Les systèmes « SEVESEM » : procédés de stockage et de valorisation de l'énergie par séparation et mélangeage

par P. Le Goff

(Laboratoire des sciences du génie chimique, C.N.R.S.-ENSIC, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy).

De nombreux systèmes de stockage et de valorisation de l'énergie, apparemment très différents dans leurs réalisations techniques, sont, en fait, des applications variées d'un même principe scientifique : fournir de l'énergie pour séparer un mélange en ses constituants, puis récupérer ultérieurement cette énergie en re-mélangeant les constituants. On présente 4 procédés de mélangeage : électrodialyse inverse, osmose directe retardée, turbulence mécanique, vaporisation + condensation. On compare les systèmes de stockage-valorisation de l'énergie qui s'en déduisent en distinguant ceux qui stockent un « pouvoir calorifique » (c'est-à-dire de l'enthalpie *de mélange) et ceux qui stockent un « pouvoir de valorisation » de l'énergie (c'est-à-dire de* l'entropie *de mélange). On montre que le procédé par vaporisation + condensation semble le plus performant.*

Séparer un mélange en ses constituants exige un apport d'énergie. Corollairement, tout mélangeage de deux fluides de compositions différentes, pourrait être une source d'énergie utilisable. Et pourtant tous les mélangeurs en usage dans l'industrie sont consommateurs, et non producteurs, d'énergie utilisable ! La raison en est que ces mélangeurs ont été conçus pour obtenir un mélange de qualité donnée, en un temps limité.

Mais si l'objectif n'est plus d'obtenir un « bon » mélange, mais de *récupérer l'énergie qui a été fournie lors de la séparation*, l'ensemble du système de séparation et de mélangeage doit être conçu selon des principes très différents et optimisé en vue de cet objectif.

Comme le montre la figure 1, un tel système pourra avoir simultanément deux fonctions :

- *stocker*, pendant une *durée illimitée*, sous forme de ces 2 substances séparées, l'énergie même qui a été fournie pour les séparer,
- *revaloriser* cette énergie, en la délivrant, lors du mélangeage, sous une forme dont *la valeur est plus grande* que celle utilisée pour la séparation, par exemple sous forme d'énergie thermique à plus haute température, ou sous forme d'énergie mécanique ou électrique.

Bien entendu, cette revalorisation de l'énergie ne se fera pas sans perte, en application du 2e principe. Par contre le stockage n'impliquera, en principe, aucune perte d'énergie.

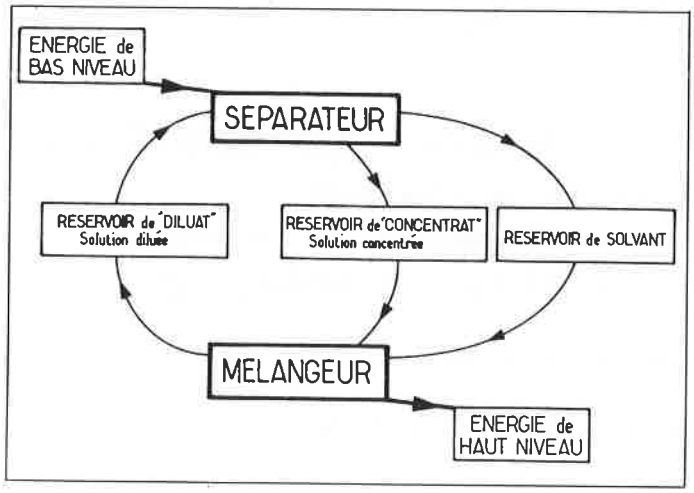


Figure 1.

Les applications de ces systèmes porteront sur la valorisation des chaleurs résiduaires industrielles et sur celles issues des capteurs solaires ordinaires (c'est-à-dire sans concentrateur optique). La possibilité de stockage illimité et sans perte, propre à ces systèmes, devrait conduire à les appliquer notamment au stockage intersaisonnier de l'énergie solaire.

Pour passer en revue et comparer les divers systèmes *a priori* envisageables, il conviendrait d'abord de dresser l'inventaire de tous les procédés de séparation de mélanges, qui utilisent principalement de l'énergie thermique de bas niveau :

- distillation sous basse pression (vaporisation + condensation),
- démixtion de liquides partiellement miscibles,
- précipitation d'un soluté partiellement soluble,
- stratification par densité,
- pompage paramétrique.

Une publication ultérieure sera consacrée à l'étude comparée de ces procédés, du point de vue énergétique. Nous sous-entendrons ici que la séparation se fait par distillation. La présente étude porte, en effet, uniquement sur la composition des procédés de mélangeage, à savoir les procédés suivants :

- électrodialyse inverse,
- osmose directe retardée,
- turbulence mécanique,
- vaporisation + condensation.

Ces divers systèmes sont apparemment très différents et ils conduisent à des réalisations techniques qui ne se ressemblent guère. Ils présentent cependant des bases scientifiques communes. Si, de plus, on désire procéder à une comparaison de leurs performances techniques et de leur rentabilité économique, on conçoit qu'il soit fructueux de les étudier par une même méthodologie et de les présenter avec une nomenclature uniforme et cohérente.

Dans ce but, nous proposons de les désigner par un sigle unique : les systèmes « SEVESEM ». Ce vocable devrait couvrir tous les systèmes de Stockage Et Valorisation de l'Énergie, par Séparation Et Mélangeage, quels que soient les procédés de séparation et de mélangeage et quelle que soit la nature de l'énergie valorisée.

Un système SEVESEM sera donc, en principe, constitué d'un séparateur, d'un mélangeur et de trois réservoirs de stockage, un pour le mélange et un pour chacun des constituants séparés. Chaque séparateur et chaque mélangeur pourra lui-même être constitué d'appareils à étages multiples (colonnes à plateaux, batteries de cuves, etc...) et ces étages pourront être reliés par une variété de circuits de reflux et de recyclages, ... Ainsi, pour un *même principe* de procédé, on pourra concevoir une *quasi-infinité* de variantes.

Nous ne donnerons, dans le présent rapport, que les principes généraux de ces systèmes, avec quelques exemples concrets à titre d'illustration. Les études détaillées feront l'objet de publications ultérieures.

1. Mélangeage par électrodialyse inverse

L'électrodialyse inverse est *a priori* la méthode la plus simple et la plus élégante pour produire directement de l'énergie électrique, à partir de solutions salines de concentrations différentes. Il suffit de faire marcher « à l'envers » un électrodialyseur de dessalement d'eau de mer (figure 2). La solution concentrée et l'eau douce sont introduites dans les compartiments séparés alternativement par des membranes anioniques et cationiques.

Mais les difficultés techniques sont considérables : l'épaisseur des membranes les plus minces est actuellement de l'ordre de 0,05 mm, la distance entre membrane est de 0,1 à 0,2 mm et la puissance recueillie n'est seulement que de l'ordre de 1 watt par m^2 de membrane (avec l'eau de mer) (1). La tension par cellule est de l'ordre de 30 à 50 mV. On a pu réaliser en laboratoire des batteries comportant des centaines de cellules et donnant une tension globale de 300 volts (2), mais avec une puissance de quelques dizaines de watts.

De plus, les membranes semi-perméables cationiques et surtout anioniques sont très fragiles, donc onéreuses.

En dépit de ces facteurs défavorables, des auteurs suédois ont pu établir un avant-projet de centrale de 200 mégawatts à implanter à l'embouchure d'une rivière du sud de la Suède, qui produirait de l'électricité au prix de 0,04 $ US/kWh (3).

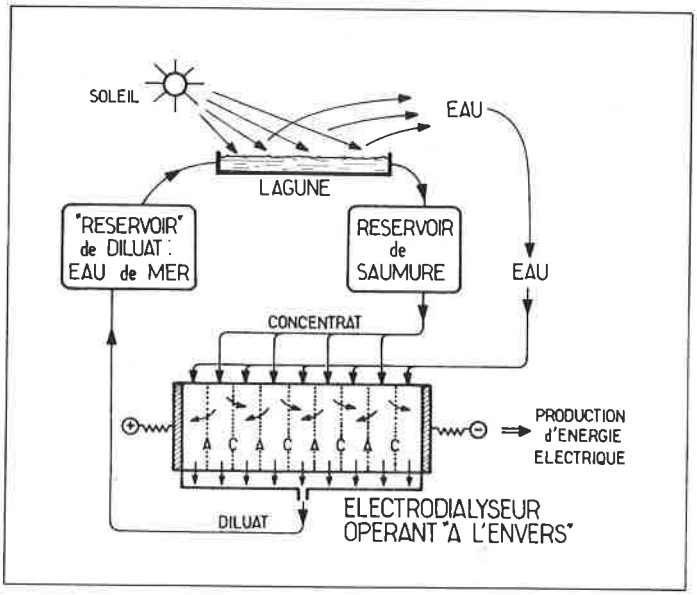


Figure 2. Mélangeage par électrodialyse inverse.

2. Mélangeage par traversée d'une membrane osmotique

Supposons qu'une membrane perméable au seul solvant soit placée entre un récipient alimenté en solvant pur et un récipient alimenté en solution concentrée (figure 3). La solution diluée qui en sort est à une pression P, qui est au maximum égale à la pression osmotique π du concentrat. On peut donc la faire travailler, par exemple dans une turbine où elle fournira la puissance $\dot{W} = \dot{V}.P$. C'est la méthode dite « PRO » (Pressure Retarded Osmosis) ou « osmose directe retardée ».

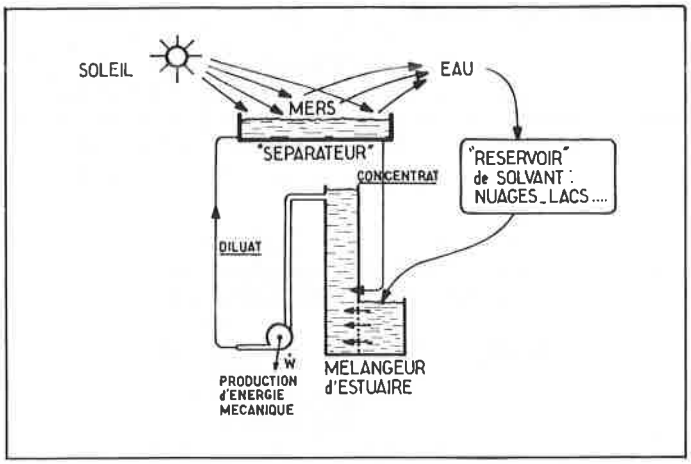


Figure 3. Mélangeage par « osmose directe retardée », Pressure Retarded Osmosis (PRO)

2.1. Centrale à eau de mer

On sait que l'eau de mer, avec sa concentration de 30 g/l, a une pression osmotique de 24 atm. Ainsi chaque m^3 d'eau de rivière qui se déverse dans l'océan, pourrait théoriquement fournir une énergie de 2,24 mégajoules. (Le Rhône dégrade ainsi, par différence de salinité avec la Méditerranée, une puissance de l'ordre de 3 000 mégawatts.)

Vers 1974-1976 on a vu paraître, dans la grande presse, plusieurs projets futuristes, plus ou moins fantaisistes, d'utilisation de cette énergie (voir figure 4 à titre d'exemple). Mais les études de faisabilité (2, 4, 5) ont montré que, même si certains de ces projets étaient réalisables avec les techniques actuelles (ce qui n'est pas certain) ils conduiraient à un coût de production d'électricité de l'ordre de 0,3 $ US/kWh sous réserve qu'il s'agisse d'unités de forte puissance (une centaine de MW).

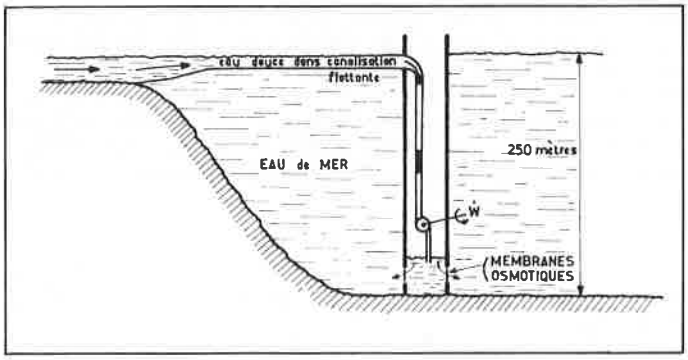


Figure 4. Projet (?) de centrale osmotique. L'eau douce est amenée, par une canalisation légère flottante jusqu'à une colonne de 250 mètres de hauteur comportant, à sa base, une très grande surface de membranes osmotiques. La surface libre de l'eau douce, dans la colonne, serait à environ 200 mètres en-dessous du niveau de la mer. C'est cette différence d'altitude qui est utilisée, dans une turbo-machine classique, alimentée en eau douce par une conduite forcée.

3. Le mélangeage par turbulence mécanique

Considérons une cuve dans laquelle entrent deux jets de liquides (figure 6). Leur mélangeage pourra résulter soit de la dégradation de l'énergie cinétique des jets eux-mêmes, soit d'un apport d'énergie mécanique extérieure, par exemple grâce à un agitateur rotatif ou à un vibreur. L'échauffement du mélange résultera de l'enthalpie de mélange ΔH_m. Cette énergie thermique sera transférée à l'extérieur, par exemple par un fluide caloporteur, passant dans un serpentin immergé dans la cuve-mélangeur.

Dans ces conditions, le schéma général de la figure 3 représente la circulation de l'eau à la surface de la planète : le « séparateur » est l'évaporation des mers, sous le rayonnement solaire et le « réservoir de solvant » est constitué par l'ensemble des nuages et de l'eau condensée dans les lacs et les rivières.

2.2. Le moteur thermique « Osmo-hydro-power »

S. Loeb et coll. (7) ont proposé et étudié en détail un projet plus raisonnable, conduisant à un coût de production de l'électricité de l'ordre de 0,10 à 0,15 $ US/kWh, pour une puissance de 1 mégawatt.

Dans ce projet (figure 5), une fraction de l'énergie fournie par la turbine est utilisée pour actionner la pompe d'introduction de la solution concentrée, dans le récipient à haute pression.

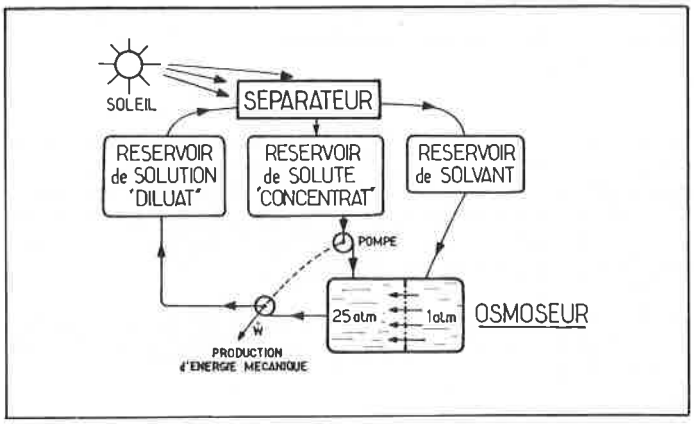


Figure 5. Le moteur « osmo hydro power » S. Loeb.

Plusieurs fluides, autres que les solutions aqueuses de sels, ont été essayés, notamment l'éthylène-glycol comme soluté et le méthanol, ou l'acétate d'éthyle comme solvant. La séparation de ces constituants se fait avec l'aide de chaleur à moins de 100 °C (chaleurs résiduaires, capteurs solaires). Le développement du procédé est actuellement limité par l'absence de membranes performantes (c'est-à-dire très perméables, non colmatables, résistant aux solvants organiques et aux fortes pressions... et peu onéreuses). Les puissances actuelles sont seulement de l'ordre de 10 à 50 watts par m^2 de membrane.

2.3. Aspect thermodynamique

L'énergie maximale que l'on peut théoriquement extraire d'un tel système est donnée par la variation d'énergie libre ΔG qui dépend elle-même principalement de la variation d'entropie. Ainsi, dans la formation d'un mélange *idéal* d'un volume V_1 (m^3) d'une solution de concentration C_1 (en mole/m^3) et d'un volume V_2 d'une solution de concentration C_2, on obtient :

$$\Delta G = 2RT\left[C_1V_1 \text{ Log } \frac{C_1(V_1+V_2)}{C_1V_1+C_2V_2} + C_2V_2 \text{ Log } \frac{C_2(V_1+V_2)}{C_1V_1+C_2V_2}\right]$$

Les mesures effectuées par Loeb et coll. (6) sur un appareil pilote ont conduit à des rendements de l'ordre de 1 à 4 %.

3.1. Couple : $H_2O + SO_4H_2$

Imaginons que la séparation de l'eau et de l'acide ait été effectuée dans un évaporateur, par exemple un appareil à chauffage solaire

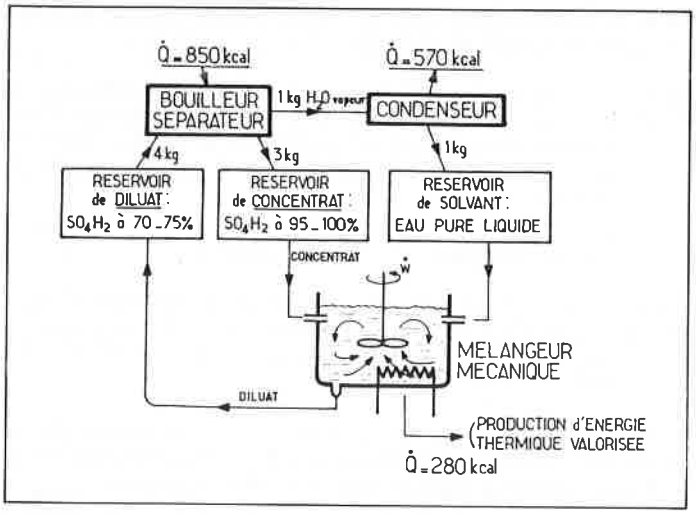


Figure 6. Mélangeage par turbulence mécanique de liquides : eau + acide sulfurique

fonctionnant pendant l'été. Dans le cas limite (fictif pour raison économique) où il s'agirait d'une solution à 75 % que l'on séparerait en eau pure et en acide pur, il faudrait apporter à l'évaporateur 850 kcal par kg d'eau séparée. Et le mélangeage en hiver, de ces 2 liquides, ne fournirait que l'enthalpie de mélange, soit 280 kcal (pour 4 kg de solution).

Ce couple a récemment été testé à l'échelle pilote du chauffage d'un bâtiment de 200 m², par la Société américaine Rocket Research Co (7).

On peut même envisager de disposer plusieurs cuves en série thermiquement, afin d'additionner leurs échauffements. Tanaka et coll. (8) ont montré qu'en mélangeant de l'eau et de l'acide sulfurique à 90 % dans 4 cuves disposées en série, on produit de la vapeur à 300 °C.

Il faut toutefois rappeler que la manipulation de solutions chaudes d'acide sulfurique pose de délicats problèmes de corrosion et de sécurité. Il semble donc probable que ce système ne pourra guère conduire à de grands développements dans les usages domestiques, mais il pourrait trouver d'importantes applications industrielles.

4. Mélangeage par vaporisation-condensation

4.1. Principe

Considérons 2 ballons en communication contenant l'un de l'eau pure, l'autre une solution quasi saturée d'un sel tel que, par exemple, du chlorure de calcium (figure 8*a*). Il est bien connu qu'à l'équilibre des pressions, la température de la solution est supérieure à celle de l'eau pure, par exemple 50 °C, comparée à 20 °C pour $p \approx 17$ mmHg (et 164 °C, comparée à 100 °C pour $p \approx 760$ mmHg).

Si on surchauffe le ballon de saumure, par exemple à 55 °C, en maintenant le ballon d'eau pure à 20 °C, on réalise un *séparateur* eau/sel classique, opérant par vaporisation-condensation (figure 8*b*). Si, au contraire on chauffe le ballon d'eau, par exemple à 20 °C, en maintenant le ballon de saumure à 45 °C seulement, on réalise un *mélangeur* par vaporisation d'eau pure et condensation + mélangeage dans le ballon à 45 °C (figure 8*c*). Et cette opération valorise de l'énergie thermique, puisque l'on fournit au système de la chaleur à 20 °C et qu'on récupère la même quantité de chaleur à 45 °C.

Bien entendu, pour que le système fonctionne en régime permanent, il faudra apporter de l'eau à l'évaporateur et du concentrat au condenseur-mélangeur, et il faudra en extraire le diluat formé.

Comme l'illustre la figure 9, le chlorure de calcium pourrait être remplacé, dans cette expérience, par de nombreux autres solutés : le bromure de lithium donne une élévation de température un peu supérieure à celle de $CaCl_2$ (mais il coûte 20 fois plus cher !), la soude et l'acide sulfurique auraient des performances beaucoup plus grandes encore.

4.2. La pompe à chaleur avec stockage incorporé

Relions maintenant le séparateur et le mélangeur des figures 8*b* et 8*c*, le premier fonctionnant entre 55 et 20 °C, et le second entre 20 et 45 °C : on obtiendrait ainsi une classique pompe à chaleur à absorption. Mais la nouveauté apportée, ici, consiste à intercaler des réservoirs de diluat et de concentrat entre les deux ensembles précédents.
Autrement dit, un système de stockage intersaisonnier de l'énergie solaire, consisterait à couper une pompe à chaleur en deux parties : la moitié « séparation » fonctionnerait en été et la moitié : « mélangeage » fonctionnerait en hiver.

3.2. Couple : $NH_3 + H_2O$

Ici c'est l'ammoniac qui tient le rôle de solvant volatil et l'eau celui de soluté non volatil. La séparation d'un diluat à 50 % d'eau, en ammoniac presque pur et en un concentrat à plus de 90 % d'eau nécessite l'apport de 420 kcal par kg de NH_3 séparé (figure 7).

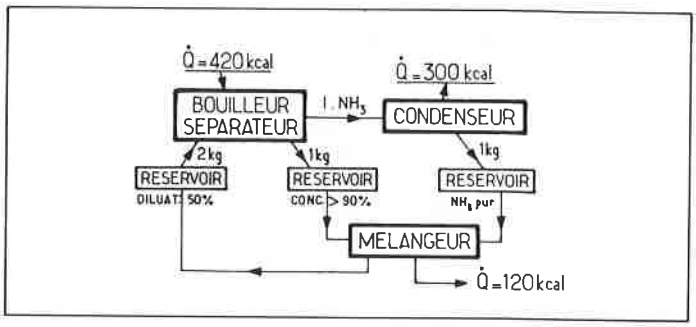


Figure 7. Système eau + NH_3 liq.

Le fait de stocker de l'ammoniac liquide, pur (ou contenant quelques % d'eau) constitue un important réservoir d'énergie, puisqu'en le re-mélangeant avec de l'eau liquide, on récupérera l'enthalpie de dilution ΔH_m soit environ 120 kcal. Les problèmes techniques relatifs à la manipulation de solutions aqueuses ammoniacales sont résolus depuis longtemps. Le stockage de l'ammoniac liquide à 20 °C (sous 8,5 atm) n'est guère onéreux et peut être prolongé indéfiniment dans des réservoirs en acier ordinaire (cf. : réservoirs à propane pour usages domestiques).

En conclusion, les couples ($H_2O + SO_4H_2$) et ($NH_3 + H_2O$) ont un « pouvoir calorifique par mélangeage » qui est de l'ordre de 40 à 70 kcal/kg de mélange. Tenant compte du fait qu'il faudra disposer de 3 réservoirs (un pour le mélange, et deux pour les constituants séparés, ayant à eux deux, un volume presque égal à celui du 1er), l'ensemble aura une *capacité de stockage de l'ordre de 20 à 40 kcal par litre* de réservoir. On remarque que cette valeur est du même ordre de grandeur que celle des systèmes de stockage thermique basé sur une chaleur latente de fusion (par exemple de la paraffine).

Mais le présent système présente deux avantages décisifs :
- le stockage peut se prolonger indéfiniment, sans pertes, dans des réservoirs ordinaires, non calorifugés,
- les transferts de chaleur sont aussi bons qu'on le désire, puisque le système ne comporte que des liquides (et non des solides) et que la turbulence, déjà nécessaire à assurer un bon mélangeage, assurera également de forts coefficients de transferts.

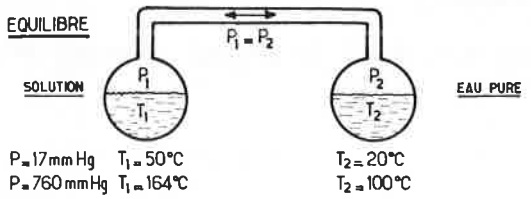


Figure 8 *a*.

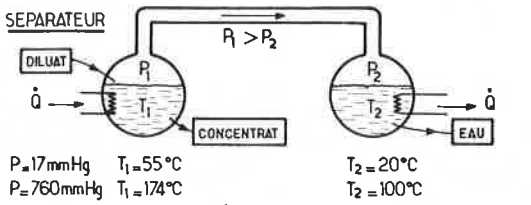


Figure 8 *b*.

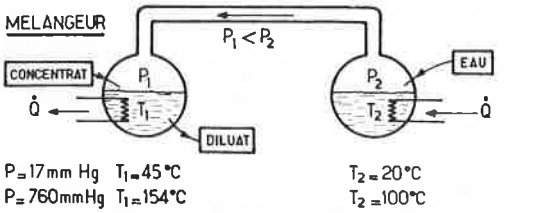


Figure 8 *c*.

Figure 8. Systèmes liquide-vapeur : eau + solution $CaCl_2$ quasi saturée

Un tel système peut être présenté sous deux aspects :
- ou bien il s'agit d'un *stockage de chaleur*, fournie à 55 °C en été et rendue à 45 °C en hiver, étant entendu que la chaleur et la « froideur » échangées à 20 °C sont gratuites,
- ou bien il s'agit d'une *valorisation*, de chaleur fournie à 20 °C en hiver et rendue, immédiatement à 45 °C, le « pouvoir de valorisation » de cette chaleur ayant été stocké de l'été à l'hiver.

4.3. Enthalpie et entropie de mélange

La figure 10 montre Log P en fonction de 1/T, pour un solvant pur et pour sa solution. La pente de chaque droite est proportionnelle à l'enthalpie de vaporisation H_v et son ordonnée est proportionnelle à l'entropie de vaporisation S_v.
Pour le solvant pur, il vient :

$$\text{Log } P^\circ = \frac{-H_v^\circ}{RT} + \frac{S_v^\circ}{R}$$

et pour la solution : $\text{Log } P = \dfrac{-H_v}{RT} + \dfrac{S_v}{R}$

L'enthalpie et l'entropie de mélange sont respectivement égales aux différences :

$$\Delta H_m = H_v - H_v^\circ; \qquad \Delta S_m = S_v - S_v^\circ$$

Par définition même, l'enthalpie de mélange ΔH_m est nulle pour une solution idéale : il n'y a dans ce cas aucun effet thermique, ni à la séparation, ni au mélangeage, et les droites de vaporisation, sur la figure 10, seraient parallèles.

C'est, en revanche, la différence des ordonnées (pour une même température), c'est-à-dire l'entropie de mélange, qui tient le rôle essentiel dans la valorisation de l'énergie thermique par vaporisation-condensation.

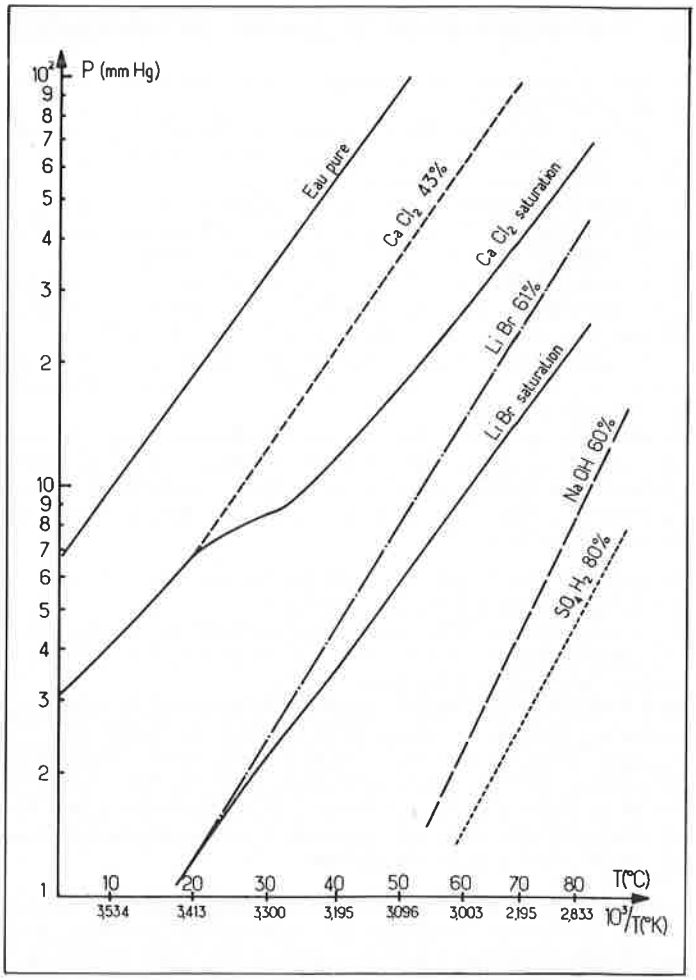


Figure 9. Pressions de vapeur de solutions aqueuses de soude, d'acide sulfurique, de bromure de lithium et de chlorure de calcium, à saturation et à concentration constantes (exprimées en titres massiques)

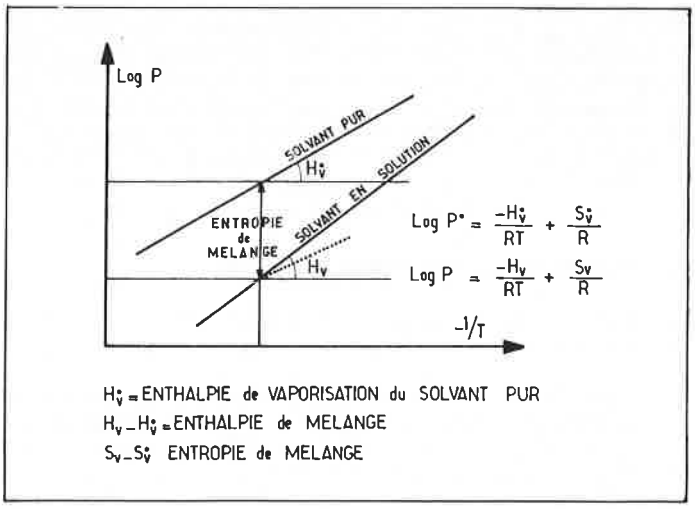


Figure 10. Pression de vapeur d'un solvant pur ou en solution.

Autrement dit, la « quantité » de chaleur ainsi valorisée est *proportionnelle à l'enthalpie de vaporisation* H_v (soit environ 580 kcal/kg d'eau à 20 °C), mais la « qualité » de la valorisation, c'est-à-dire l'élévation de température est *proportionnelle à l'entropie de mélange* ΔS_m.

5. Pouvoir calorifique et pouvoir de valorisation de la chaleur

Le tableau 1 compare les bilans enthalpiques de divers systèmes de stockage de chaleur :

1. quand un kg de paraffine, conservée fondue à 60 °C, est ramené à l'état solide, à 60 °C, il libère une quantité de chaleur de l'ordre de 30 à 35 kilocalories (enthalpie de fusion),

2. quand on mélange 3 kg d'acide sulfurique et 1 kg d'eau, la chaleur dégagée est de 280 kcal (en système adiabatique, le mélange serait porté à 170 °C). C'est l'enthalpie de mélange.

3. le mélangeage de 1 kg d'hydrocarbure et de la quantité stœchiométrique d'air pour produire la combustion complète dégage une chaleur de 11 000 kcal (enthalpie de réaction).

4. le mélangeage d'eau et d'une solution saturée d'un sel, tel que $CaCl_2$ ou LiBr, ne donne qu'un effet thermique négligeable ($\leqslant$ 10 kcal/kg de sel).

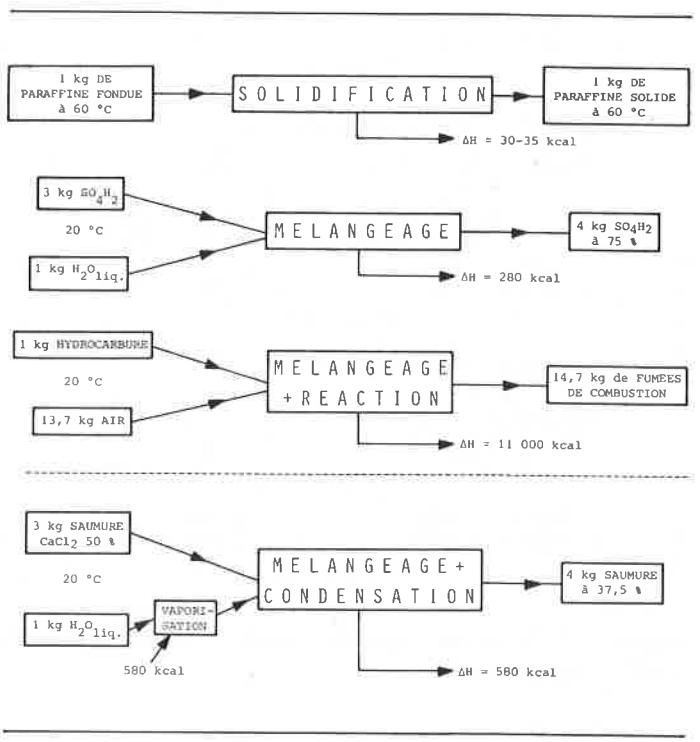
4 bis. si, en revanche, l'eau est préalablement évaporée, de sorte que c'est de la vapeur d'eau que l'on condense et mélange dans la saumure de $CaCl_2$, alors on revalorise d'environ 25 °C, une quantité de chaleur égale à l'enthalpie de vaporisation de l'eau, soit 580 kcal/kg d'eau.

Il apparaît donc que le *quatrième système de stockage est fondamentalement différent des 3 premiers :*

- les 3 premiers systèmes stockent de *l'enthalpie de mélange* (ou de changement d'état). On peut donc évaluer leur pouvoir calorifique, comme pour les combustibles.
- le 4e système, au contraire, stocke de *l'entropie de mélange*, c'est-à-dire du pouvoir de valorisation d'énergie de bas niveau. Par exemple, 3 kg de solution de LiBr à 60 % ont le « pouvoir de remonter » de 25 °C la température d'un flux de chaleur de 580 kcal, fourni à un kg d'eau pure à 20 °C. On obtient ainsi 4 kg de diluat à 45 °C, ce qui est équivalent à une capacité de stockage de 580/4 = 145 kcal/kg de mélange.

Cette capacité de stockage exceptionnellement grande est due à la grande valeur de l'enthalpie de vaporisation de l'eau. Pour l'ammoniac, l'effet est 2 fois plus faible et pour tous les Fréons et solvants organiques il est à 5 à 10 fois plus faible.

Tableau 1. Capacité de stockage thermique et pouvoir calorifique



6. Application au système ammoniac + eau

Reprenons l'exemple du couple $NH_3 + H_2O$ étudié au paragraphe 3.2. (et sur la figure 7). Supposons que ces constituants aient été stockés de l'été à l'hiver sous forme liquide (comme indiqué sur les figures 7 et 11).

Et supposons qu'au lieu de les remélanger à l'état liquide, on commence par revaporiser l'ammoniac, en utilisant de la chaleur « gratuite », par exemple celle de l'eau d'une rivière, à 10 °C. En condensant cet ammoniac dans de l'eau liquide (c'est une opération de condensation + mélangeage), on recueille une *énergie égale à celle fournie* lors de la séparation, soit 400 kcal/kg de NH_3 (au lieu de 100 kcal dans le cas d'un mélangeage en phase liquide.

A la vérité, nous distinguerons les 2 variantes suivantes :

6.1. Dans la 1re variante, isobare (figure 11)

L'évaporateur et le condenseur-mélangeur opérent à la même pression (aux pertes de charge de la vapeur près).

La température du condenseur-mélangeur est nettement supérieure à celle de l'évaporateur (par exemple + 75 °C dans l'exemple cité figure 11). C'est le phénomène-même de « valorisation » de l'énergie thermique. En fait, un tel système n'est pas autre chose qu'une *pompe à chaleur à absorption*, dont la boucle de circulation du fluide volatil est coupée en deux parties, l'une fonctionnant en été (le bouilleur-régénérateur et le condenseur), l'autre fonctionnant en hiver (l'évaporateur et l'absorbeur), ces 2 parties étant reliées par des réservoirs de stockage.

Dans ce cas, les deux effets d'enthalpie de mélange et d'entropie de mélange existent simultanément : on observera à la fois un échauffement propre dû aux 100 kcal de l'enthalpie de mélange, comme dans le cas du mélangeage des 2 liquides (cf. § 3.2.) et un effet de valorisation des 300 kcal de vaporisation-condensation, due à l'entropie de mélange.

« Pouvoir de valorisation » de la chaleur ambiante

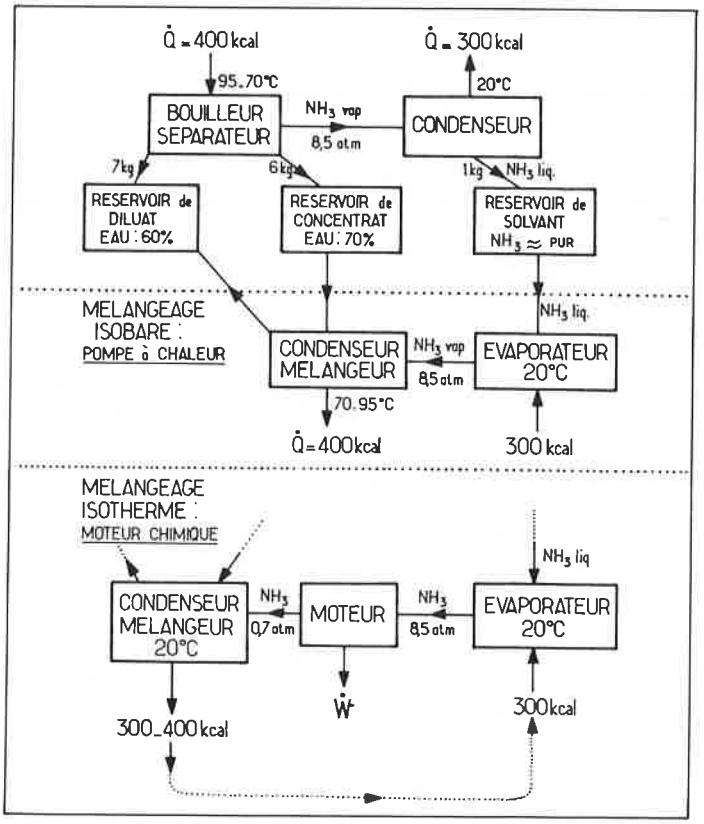


Figure 11. Mélangeage par vaporisation-condensation.

6.2. Dans la 2e variante, isotherme (figure 11 *bis*)

L'évaporateur et le condenseur-mélangeur sont presque à la même température (aux gradients par conduction des parois près). Dans ces conditions, il existe une forte différence de pression entre les 2 appareils (de l'ordre de 7 atmosphères). Il est donc possible d'intercaler dans ce circuit de vapeur, une machine de conversion en énergie mécanique (par exemple une turbine). En fait, un tel système SEVESEM n'est pas autre chose qu'un *moteur thermique à source solaire*. Rappelons que dans un moteur thermo-solaire classique, fonctionnant par évaporation-condensation d'un seul fluide pur (NH_3, Fréon, ...), la production d'énergie mécanique est directement proportionnelle au flux solaire incident. Dans ce cas, il n'est guère envisageable de stocker la vapeur produite le jour pour l'utiliser à faire de l'électricité pendant la nuit.

Au contraire, le système à deux fluides proposé ici, permet un stockage intermédiaire de capacité et de durée illimitée. On remarquera, de plus, que le rendement de conversion chaleur/travail d'un tel système n'a aucune raison d'être inférieur à celui du système à un seul fluide (à quelques pertes par conduction près). Isshiki et coll. ont récemment fait fonctionner une motocyclette avec un moteur de ce type (réf. 9).

Des systèmes SEVESEM basés sur ce principe seront certainement plus fiables et plus performants, pour la conversion thermo-mécanique de l'énergie solaire, que les systèmes à membranes (électrodialyse inverse et osmose directe) présentés plus haut.

7. Conclusions

Les systèmes SEVESEM, dont le mélangeage se fait par vaporisation-condensation, de solutions salines, aqueuses ou ammoniacales, présentent des avantages décisifs pour le stockage sur longues périodes, de l'énergie thermosolaire :

1. comme tous les systèmes de stockage chimique, ils permettent un stockage de *durée illimitée*,

2. par rapport aux systèmes comportant des solides divisés (par ex. : l'adsorption-désorption d'eau sur zéolithes ou sur gel de silice), ils ne donnent lieu à *aucun effet de vieillissement ou d'empoisonnement*, et peuvent supporter des milliers de cycles de fonctionnement.

3. par rapport à tous les systèmes impliquant des réactions chimiques plus ou moins réversibles, plus ou moins rapides et accompagnées de réactions secondaires, les systèmes ici considérés ne sont limités que par des phénomènes de *cinétique physique* (convection, turbulence) que l'on maîtrise et que l'on sait rendre aussi rapides qu'on le désire.

4. les « capacités de stockage équivalentes » s'étalent entre quelques dizaines et quelques centaines de kilocalories par dm^3 de réservoir. Et ces réservoirs pourront être faits de matériaux peu onéreux (matières plastiques pour les solutions aqueuses à l'atmosphère, acier ordinaire pour l'ammoniac sous $\simeq$ 10 atm).

5. les deux variantes du procédé, ici proposées, qui ne sont d'ailleurs pas incompatibles, permettent de délivrer l'énergie au choix sous forme mécanique ou sous forme thermique revalorisée.

En revanche, ces systèmes ne stockent pas du « pouvoir calorifique », mais stockent du « pouvoir de valorisation » de chaleur à bas niveau. Ils ont donc l'inconvénient de n'être pas autonomes. Ils impliquent que l'on dispose, à l'utilisation, d'une telle source de chaleur à bas niveau, par exemple d'un effluent à 10-20 °C.

En conclusion, parmi les 4 types de procédés de mélangeage envisagée, les 2 premiers basés sur l'emploi de membranes semi-perméables semblent encore loin des applications industrielles à grande échelle. Il est peu probable que des membranes beaucoup plus performantes soient disponibles dans le proche avenir.

Le 3e procédé, par turbulence mécanique, a l'inconvénient d'impliquer soit l'emploi de matériaux résistant aux solutions sulfuriques chaudes, soit celui de réservoirs résistant aux pressions de quelques dizaines d'atmosphères, de l'ammoniac à chaud.

Le 4e procédé, par vaporisation-condensation, nous semble être de loin, le plus intéressant.

Bibliographie

(1) J. N. Weinstein et F. B. Leitz, *Science*, 1976, *191*, 557.
(2) J. Schechter, Conférence UNITAR, Montréal, 25 nov.-6 déc. 1979.
(3) A. T. Emren et S. B. Bergstrom, Proceedings of the International Conference on Alternative Energy Sources, Miami (déc. 1977).
(4) R. S. Norman, *Science*, 1974, *186*, 350.
(5) G. H. Mehta, Conférence UNITAR, Montréal, 25 nov.-6 déc. 1979.
(6) G. D. Mehta, S. Loeb et M. D. Fraser, 14th Intersociety Energy Conversion Engineering Conferences, Boston, August 1979, n° 799227 et n° 799418.
(7) D. D. Huxtable et D. R. Poole (Rocket Research Co), Joint Conf. Am. Sec. Intern. Solar Energy Soc. Winnipeg (1976), pages 178.
(8) T. Tanaka, K. Sakuta, M. Kamimoto, T. Tani, S. Sawata et T. Horigome, « Energy Conversion », Vol. 18 (1978), p. 57.
(9) N. Isshiki, M. Takeuchi, J. Nikai, J. Kamoshida et T. Akota, Proceedings of the 14th Intersociety Energy Conversion, Engineering Conference, Boston (1979), p. 1998.