éteint son feu, ce qui nous paraît évident, ça ne l'était pas à l'époque, et donc, les hommes du paléolithique ont mis au point un procédé itératif extrêmement ingénieux : ils ont chauffé des galets dans un feu, ils ont placé le galet chaud dans une réserve d'eau, une fois que le galet s'était déchargé ils l'ont remis au feu et ainsi de suite et au bout d'un moment, l'eau s'est mise à bouillir et donc par un processus itératif de stockage / déstockage, l'homme du paléolithique a réussi finalement à rendre compatible l'eau et le feu.
- Alors on est vraiment sûr des technologies qui remontent très loin et aujourd'hui, industriellement, on utilise encore beaucoup ce stockage en chaleur sensible en utilisant des grosses quantités de matières et en faisant juste varier sa température.
- Alors, de manière un petit peu plus domestique, on connaît très bien ce mode de stockage, la bouillotte nos grands-mères où on fait chauffer de l'eau avant d'aller se coucher, on met ça dans une bouillotte en caoutchouc et on glisse ça dans son lit, c'est du stockage en chaleur sensible.
- De manière un petit peu plus industrielle déjà, EDF, historiquement ces dernières décennies, a réussi à résoudre un gros problème de gestion de réseaux puisqu'en gros, les gens voulaient surtout de l'électricité le jour et pas trop la nuit et donc ils ont mis en place un système de tarification de nuit pour inciter les gens à faire chauffer leur eau sanitaire la nuit et pas le jour, en stockant cette eau chaude dans un ballon (donc le ballon que l'on a dans nos garages à la maison) et ils ont réussi comme ça à déporter une consommation journalière vers la nuit et ainsi mieux gérer, en fait, le marché de l'énergie électrique en France.

- ⇒ Ce n'est pas nouveau le smartgrid, on en parle beaucoup, EDF l'a déjà beaucoup utilisé et notamment des systèmes de stockage en chaleur sensible qui ne sont pas des gros systèmes, qui sont complètement diffus sur le territoire dans chaque habitat mais ça a un impact tout à fait national.
- Dans le domaine de l'industrie, la métallurgie au niveau des hauts-fourneaux par exemple qui permet de produire l'acier, la fonte etc., ce sont des procédés qui fonctionnent à 1400°C et là il y a des grosses récupérations de chaleur avec des réservoirs de stockage sur des céramiques haute température (ce sont des silos qui font quelque chose comme 50 mètres de haut et 20 - 30 mètres de large), avec des milliers de tonnes de matériaux et on stocke et on déstocke la chaleur pour faire de l'économie d'énergie par récupérateur d'énergie thermique.
- Alors, aujourd'hui c'est évidemment quelque chose de très important pour la transition énergétique puisque, pour économiser l'énergie, très souvent on est amené à stocker l'énergie lorsqu'on en a trop pour la déstocker lorsqu'on en a besoin, c'est vrai pour l'habitat, c'est vrai dans l'industrie pour laquelle on a beaucoup d'énergie perdue et puis c'est vrai aussi pour les énergies renouvelables puisqu'il y a effectivement des problématiques comme l'inadéquation de la disponibilité de la source solaire par exemple et le besoin des gens.
- Alors, pour l'habitat, c'est très simple, c'est l'enveloppe elle-même qui fait le travail, l'enveloppe de l'habitat.
- ⇒ Si on a des murs en granite par exemple, ça va permettre par rapport aux variations de température extérieure le jour ou la nuit de créer des déphasages par rapport aux variations de température à l'intérieur, soit entre le jour et la nuit, soit même niveau des saisons.
- Donc là c'est un stockage/déstockage dynamique, passif dans l'enveloppe de l'habitat alors qu'industriellement bien entendu, là on va mettre dans des grosses cuves des matériaux de stockage et on va faire circuler un fluide pour stocker/déstocker la chaleur dans ces volumes-là.
- ⇒ Alors, un exemple donc qui concerne directement les énergies renouvelables, c'est dans le solaire à concentration : les grosses centrales électro solaires thermodynamiques à concentration utilisent du rayonnement solaire, le concentrent, produisent de la chaleur pour ensuite produire de la vapeur et turbiner et bien, pour isoler le bloc électrique des variations du champ solaire, on place un très gros stockage en chaleur sensible (alors un exemple type, les centrales type Andasol qui font 50 MW électriques).
- ⇒ Pour 7h30 de stockage, il faut 30 000 tonnes de matériaux.

- ⇒ Alors, il se trouve que ce sont des sels fondus qui sont des nitrates issus des mines du Chili et que sous l'état fondu on va faire donc varier leur température en gros entre 250 et 400°C pour stocker et déstocker la chaleur qui sort du champ solaire.
- Donc c'est beaucoup de matériaux et il est clair que ça coûte aussi beaucoup d'argent - les sels fondus sont quand même un peu corrosifs aussi.
- Donc sur une centrale solaire thermodynamique ça représente à peu près 17 % du coût d'investissement de la centrale et ça peut représenter par contre, sur le plan environnemental, quelque chose de très lourd, une très grosse contribution à l'ACV du procédé.
- Alors, ça pose le problème effectivement de la soutenabilité de la transition énergétique par rapport au stockage.
- ⇒ Pour la transition énergétique, il va falloir beaucoup de stockage et donc beaucoup de matériaux.
- ⇒ Ça veut dire qu'éventuellement, ça va contribuer à l'épuisement des réserves minérales du globe.
- Donc il y a des gros travaux depuis une dizaine d'années qui se développent et notamment au laboratoire PROMES sur l'utilisation de déchets industriels comme les déchets amiantés, les cendres volantes, les usines sidérurgiques, pour éviter d'aller utiliser les ressources minières encore disponibles et au contraire de réutiliser des matières qui sont en fin de cycle de vie.
- ⇒ Je prends un exemple très simple, toujours pour les centrales électro solaires thermodynamiques, d'ici 2050, il faudrait construire à peu près 400 centrales de type Andasol pour arriver à 10 % d'électricité issue du solaire à concentration à l'échelle mondiale.
- ⇒ Pour ces 400 centrales, il faudrait chaque année 20 millions de tonnes de matériaux de stockage alors que les sels fondus produits par le Chili, on en est à 0,8 millions de tonnes produites par an et le marché du Chili est déjà saturé pour l'agriculture et l'industrie chimique. Donc il n'y en a pas assez, ce n'est pas soutenable.
- Alors la solution, effectivement, c'est éventuellement de prendre des sels de synthèse, mais là comme les procédés de synthèse des sels de nitrates ont des impacts environnementaux importants, on double les gaz à effet de serre contenus dans le procédé. Donc sur le plan environnemental ça n'est pas intéressant. Sur le plan économique non plus.
- ⇒ Pour faire le pendant, si on prend uniquement les cendres volantes des centrales thermiques au charbon, on en produit à peu près 750 millions de tonnes par an à

l'échelle mondiale, comparé aux 20 millions de tonnes de matières qu'il nous faut, on est très largement au-dessus.

- Donc aujourd'hui, pour les gens qui travaillent sur les matériaux énergétiques, réutiliser, recycler les déchets industriels qui quelquefois sont même dangereux - comme les cendres volantes et les déchets amiantés -, peut largement permettre de satisfaire nos besoins en matériaux de stockage, en même temps ça permet de financer le traitement de ces déchets qui sont dangereux, et quelquefois, leur traitement nécessite des traitements thermiques - donc là aussi il y a temps de retour énergétique -, et ainsi on arrive à une démarche qui est soutenable sur l'ensemble de la matière, à la fois sur les déchets et sur les matériaux de stockage et sur le développement des énergies renouvelables.

La chaleur latente

Xavier PY

Professeur – Université de Perpignan Via Domitia

Le stockage thermique à chaleur latente est un stockage qui est encore adapté aux sources d'énergie notamment thermiques, que ce soit la biomasse issue de la combustion soit du solaire une fois converti en chaleur et partiellement adapté aux problématiques de protection ou d'optimisation de procédés notamment procédés à énergie renouvelable.

- Alors, le principe est différent du principe de stockage à chaleur sensible puisque là, on va stocker la chaleur avec un changement d'état de la matière utilisée.
- ⇒ Soit un changement d'état liquide/solide comme dans le cas des glaçons que l'on utilise à la maison.
- ⇒ Soit un changement d'état liquide/vapeur, quelque part c'est ce que l'on fait aussi l'été quand on a trop chaud et que l'on se place de l'eau sur la peau qui s'évapore et qui va prendre de la chaleur sur son support, donc stocker quelques part de la chaleur en elle-même intrinsèquement et nous rafraîchir.
- Voilà, donc deux grands modes de stockage à chaleur latente :
 - Le stockage à chaleur latente liquide / solide, le plus utilisé d'ailleurs et de très loin ;
 - Et le stockage à chaleur latente liquide/vapeur, moins utilisé parce que, comme la vapeur occupe un volume très important, c'est assez difficile à gérer. Mais ce n'est pas impossible.

Alors, quels sont les avantages de cette technique de stockage ?

- Tout d'abord, comparé au stockage en chaleur sensible, ça permet de stocker des quantités beaucoup plus importantes d'énergie par quantité de matière.
- Ensuite, un autre avantage par rapport à la chaleur sensible, c'est qu'autant la chaleur sensible nécessite des grosses variations de température entre le stockage et le déstockage, la chaleur latente permet de travailler à un Δt , une différence de température beaucoup plus réduite puisque le stockage lui-même, lorsqu'on a les deux phases en présence, se fait à température quasi constante. Pourquoi ?
- ⇒ Tout simplement à cause de la règle des phases de la thermodynamique qui stipule que dès lors que la pression est imposée, si l'on a deux phases, et bien l'autre variable qui est la température est imposée elle-même au moins pour les corps purs et les eutectiques.

- ⇒ Et donc le stockage, lorsque l'on est en mode de chaleur latente avec deux phases en présence - liquide, solide par exemple -, se fait à température quasi constante.
- ⇒ Quasi constante puisque, il y a quand même une nécessité de transférer la chaleur et donc là on a des gradients de température qui s'installent dans le système.
- Donc c'est quand même un avantage intéressant puisque ce stockage va permettre non seulement de stocker de la chaleur, mais d'imposer une température intrinsèquement, une température qui est spécifique du corps utilisé.
- Donc on voit bien là l'intérêt par rapport aux problématiques de protection thermique, lorsqu'on a des équipements qui sont fragiles par rapport à la température.
- ⇒ Une puce électronique par exemple ne peut pas monter au-delà d'une certaine température, lorsqu'elle fonctionne, elle chauffe, il suffit - c'est vite dit -, mais il suffit en théorie d'y placer un matériau à changement de phase liquide/solide à une température qui correspond à sa limite haute en température et dès que la puce électronique va monter en température, elle va être bridée et protégée par ce matériau à champ de phase.
- On va faire exactement la même chose pour les récepteurs des centrales solaires à concentration où là aussi, souvent, lorsque l'on est sur des centrales à tour à haute température, dans les 800°C par exemple, le matériau utilisé a des propriétés qui se dégradent au-delà d'une certaine température et on va placer derrière le récepteur un stockage à chaleur latente qui va brider en température le système.
- Alors, l'avantage, c'est que la gamme de températures possibles est très large, ça peut aller des températures négatives (donc c'est utilisé aussi en froid alimentaire et en congélation), jusqu'aux très hautes températures, jusqu'à plusieurs milliers de degrés et selon le matériau que l'on utilise - ça peut être des solutions salines, ça peut être des matériaux organiques comme les paraffines, ou les corps gras et ça peut être des sels fondus comme le sel NaCl de cuisine -, fond à 800°C et peut être un matériau de stockage à ces niveaux de température.
- ⇒ Alors après, ça peut poser des problèmes de corrosion, de stabilité au cours du recyclage, de prix et de toxicité bien entendu.
- Alors, dans la vie de tous les jours, on connaît très bien ce genre de mode de stockage :
 - J'ai cité effectivement les glaçons que l'on utilise pour nos boissons l'été ;
 - C'est le cas aussi des pains eutectiques, les pains bleus que l'on place dans le congélateur, ce sont des eutectiques liquides / solides qui procèdent d'un changement d'état par changement de phase ;

- C'est utilisé par des industriels français, nous avons la chance en France d'avoir le leader mondial du froid, donc du stockage en froid en chaleur latente qui est Cristopia et dont la spécialité c'est d'installer des gros stockages à chaleur latente liquide/solide dans les gratte-ciel en Asie. Alors pourquoi ?
- ⇒ Tout simplement parce que la demande en froid pendant la journée suit la chaleur et donc avec une courbe cloche de demande en puissance en froid, si on installe des groupes de production de froid, des climatisations, pour répondre à cette demande, il va falloir installer l'équivalent de la puissance crête demandée en journée et la plupart du temps, les groupes froids vont fonctionner en sous-régime.
- ⇒ Donc au lieu de faire ça, Cristopia installe des grosses cuves de stockage en froid à chaleur latente, installe 50 % du parc en froid que l'on aurait eu en puissance crête, fait fonctionner ça la nuit à tarif avantageux puisque c'est le tarif de nuit électrique, stocke pendant toute la nuit du froid à régime nominal, donc les groupes fonctionnent tout le temps de manière optimale et l'on réduit ainsi la maintenance et on augmente leur durée de vie, et pendant la journée, déstocke ce froid selon la demande au niveau des bâtiments climatisés et ça permet aussi de ne pas avoir la nuisance du bruit des groupes froids.
- Donc c'est exactement le même mode de fonctionnement que le stockage que l'on a en chaleur sensible dans les centrales électro solaires, sauf que là c'est dans le domaine du froid et bien sûr applicable au froid que l'on peut produire par énergie renouvelable comme par exemple par production de froid en rayonnement radiatif infrarouge nocturne.
- ⇒ Donc c'est un système de stockage qui est particulièrement adapté à la gestion des procédés, à l'optimisation de procédés, au contrôle des températures et à la protection thermique.
- Alors, il y a quand même des limitations bien entendu et c'est ce qui explique d'ailleurs qu'il y a beaucoup moins de stockage de chaleur latente industriellement que de stockage à chaleur sensible. Les principales limitations, c'est que souvent on a ce qu'on appelle de la surfusion, c'est à dire que la température de cristallisation et de solidification du matériau est quelquefois inférieure à la température de fusion.
- L'eau tout simplement. L'eau, comme chacun sait, va fondre à 0°C, par contre elle va cristalliser quelquefois à -2, -5, -12°C selon le volume utilisé et aussi selon la pureté de l'eau.
- ⇒ Ce retard à la cristallisation pose des gros problèmes sur le plan technologique.

- Autre problème, c'est le fait que les puissances de stockage et déstockage ne sont symétriques, parce que les conductivités thermiques de la phase solide et liquide ne sont pas équivalentes.
- ⇒ Et tous ces phénomènes-là ont bridé en fait le développement industriel du stockage à chaleur latente.
- Alors, depuis un certain nombre d'années, les laboratoires et les industriels développent des matériaux composites qui vont certainement permettre d'aller au-delà de ces problématiques et de mieux les intégrer notamment aux énergies renouvelables.