

## La transition énergétique est une question de stockage

Article écrit à plusieurs mains entre Jenni Energietechnik et Sebasol

- En noir police BasicCommercial LT Roman 6.5pt : article original, Joseph Jenni, Jenni Energietechnik
- En noir police BasicCommercial LT Roman 6.5pt : traduction Patrice Pasquier
- En bleu police BasicCommercial LT Roman 6.5pt : compléments Pascal Cretton, Sebasol

Le terme de transition énergétique décrit le passage des énergies conventionnelles qui sont généralement polluantes, aux énergies renouvelables plus propres. Ainsi le stockage de l'énergie est un élément fondamental dans la réussite de la transition énergétique.

Die Energiewende bezeichnet den Umstieg von konventionellen, meist klimaschädlichen Energieträgern auf saubere, erneuerbare Energien. Dabei ist die Energiespeicherung ein Schlüssel und elementar für das Gelingen der Energiewende.

Les énergies conventionnelles comme le mazout, le gaz, le charbon, l'énergie atomique sont stockables et utilisables à la demande. Ceci est un avantage important et permet de fournir l'énergie *en fonction de la consommation*. En revanche, la production d'énergie renouvelable n'est pas constante. Des variations saisonnières (été/ hiver), journalières (jour/ nuit) et météorologiques conduisent à une production irrégulière qui évolue rapidement, c'est pourquoi le stockage de l'énergie est indispensable. Actuellement, il est techniquement possible de fournir une part importante d'énergie en utilisant des techniques propres. Mais cela ne sert à rien d'avoir suffisamment d'énergie si celle-ci est disponible au mauvais moment. Le défi est donc de pouvoir stocker cette énergie pour combler les périodes de faible production.

Konventionelle Energieträger wie Öl, Gas, Kohle, Atomkraft sind lagerbar und können auf Abruf eingesetzt werden. Dies ist ein wesentlicher Vorteil und ermöglicht, Energie entsprechend der Nachfrage bereitzustellen. Dagegen ist die Erzeugung erneuerbarer Energie nicht konstant. Saisonale (Sommer-Winter) und kurzfristige (Tag-Nacht) Schwankungen sowie die Wetterunsicherheit führen zu einem sich stark ändernden Angebot, weshalb in der Regel eine Pufferung der Energie unabdingbar ist. Grundsätzlich ist es technisch machbar, einen bedeutenden Teil der heute konventionell erzeugten Energie mit sauberen Techniken bereitzustellen. Es nützt jedoch nichts, wenn wir prinzipiell genug Energie haben, aber zur falschen Zeit. Die Herausforderung ist deshalb die Zwischenspeicherung, um Phasen mit wenig Energieproduktion zu überbrücken.

Aujourd'hui plusieurs technologies de stockage sont utilisées. La liste ci-dessous énumère les principales technologies sur le marché :  
Heute sind verschiedene Speichertechnologien im Einsatz. Die Zusammenstellung auf der Rückseite ermöglicht einen Überblick über die bekanntesten Speichertechnologien auf dem Markt:

- Les batteries **Lithium-Ion** sont très répandues par exemple dans les appareils électroniques comme les appareils photos et les téléphones portables. Elles sont aussi utilisées dans les voitures électriques actuelles. Le prix pour le stockage de l'énergie est très élevé. Le cycle de recharge et la durée de vie sont très limités. Dans l'ensemble, nous considérons que le potentiel de cette technologie de stockage est surestimé. **Lithium-Ionen-Batterien** sind weit verbreitet, z.B. in elektronischen Geräten wie Kameras und Handys. Auch in Elektrofahrzeugen werden sie als Stromspeicher eingesetzt. Der Preis für die Energiespeicherung ist sehr hoch. Zykliefähigkeit und Lebensdauer sind stark eingeschränkt. Insgesamt erachten wir das Potential dieser Speichertechnologie als stark überschätzt.
- Les batteries **au plomb** sont utilisées principalement dans les voitures conventionnelles. Avec cette technologie, on ne peut stocker qu'environ 1 kWh. L'utilisation à grande échelle de ces batteries pour le stockage d'électricité photovoltaïque produite par une maison familiale n'est pas appropriée en raison de son coût élevé et de la disponibilité limitée des matières premières nécessaires à sa fabrication. **Blei-Batterien** erfüllen vorwiegend in Fahrzeugen die Funktion als Stromspeicher. In einer handelsüblichen Fahrzeugbatterie kann nur rund 1 kWh gespeichert werden. Für eine grossflächige Verbreitung, z.B. für die Speicherung von nicht konstant anfallendem Photovoltaikstrom bei Einfamilienhäusern, sind Blei-Batterien aufgrund ihres hohen Preises und begrenzter Verfügbarkeit der nötigen Rohstoffe nicht geeignet.
- Les centrales de **pompage-turbinage** représentent à l'heure actuelle la seule possibilité industriellement applicable de stocker en grande quantité de l'électricité. La production excédentaire d'électricité des jours ensoleillés est stockée par pompage pour être turbiné plus tard et transformé en électricité selon la demande. Plusieurs projets d'envergure sont actuellement en cours ou en projets dans les Alpes. Il s'agit d'une technologie éprouvée avec une longue durée de vie et une cyclabilité illimitée, mais elle soulève des questions au niveau de la préservation du paysage et la protection des cours d'eau. **Wasser-Pumpspeicherkraftwerke** stellen zurzeit die einzige grosstechnisch anwendbare Speichermöglichkeit für Strom dar. Stromüberschüsse können künftig beispielsweise an sonnigen Tagen eingespeichert und bei späterem Bedarf wieder verstromt werden. Mehrere Grossprojekte in den Alpen sind aktuell in Bau und Planung. Es handelt sich um eine bewährte Technologie mit langer Lebensdauer und unbegrenzter Zykliefähigkeit. Es stellen sich aber Fragen betreffend Landschafts- und Gewässerschutz.
- Le **stockage thermique** de l'eau fournit le moyen le moins cher et le plus adapté pour le stockage de la chaleur. Les coûts du stockage à court terme voire saisonnier de l'énergie sont faibles. Les panneaux solaires thermiques couplés à un réservoir d'eau utilisé comme accumulateur thermique ont fait leur preuve dans le chauffage d'un bâtiment et son approvisionnement en eau chaude sanitaire. Cette technique présente l'avantage d'une cyclabilité illimitée, d'une disponibilité suffisante des matières premières pour la fabrication de l'installation ainsi qu'une longue durée de vie. Quand les pertes thermiques de l'accumulateur sont utilisées, cette énergie peut atteindre un haut rendement jusqu'à pratiquement 100%. **Wasserwärmespeicher** stellen den preiswertesten und gangbarsten Weg für die Wärmespeicherung dar. Die Kosten für kurzzeitige bis saisonale Energiespeicherung sind tief. Solarthermieranlagen mit Wasser gefüllten Stahlbehältern als Energiespeicher haben sich zur Beheizung von Gebäuden und Warmwasseraufbereitung bewährt. Sie bieten Vorteile wie unbegrenzte Zykliefähigkeit, genügende Verfügbarkeit von Rohstoffen zur Herstellung der Anlagen sowie eine lange Lebensdauer. Wenn die Abwärme (Isolationsverluste) genutzt wird, kann die Energie mit sehr hohem Wirkungsgrad (bis praktisch 100%) gespeichert werden.

Les autres formes de stockage de l'énergie comme l'énergie cinétique, l'air comprimé, la production d'hydrogène, l'utilisation de la chaleur latente, etc. ont encore un grand besoin de développement et ont peu de potentiel physique ou sont par ailleurs peu adaptées. C'est pourquoi elles restent du domaine de « l'utopie ». En l'état actuelle des connaissances, la production d'hydrogène par du solaire thermique semble la technique la plus envisageable pour le stockage saisonnier de l'énergie, à la condition que le prix de l'énergie soit plus élevé qu'aujourd'hui. De plus, le rendement global est relativement faible. Andere Energiespeicher wie Schwungräder, Druckluft, elektrisch erzeugter Wasserstoff, Latentspeicher etc. haben zum Teil seit Jahrzehnten noch einen grossen Entwicklungsbedarf, physikalisch wenig Potential oder sind anderweitig kaum geeignet und deshalb im Bereich der Hoffnungen und Wünsche. Für saisonale Energiespeicherung könnte aus aktueller Sicht am ehesten eine solar gespeiste Wasserstoffwirtschaft eine Rolle spielen, dies jedoch zu weit höheren Energiepreisen als heute. Zudem ist der Gesamtwirkungsgrad relativ tief.

Dans le cadre de la transition énergétique, il est important de savoir que l'électricité ne représente que 24% de la consommation totale d'énergie en suisse. L'énergie n'est pas seulement de l'électricité. L'électricité est une énergie noble, c.-à-d. qu'elle résulte de la transformation d'une autre forme d'énergie comme la chaleur ou le mouvement. Pour réduire la dépendance à l'électricité, des alternatives doivent être utilisées. Par exemple, au lieu d'équiper une habitation d'une pompe à chaleur alimenté électriquement, il est possible de la chauffer directement en énergie thermique sans autre transformation d'énergie (installation de panneaux solaires thermiques). Le bois peut aussi être utilisé comme stock d'énergie pour une utilisation décentralisée. Cependant il est important que celui-ci soit utilisé uniquement lorsque les autres sources d'énergies renouvelables ne sont pas disponibles et qu'il n'y ait pas de surexploitation des forêts. Im Zusammenhang mit der Energiewende ist wichtig zu wissen, dass Elektrizität nur 24% des Gesamtenergieverbrauchs (Bsp. Schweiz) ausmacht. Energie ist also nicht nur Strom. Strom ist veredelte Energie, d.h. muss zuerst aus einer anderen Energieform wie Wärme oder Bewegung umgewandelt werden. Um die Abhängigkeit von Strom abzubauen, müssen Substitutionspotentiale genutzt werden. Beispielsweise kann ein Wohngebäude statt mit einer strombetriebenen Wärmepumpe auch direkt ohne Umwandlung der Energieform mit Wärme (z.B. Solarthermie) beheizt werden. Holz eignet sich ebenfalls als Energiespeicher für die dezentrale Verwendung. Allerdings ist wichtig, dass Holz nur dann genutzt wird, wenn die anderen erneuerbaren Energien nicht zur Verfügung stehen und keine Übernutzung der Wälder stattfindet.

## Vue d'ensemble de différentes technologies de stockage

Stockage à court terme:	Du jour à la nuit	1 bis 3 Tage
Stockage à moyen terme:	Fin d'une période de beau à la prochaine période	10 bis 30 Tage
Stockage saisonnier:	Du printemps à l'hivers	100 Tage

Il n'existe pas de baguette magique pour avoir de l'énergie juste au bon moment !

	Technologies	Capacité de stockage kWh par m <sup>3</sup>	Prix CHF par m <sup>3</sup>	Prix CHF par kWh de capacité de stockage	Prix de l'énergie Pour une saison de stockage CHF par kWh	Disponibilité de la ressource	Cycles de charges	Durabilité en années
Electricité	Batterie Lithium-Ion	400	160'000.--	400.--	40.--	Très critique	500 à 1000	5 à 10
	Batterie au plomb	125	15'000.--	150.--	20.--	Très critique	500 à 1000	5 à 10
	Barrages Pompage-turbinage	2.7 (Hauteur de chute 1000 m)	135.--	50.--	0.50	Bonne	illimité	> 100
Thermique	Eau Accumulateur thermique (citerne d'acier)	70 (pour Delta T 60°C)	500.--	7.--	0.10	Bonne	illimité	75

Les chiffres donnés sont des valeurs actuelles relatives au stockage effectif basé sur un volume de stockage de 1m<sup>3</sup> (prix de gros net). Les coûts ne se rapportent qu'au prix du stockage d'énergie (sans l'infrastructure nécessaire ni les systèmes de transformation)<sup>rajouté suite à la réponse de M. Widmer, Jenni Energietechnik</sup> et sont donnés à titre indicatif. Les coûts peuvent varier fortement, en particulier pour les batteries, en fonction du progrès technologique mais aussi des pénuries de matière premières, de l'augmentation de la demande, etc. Les rendements de cycles charge-décharge sont de de l'ordre de 60 à 90% et sont également dépendant de la batterie comme de l'intensité de la charge ou de la décharge, ce qui peut raccourcir considérablement l'espérance de vie des batteries. Bei den angegebenen Zahlen handelt es sich um relative momentane Richtwerte (Netto Grosshandelskosten) des effektiven Speichers, bezogen auf 1 Kubikmeter Speichervolumen. Die Kosten weisen nur den Preis für die Energiespeicherung aus und müssen im konkreten Einzelfall abgeklärt werden. Vor allem bei Batterien können sich die Kosten durch Technologiesprünge, aber auch durch Rohstoffverknappungen, gestiegene Nachfrage etc. massiv ändern. Die Lade-Entlade-Wirkungsgrade liegen im Bereich von 60 - 90% und sind bei Batterien auch abhängig davon, wie intensiv sie geladen oder entladen werden, was ihre Lebenserwartung massiv verkürzen kann.

### Conclusion:

La capacité de stocker temporairement l'énergie pour une utilisation lors d'une phase de faible production doit être massivement augmentée. Pour une mise en œuvre réussie de la transition énergétique, des technologies de stockage écologiques éprouvées et abordables sont nécessaires. Die Kapazitäten, um Energie zwischenspeichern für eine spätere Nutzung in einer Phase mit wenig Energieangebot, müssen massiv erhöht werden. Zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende sind erprobte, bezahlbare und umweltfreundliche Speichertechnologien nötig.

Seul des batteries permettent un stockage local de l'énergie électrique. En tenant compte des conditions actuelles (impact sur l'environnement, les besoins en ressources, la durée de vie, la cyclabilité, les coûts), cette idée paraît absurde et avec un potentiel très limité. La seule façon envisageable actuellement pour stocker l'électricité renouvelable et ainsi utiliser les pics de productions, consiste à construire de grandes centrales de pompage-turbinage. Eine örtliche Speicherung elektrischer Energie ist nur in Batterien möglich. Mit den vorhandenen Randbedingungen (Umweltbelastung, Ressourcenaufwand, Lebensdauer, Zyklierfähigkeit, Kosten) ist dies jedoch eine absurde Idee mit sehr beschränktem Potential. Die aktuell einzige praktikable Möglichkeit, erneuerbaren Strom zu speichern und so die Produktionsspitzen auszunutzen, besteht im Bau von grossen Pumpspeicherkraftwerken.

En outre, à notre avis les installations solaires thermiques avec accumulation sont une technologie respectant l'environnement comme la disponibilité des ressources ainsi que la préservation du paysage. Des Weiteren sind dezentrale Solarthermieanlagen mit Wasserwärmespeichern unserer Meinung nach die umweltschonendste Technologie, sowohl in Bezug auf Ressourcenverschleiss wie auch Landschaftsschonung.

Dans cette courte présentation, il n'était pas possible de présenter toutes les possibilités de stockage de l'énergie. Nous voulions seulement montrer ce qui est faisable et ce qui appartient au domaine des désirs et des illusions. In dieser kurzen Form ist es nicht möglich, die Energiespeicherung allumfassend darzustellen. Wir möchten aber aufzeigen, was realisierbar ist und was in den Bereich der Wünsche und Illusionen gehört. Ergänzend zur Speicherung müssen auch Themen wie Energiesparen und Energieeffizienz (z.B. Abwärmerückgewinnung und dass die richtige Energie am richtigen Ort eingesetzt wird) konsequent umgesetzt werden.

Traduit par Patrice Pasquier pour Sebasol , septembre 2013

« Die Energiewende ist eine Speicherfrage » édité par la société Jenni Energietechnik AG

Josef Jenni / Jenni Energietechnik AG / T +41 34 420 30 00 / [www.jenni.ch](http://www.jenni.ch)

#### Commentaires de Sebasol

Outre la question de l'infrastructure nécessaire et des systèmes de transformation, l'article élude un point : le coût de stockage de l'électricité et la chaleur ne peuvent être directement comparées en termes de coût du kWh stocké, vu qu'il s'agit d'énergie différentes. Leur qualité n'est pas la même. La chaleur ne peut être transformée en électricité facilement, et le nombre de kWh d'électricité obtenue avec de la chaleur est toujours inférieur au nombre de kWh de chaleur. Ce qui règle la transformation est l'ancienne et célèbre et toujours actuelle Loi de Carnot. Par contre l'électricité est une énergie dite noble, dans le sens qu'on peut tout faire avec, y compris donc de la chaleur. Il y a pour cela un nombre important de méthodes, des plus stupides aux plus futées. Ainsi pour la chaleur à basse/moyenne température pour l'eau chaude sanitaire ou le chauffage

- digne du Darwin Award en terme de stupidité est le radiateur électrique, qui avec 1 kWh d'électricité produit 1 kWh de chaleur.
- une méthode un petit peu mais à peine moins stupide (un demi Darwin Award ?), consiste à utiliser l'électricité pour "pomper la chaleur" de l'environnement, au moyen d'une machine qui s'appelle pompe à chaleur (PAC en français, WP en allemand). Avec une bonne machine on produit 4 kWh de chaleur avec 1 kWh d'électricité. Avec une mauvaise 2.
- bien plus avisé consiste à utiliser l'électricité pour permettre des processus de combustion de ressources renouvelables, comme le bois. Ainsi dans un poêle hydraulique, avec 1 kWh d'électricité utilisé dans le circulateur (= la pompe) et la régulation qui font tourner l'eau dans l'échangeur qui est dans la chambre de combustion du poêle, on tire de 50 à 100 kWh de la combustion du bois. Cette méthode a cependant le défaut de s'appuyer sur une ressource, le bois, qui n'est pas illimitée, renouvelable oui mais à l'échelle de 30 ans, certes neutre en bilan CO2 mais dont la combustion produit des particules fines. Et il faudrait alors ajouter le coût du bois.
- et enfin il y a la méthode la plus futée trouvée à ce jour : le capteur solaire thermique, qui tire une ressource renouvelable, disponible partout, CO2 neutre (en exploitation), et qui ne produit aucune pollution. C'est la chaleur de capteurs solaires thermiques que Jenni Energietechnik stocke de l'été à l'hiver dans ses locatifs à 100% de couverture solaire pour l'eau chaude et le chauffage. Et enfin, le soleil n'envoie pas de facture (note : il ne faut pas confondre le soleil avec l'Etat, qui a parfois la fâcheuse tendance de se prendre pour lui, au point qu'un roi qui affirmait que l'Etat c'était lui se disait soleil). A Sebasol, nous avons déjà atteint une production de 200 kWh de chaleur pour 1 kWh d'électricité investie. Si tout va bien, certaines de nos installations vont atteindre 300, et à terme on pourrait dépasser les 400.

Comment donc comparer ce qui a priori ne l'est pas ? En comparant un même service rendu, à savoir la chaleur pour l'eau chaude et le chauffage, domaine dans lesquels Jenni Energietechnik travaille. Ici donc en transformant l'électricité stockée en chaleur et en comparant le prix de la chaleur ainsi produite à la demande à partir de cette électricité stockée. Pour cela il convient de choisir une méthode de transformation. Des 4 ci-dessus le radiateur électrique est vraiment trop bête, le poêle hydraulique nécessite du bois, et le capteur solaire thermique ne peut pas produire à la demande (il faut justement stocker cette chaleur, soit la ligne "eau" du tableau précédent). Reste donc la PAC. Si avec une PAC je transforme en chaleur l'électricité stockée, j'obtiens le service d'avoir de la chaleur à la demande mais à partir d'un stockage d'électricité. Si je prends le rapport de 4 cité plus haut, cela diminue le coût du stockage pour l'objectif d'avoir de la chaleur. Au mieux, avec une PAC de perlimpinpin qui ne coûte rien, cela le diminue d'un facteur 4. Dans la réalité, s'ajoute le coût et l'entretien de la PAC, amorti sur sa durée de vie et le nombre de kWh de chaleur produit, et le gain est inférieur à 4.

Dans un premier temps si on néglige d'ajouter le coût de la PAC durant sa durée de vie sur chaque kWh produit, alors le tableau devient

	Technologies	Capacité de stockage kWh par m <sup>3</sup>	Prix CHF par m <sup>3</sup>	Prix CHF par kWh de capacité de stockage	Prix de l'énergie <b>chaleur</b>  Pour une saison de stockage CHF par kWh	Disponibilité de la ressource	Cycles de char- ges	Durabilité en années
Electricité	Batterie Lithium-Ion + PAC	400	160'000.--	400.--	10.-	Très critique	500 à 1000	5 à 10
	Batterie au plomb + PAC	125	15'000.--	150.-	5.-	Très critique	500 à 1000	5 à 10
	Barrages Pompage-turbinage + PAC	2.7 (Hauteur de chute 1000 m)	135.--	50.-	0.125	Bonne	illimité	> 100
Thermique	Eau Accumulateur thermique (citerne d'acier)	70 (pour Delta T 60°C)	500.--	7.-	0.10	Bonne	illimité	75

La colonne importante pour la comparaison, même si les autres sont nécessaires dans une optique multicritère, est celle encadrée. Elle seule compare le coût d'un même service.

Dans un deuxième temps si on considère qu'une PAC a une durée de vie de 15 ans, qu'elle coûte 50'000.- avec les sondes (nécessaires pour avoir un facteur de transformation de 4), ceci pour produire 15'000 kWh par an dans une maison actuelle typique (15'000 kWh/an = 1'500L de mazout équivalent/an), et qu'on néglige l'entretien ou les réparations, alors l'amortissement cash (= sans coût de l'argent du à l'emprunt) du système de transformation électricité-chaleur qu'est la PAC vaut pour cette maison  $50'000/(15*15'000) = 0.22$  CHF/kWh qui se rajoutent au coût du service, à savoir le kWh de chaleur. Le tableau devient

	Technologies	Capacité de stockage kWh par m <sup>3</sup>	Prix CHF par m <sup>3</sup>	Prix CHF par kWh de capacité de stockage	Prix de l'énergie <b>chaleur</b>  Pour une saison de stockage CHF par kWh avec amortisse- ment PAC	Disponibilité de la ressource	Cycles de char- ges	Durabilité en années
Electricité	Batterie Lithium-Ion + PAC	400	160'000.--	400.-	10.22	Très critique	500 à 1000	5 à 10
	Batterie au plomb + PAC	125	15'000.--	150.-	5.22	Très critique	500 à 1000	5 à 10
	Barrages Pompage-turbinage + PAC	2.7 (Hauteur de chute 1000 m)	135.--	50.-	0.345	Bonne	illimité	> 100
Thermique	Eau Accumulateur thermique (citerne d'acier)	70 (pour Delta T 60°C)	500.--	7.-	0.10	Bonne	illimité	75

Et dans ce cas de la chaleur domestique on se retrouve avec l'universelle Loi Anti-Shadok, qui en gros dit qu'il est mortel de faire compliqué quand on peut faire simple. Ou encore : pour avoir de la chaleur, il faut faire de la chaleur, pas de l'électricité pour faire de la chaleur, car le second principe de la thermodynamique va alors sévir. Ce principe, tout véritable scientifique le connaît. Mais il ne faut pas confondre un scientifique et un vendeur de systèmes. Les Systèmes Shadoks sont aimés des vendeurs de systèmes car ils coûtent chers, leur complication permettent des rentes de situation, et ils sont beaucoup plus soumis à l'obsolescence que les systèmes simples.