

# Les batteries. Une clé de la transition énergétique

Compendium sur la recherche, le développement, le potentiel et l'intégration système du stockage en batterie

Avec le soutien de



# Le Forum Stockage d'énergie Suisse

Le Forum Stockage d'énergie Suisse a été créé en 2014 à l'initiative de l'aeesuisse. Le Forum et ses partenaires du secteur économique et scientifique soutiennent la mise en œuvre des objectifs de politique climatique de la Suisse et de la Stratégie énergétique 2050, c'est-à-dire un système énergétique global rentable, neutre en carbone et renouvelable. Le Forum fait office de think tank et de plateforme de dialogue pour l'économie, la science et la politique. Il a pour mission de mettre à disposition des connaissances approfondies sur les diverses possibilités de stockage d'énergie et de mise en œuvre, sur l'utilisation des accumulateurs d'énergie dans l'intérêt du système et du climat, ainsi que sur les conditions-cadres et les modèles économiques permettant ce type de mise en œuvre. Le Forum Stockage d'énergie Suisse ne conçoit pas le stockage comme une fin en soi. Il est organisé de façon intersectorielle – chaleur, électricité, mobilité – et indépendante de toute technologie, et échange ouvertement avec d'autres organisations.

**[stockage.aeesuisse.ch](http://stockage.aeesuisse.ch)**

## **Forum Stockage d'énergie Suisse**

Falkenplatz 11  
Case postale  
3001 Berne

Téléphone : 031 301 89 62  
Fax : 031 313 33 22

E-mail : [speicher@aeesuisse.ch](mailto:speicher@aeesuisse.ch)

# Les batteries, ces chères inconnues

**Chère lectrice, cher lecteur,**

C'est sur un titre empreint d'humour – « Les batteries, ces chères inconnues » – que nous ouvrons ce compendium consacré aux principaux aspects des technologies de batteries, notamment à leur importance pour la mise en œuvre de la Stratégie énergétique 2050 et pour la poursuite du développement de la Suisse en tant que pôle économique. Il faut dire que beaucoup de méconnaissance et de scepticisme subsistent encore à l'égard de cette technologie permettant de stocker de l'électricité au moyen de procédés très différents.

Les débuts des batteries électrochimiques remontent pourtant au 18<sup>e</sup> siècle. Les connaissances et les technologies ont bien sûr énormément évolué depuis les découvertes de Luigi Galvani et d'Alessandro Volta.

Les batteries sont désormais fiables, abordables, flexibles et largement répandues : dans les bâtiments, dans le réseau électrique, dans les téléphones portables et, de plus en plus, dans les véhicules. De toute évidence, les batteries sont aussi variées que les applications qu'elles rendent possibles. Cependant, beaucoup ne sont pas forcément conscients du fait qu'une pile dans un jouet n'a pas grand-chose à voir avec une batterie de voiture électrique et encore moins avec une centrale de pompage-turbinage dans les montagnes suisses, si ce n'est que toutes trois ont pour but de fournir de l'énergie quand elle est requise. Un certain nombre de connaissances sont toutefois nécessaires si nous voulons poser dès aujourd'hui les jalons d'un stockage en batterie qui soit réellement en mesure de jouer son rôle dans la décarbonation du système énergétique.

« Les batteries sont en train de devenir le pétrole du 21<sup>e</sup> siècle » (« Batterien entwickeln sich zum Erdöl des 21. Jahrhunderts ») : ce titre de la Neue Zürcher Zeitung montre combien ce phénomène est important pour la Suisse en tant que place scientifique et économique, et que nous sommes probablement à l'orée d'une « ère des batteries ». Alors que la Suisse continue de privilégier le stockage d'électricité dans les lacs de barrage, d'autres pays mènent des recherches intensives sur de nouvelles technologies

de batteries et encouragent leur utilisation. La Suisse peut-elle rester spectatrice de cette course à l'innovation ? Quelles opportunités s'offrent aux entreprises suisses dans le circuit allant du développement au recyclage des batteries, en passant par leur utilisation ? Et de quoi ont-elles besoin pour en tirer profit ? En tant que think tank et plateforme de dialogue de l'économie, de la science et de la politique, le Forum Stockage d'énergie Suisse souhaite apporter une réponse à ces questions, et à bien d'autres encore concernant les batteries, mais aussi susciter le débat.

C'est pourquoi, ce compendium sera régulièrement complété et mis à jour – pourquoi pas avec vos contributions et suggestions ? Nous comptons sur vous !



**Thomas Nordmann**

Forum Stockage d'énergie Suisse  
Porte-parole de l'économie



**Dr Jonas Mühlethaler**

Forum Stockage d'énergie Suisse  
Responsable du groupe de travail  
« Stockage d'énergie électrique »

# Sommaire

## 9 Comment le stockage en batterie peut être mis « au service du réseau »

Dr Jonas Mühlethaler | Haute école de Lucerne, Competence Center Digital Energy and Electric Power

## 15 Le stockage en batterie devient intéressant pour les propriétaires privés

Dr Marius Schwarz | EPF de Zurich, Energy Science Center

## 21 Gestion intelligente de l'énergie et de la charge dans les bâtiments résidentiels

Thomas Nordmann | TNC Consulting AG

## 25 Les batteries méritent-elles leur mauvaise réputation ?

Marcel Gauch | Empa, Technology & Society Lab

## 35 Recyclage des batteries : état des lieux du secteur

Oliver Groux | Directeur du département Batteries de KYBURZ Switzerland AG

Marcel Gauch | Empa, Technology & Society Lab

## 41 Le rôle de la Suisse dans la chaîne de valeur globale des batteries de stockage

Christian Ochsenbein | Centre Stockage d'énergie de la BFH





# « Changer la donne »

La Suisse s'est fixé pour objectif de s'affranchir de l'énergie nucléaire ainsi que de ne plus émettre de gaz à effet de serre à partir de 2050. Cette décision a un impact considérable sur le système énergétique et les transports en Suisse. En raison de l'indispensable décarbonation, de nombreuses applications seront électrifiées.

Le stockage par batterie jouera un rôle central dans un avenir qui s'articule autour des énergies renouvelables, que ce soit comme moyen de stockage pour les voitures électriques ou pour optimiser l'intégration des sources d'énergie renouvelables (par exemple pour utiliser l'électricité solaire en soirée). Il faut imaginer que chaque voiture électrique représente une batterie d'une capacité d'environ 40 à 100 kWh connectée au réseau, ce qui correspond approximativement aux besoins actuels d'électricité d'un ménage de quatre personnes pendant trois à huit jours. En supposant par exemple qu'un million de voitures électriques circulent sur les routes suisses (environ 1/5 du parc automobile actuel), on obtient une capacité de stockage couplée au réseau environ 5 à 10 fois supérieure à la capacité de l'ensemble des centrales hydroélectriques à accumulation de Suisse. Cela représente un volume phénoménal. Les batteries sont donc vraiment en mesure de « changer la donne ». La chute actuelle des prix des batteries de stockage ne fait qu'accélérer les choses : alors qu'en 2010 une batterie lithium-coûtait 1200 USD/kWh, en 2021 on en trouvait dès 132 USD/kWh chez les grossistes.<sup>1</sup>

Chez Forum Stockage d'énergie Suisse, nous sommes convaincus que le rôle du stockage par batterie dans la

transition énergétique reste encore largement sous-estimé. Le stockage par batterie permet une mobilité sans carbone et une intégration efficace des sources d'énergie renouvelables. La multiplication des sources d'énergie renouvelables décentralisées et l'intégration optimale des batteries de stockage dans le réseau vont bouleverser le système électrique – au meilleur sens du terme !

Intégrer au réseau électrique des batteries de stockage de façon bénéfique au système est toutefois loin d'être banal et ne se fera pas « tout seul ». Pour les propriétaires de maisons, il est déjà difficile de répondre à la question de savoir si investir dans une batterie stationnaire est pertinent dès aujourd'hui ou s'il vaut mieux attendre. Le sujet est encore plus délicat pour les opérateurs de réseau ou les autorités de régulation : comment intégrer les batteries de stockage de façon à obtenir un système énergétique efficace, écologique, robuste et finançable ? Comment concevoir des réglementations appropriées ? Le présent compendium aborde précisément ces questions. Le débat (public) reste dominé par l'écobilan prétendument « catastrophique » des batteries ou par de fortes réserves quant à leur sécurité. C'est pourquoi, ce compendium se penche également sur l'état réel de cet éco-

bilan, sur la manière dont le recyclage et une économie circulaire pertinente apportent des améliorations, ainsi que sur le rôle que la Suisse joue ou pourrait jouer dans la recherche, le développement et la fabrication de technologies de batteries d'avant-garde. Une chose est d'ores et déjà certaine :

le stockage par batterie n'est pas seulement un élément clé de la transition énergétique, mais aussi un domaine d'avenir pour la Suisse en tant que place scientifique et économique. À nous de savoir reconnaître cette opportunité et de la saisir !

Étant donné que les connaissances sur les batteries évoluent de façon plus rapide et plus radicale que peu d'autres domaines, ce compendium a volontairement été conçu comme un recueil d'articles sur différentes thématiques pertinentes.

Il n'est donc pas exhaustif, mais continuera d'être régulièrement actualisé et complété de nouvelles contributions. Ce compendium met en lumière les aspects sociaux, économiques, techniques, politiques et écologiques dans une perspective globale. Afin d'offrir une vue d'ensemble la plus complète possible, il comprend également des articles sur les batteries de stockage non électrochimiques. Rédigées par des expertes et experts, les contributions ont été soumises à une évaluation collégiale par le groupe de travail « Stockage d'énergie électrique » du Forum Stockage d'énergie Suisse.

Le compendium s'adresse au grand public intéressé, aux instances politiques et à l'administration. Nous essayons de traiter de manière compréhensible des sujets complexes en nous appuyant sur des bases scientifiques. Cette démarche est assortie d'exigences strictes visant à s'inscrire dans le contexte d'une intégration des batteries de stockage qui soit bénéfique pour le système et donc pour la mise en œuvre de la Stratégie énergétique 2050.

Nous vous souhaitons une bonne lecture !

Pour les autrices et auteurs

**Dr Jonas Mühlethaler**

Forum Stockage d'énergie Suisse  
Responsable du groupe de travail  
« Stockage d'énergie électrique »







# Comment le stockage en batterie peut être mis « au service du réseau »

Octobre 2022

L'utilisation optimale des moyens de stockage de l'énergie est essentielle pour réussir la transition énergétique. Cela comprend notamment aussi leur contribution à une exploitation fiable et efficace des réseaux de transport et de distribution. Il est impératif pour cela que les batteries tiennent compte de la situation du réseau lors de la charge et de la décharge.

**Dr Jonas Mühlethaler** est chargé de cours et directeur adjoint du centre de compétences « Digital Energy & Electric Power » de la Haute école de Lucerne. À la HSLU, il fait de la recherche dans le domaine des systèmes énergétiques intelligents, notamment sur des thèmes comme l'intégration des moyens de stockage de l'énergie, la numérisation (p. ex. l'utilisation de DLT/blockchain), les micro-réseaux, etc. Avant d'enseigner, il travaillait dans le secteur suisse de l'électricité, d'abord en tant que conseiller, puis en tant que responsable R&D chez Swissgrid. À ce dernier poste, il gérait le portefeuille R&D à l'échelle de l'entreprise ainsi que différents projets R&D. Jonas Mühlethaler dirige le groupe de travail « Stockage d'énergie électrique » du Forum Stockage d'énergie Suisse.





Le futur système énergétique aura une forte composante décentralisée. Cela s'explique par l'essor croissant des sources d'énergie renouvelables décentralisées, des systèmes électrochimiques de stockage d'énergie décentralisés (stationnaires ou dans des voitures électriques connectées au réseau) et par l'électrification des consommateurs.

L'un des principaux défis de la décentralisation sera de garantir à tout moment la sécurité de l'approvisionnement dans le contexte de flux énergétiques géographiquement et temporellement variables. Les gestionnaires de réseau auront besoin de nouvelles solutions techniques pour limiter les goulets d'étranglement sur le réseau et maintenir la tension et la fréquence dans une plage admissible. Le stockage en batterie peut apporter une contribution non négligeable à cet effet.

Parce qu'il est bon marché et bien accepté par la population, le photovoltaïque sera sans doute amené à jouer un rôle très important. D'un point de vue théorique, si la totalité de la production nucléaire annuelle, qui atteint actuellement environ 23 TWh<sup>1</sup>, était remplacée par du photovoltaïque, cela représenterait une puissance photovoltaïque installée d'environ 23 GW<sup>2</sup>. Cette puissance correspondrait approximativement à 2,8 fois la charge maximale de l'ensemble des consommateurs de Suisse<sup>3</sup>. En l'absence de mesures d'accompagnement, cela se traduirait par une charge considérable pour le réseau électrique lors d'une journée d'été ensoleillée :

- Au sein du réseau électrique, de forts pics de puissance peuvent entraîner des surcharges et des problèmes de tension à tous les niveaux du réseau.
- La puissance injectée doit trouver preneur, sinon la fréquence du réseau augmente.

L'abandon de l'énergie nucléaire peut bien entendu être compensé par d'autres sources d'énergie renouvelables ou par des importations, c'est-à-dire que la capacité photovoltaïque installée pourrait être plus faible. Il faut néanmoins s'attendre à un développement considérable. Une étude de l'Office fédéral de l'énergie OFEN estime le potentiel photovoltaïque de la Suisse à 67 TWh/an<sup>4</sup>.

## Le stockage en batterie n'est qu'une solution parmi d'autres, mais il ne cesse de gagner en importance

Il existe de nombreuses possibilités d'écarter les pics de puissance qui surviennent et d'éviter ainsi une surcharge du système. Les approches sont par exemple l'utilisation d'accumulateurs d'énergie, la maîtrise de la demande (Demand Side Management) et la régulation de l'injection photovoltaïque. Avec la télécommande centralisée, la maîtrise de la demande en énergie (Demand Side Management) a une longue tradition en Suisse, par exemple avec les chauffe-eaux électriques qui sont principalement activés la nuit. Ce concept peut être « modernisé » et

### **Utilisées à bon escient, les batteries peuvent réduire le recours au réseau électrique et, par conséquent, le coût de celui-ci.**

développé sans que les utilisateurs-trices ne ressentent de restrictions, par exemple en rechargeant les voitures électriques lorsque la production d'électricité est élevée.

Nous allons nous intéresser ci-après à la solution du « stockage en batterie ». Les conclusions s'appliquent toutefois aussi à la maîtrise de la demande en énergie (Demand Side Management ou DSM) : en effet, les charges concernées par le DSM sont souvent aussi des accumulateurs d'énergie (les chauffe-eaux sont des accumulateurs thermiques, les voitures électriques sont des « batteries roulantes »).

Si le stockage d'énergie est utilisé à bon escient, il peut en résulter un système énergétique plus efficace, plus écologique, plus robuste et – à brève échéance – moins coûteux que le système actuel.

Solutions envisageables pour le stockage en batterie :

### **Solution 1 : Consommer sur le lieu de production**

Un stockage en batterie associé à un système photovoltaïque permet aux client·e·s finaux d'atteindre un degré élevé d'auto-alimentation (individuellement ou dans le cadre d'un réseau de quartier). Le recours à une batterie permet aux client·e·s finaux de consommer le soir l'électricité autoproduite en journée, en puisant dans la batterie. Les consommateurs ayant un taux d'auto-alimentation élevé ont besoin de raccordements au réseau moins puissants. Il convient toutefois de noter qu'un taux d'auto-alimentation élevé ne peut aller de pair avec un raccordement réseau moins puissant qu'à condition que la batterie tienne compte de l'état du réseau comme critère de décision lors de la charge et de la décharge (par exemple en répartissant le recours à la batterie tout au long de la journée, afin d'éviter que le stockage en batterie ne soit déjà saturé dès le matin). Utilisées à bon escient, les batteries peuvent réduire le recours au réseau électrique et, par conséquent, le coût de celui-ci, grâce à un réseau de distribution conçu et réalisé de façon moins dense et utilisant moins de cuivre. Cela ne fonctionne toutefois qu'à condition que le système batterie/photovoltaïque soit conçu et régulé de manière à écrêter efficacement les pics de consommation. À cet effet, il faut des mécanismes d'incitation adéquats, qui encouragent une utilisation réduite du réseau sans mettre en péril son financement.

### **Solution 2 : Délestage et stabilisation du réseau grâce au stockage en batterie**

Ce qui a été décrit ci-dessus à petite échelle (« réduction des pics de charge chez les consommateurs finaux ») fonctionne également à grande échelle. En Australie, dans l'État de Victoria, une batterie a par exemple été installée pour le réseau à très haute tension, où elle sert à divers usages, notamment à soulager le réseau de transport du courant. Si l'injection d'énergie renouvelable devient trop importante dans une région et menace de surcharger le réseau électrique, cette énergie peut être temporairement stockée dans la batterie.<sup>5</sup> En Suisse, une application similaire pourrait être le stockage intermédiaire de flux de charge non planifiés en provenance du réseau européen. Selon la Société nationale pour l'exploitation du réseau Swissgrid, les flux de charge non planifiés qui traversent la Suisse menacent de plus en plus la stabilité du réseau.<sup>6</sup>

### **Solution 3 : Fourniture d'énergie de réglage**

L'énergie de réglage est un autre service important que peut fournir le stockage d'énergie électrique. Le réseau électrique européen fonctionne en courant alternatif à une fréquence de 50 hertz. La fréquence du réseau est un bon indicateur pour savoir si la production et la consommation sont équilibrées au sein du réseau électrique. Si la production d'électricité est supérieure à ce qui peut être consommé ou stocké, la fréquence du réseau augmente ; à l'inverse, en cas de pénurie d'électricité, la fréquence du réseau diminue, ce qui peut entraîner un black-out dans les cas extrêmes. En Suisse, Swissgrid veille à ce que cet équilibre soit garanti à tout moment, en utilisant à cet effet de l'énergie dite de réglage. Sur mandat de Swissgrid, les centrales électriques ou les accumulateurs peuvent adapter l'injection ou le prélèvement d'électricité de manière à équilibrer le bilan du système. Ce service gagnera en importance à l'avenir car, en raison du nombre croissant de sources d'électricité dépendantes des conditions météorologiques et peu flexibles (éolien, solaire) qui injectent leur production dans le système, il sera plus difficile de maintenir l'équilibre du système. Le stockage d'énergie électrique, par exemple via les centrales de pompage-turbinage, est déjà très important en Suisse. Si davantage d'énergie de réglage est nécessaire, de nouveaux systèmes de stockage doivent être utilisés à cette fin. Le stockage en batterie est d'ores et déjà utilisé en Suisse pour l'énergie de réglage, par exemple chez EKZ à Dietikon.<sup>7</sup> La capacité de réaction rapide des batteries de stockage constitue un avantage de taille par rapport aux grandes centrales électriques. Grâce à des générateurs synchrones, les grandes centrales électriques relient au réseau des masses en rotation, aussi lourdes qu'imposantes. Une modification de la fréquence du réseau implique de modifier la vitesse de rotation de ces masses. Du fait de la grande inertie de ces masses, le système électrique se caractérise lui aussi par une inertie importante. Ces masses de centrales ont un effet stabilisateur sur le réseau et absorbent les petits écarts dans le bilan du système. Si de plus en plus de grandes centrales électriques, comme les centrales nucléaires et les centrales à charbon, sont déconnectées à l'échelle du réseau interconnecté européen, celui-ci perd cette inertie. Du fait de leur capacité de réaction rapide, les batteries peuvent compenser cette perte d'inertie du système et s'avèrent donc particulièrement adaptées pour fournir de l'énergie de réglage au futur système énergétique.

## Pour fonctionner dans l'intérêt du réseau, les batteries ont besoin de conditions claires

À condition d'être bien utilisés, les accumulateurs à batterie permettent de se doter d'un système électrique durable et efficace en termes d'énergie et de coûts. Les prix des batteries et des systèmes photovoltaïques qui continuent de baisser contribuent à une intégration rentable des sources d'énergie renouvelables dans le système énergétique. La mise en place et l'utilisation judicieuse d'un stockage en batterie sont toutefois soumises à un certain nombre de prérequis :

### Prérequis 1 : Égalité de traitement

Les installations d'accumulation par pompage bénéficient actuellement d'un traitement de faveur, puisqu'elles sont exonérées de redevance de réseau. Aucunement justifiée du point de vue du système, cette situation conduit à des aberrations : des batteries de stockage sont installées derrière le compteur électrique, où elles ne servent souvent qu'à optimiser l'autoconsommation et n'assurent donc aucun délestage du réseau (voir plus haut). Pour le réseau de distribution, des stockages de quartier pourraient également s'avérer pertinents, car ils pourraient non seulement favoriser l'autoconsommation en optimisant le réseau de quartier, mais aussi prendre en compte les spécificités du réseau de distribution. Cependant, si des redevances de réseau sont facturées pour l'électricité stockée à l'échelle du quartier, ce modèle économique perd tout son sens. C'est pourquoi, tous les dispositifs de stockage d'électricité qui ne sont pas directement raccordés à un consommateur final, et qui réinjectent donc l'énergie stockée dans le réseau électrique, doivent seulement payer la redevance de réseau à hauteur de la consommation nette puisée dans le réseau électrique

(pertes de stockage). Cela correspond au consensus de la branche (manuel « Dispositifs de stockage d'électricité » de l'AES) ainsi qu'aux exigences de la « Feuille de route pour le stockage de l'énergie » du Forum Stockage d'énergie Suisse<sup>8</sup> et devrait être repris en conséquence dans la loi. Les investisseurs et les exploitants de dispositifs de stockage d'électricité bénéficieraient ainsi d'une certaine sécurité juridique.

Un autre argument en faveur de la levée de cette discrimination est l'examen des applications possibles selon les différents emplacements des dispositifs de stockage d'énergie. L'illustration ci-dessous montre les applications possibles pour les solutions de stockage d'énergie en fonction de leur position dans le réseau.

À titre d'exemple, Swissgrid utilise le stockage d'énergie pour fournir de l'énergie de réglage ou, plus généralement, des prestations système, tandis qu'un client final utilise le stockage d'énergie pour optimiser l'autoconsommation. L'illustration ci-dessous indique quel type de stockage peut être utilisé pour chaque application en fonction de son emplacement au sein du réseau. Ainsi, une centrale de pompage-turbinage raccordée au réseau de transport ne peut être utilisée que pour les applications de type « gestion des congestions du RT », « fourniture de prestations système » et « arbitrage énergétique ». En revanche, un stockage par batterie situé derrière le compteur peut servir pour toutes les applications répertoriées, y compris pour le réseau de transport. La palette des applications d'un stockage décentralisé est donc plus étendue que celle d'un stockage raccordé au réseau de transport. Rien ne justifie par conséquent que le législateur favorise les centrales de pompage-turbinage sur le réseau de transport.

Groupe de clients	Applications de stockage	Emplacement du stockage dans le réseau		
		Réseau de transport (RT)	Réseau de distribution (RD)	Derrière le compteur
Swissgrid	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gestion des congestions du RT</li> <li>Fourniture de prestations système</li> </ul>			
GRD / Entreprises électriques	<ul style="list-style-type: none"> <li>Arbitrage énergétique</li> <li>Gestion des groupes-bilan</li> <li>Alternative Extension du réseau / gestion des congestions du RD</li> </ul>			
Clients finaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>Micro-réseaux</li> <li>Autoconsommation</li> <li>Alimentation sans interruption (ASI)</li> </ul>			



## Prérequis 2 : Usages multiples

Comme le montre l'illustration, les accumulateurs d'énergie peuvent être utilisés de façon très variée. Ils peuvent servir pour des applications énergétiques (p. ex. l'optimisation de l'autoconsommation) et pour des applications de réseau (p. ex. la gestion des congestions au sein du réseau). Cela rend la planification des dispositifs de stockage et leur utilisation optimale particulièrement complexe. La dissociation (« unbundling ») du système d'énergie électrique en une activité de monopole pour l'aspect « réseaux » et une activité libéralisée pour l'aspect « commerce d'énergie » rend la tâche encore plus ardue. Du fait de cette séparation, planifier et exploiter de façon homogène et optimale les réseaux, la production et le stockage s'avère très difficile<sup>9</sup>. D'un autre côté, un marché ouvert à la concurrence présente indéniablement des avantages, puisqu'il se traduit idéalement par des prix plus bas et une efficacité supérieure. Cette problématique a été reconnue par le législateur. Les regroupements de consommation propre (RCP) permettent une planification globale des aspects énergétiques et de réseau dans les immeubles collectifs, les réseaux de quartier et autres. Au niveau du réseau de distribution et de transport, ceci n'est toutefois pas (encore) autorisé.

## Le stockage d'énergie peut avoir des applications très variées.

Un usage optimal des moyens de stockage de l'énergie (voir leur usage multiple) est essentiel pour réussir la transition énergétique. Il s'agit de déterminer quelles approches (p. ex. basées sur le marché, sur la réglementation, etc.) permettent un usage optimal des moyens de stockage au sein d'un système énergétique dissocié.

Cet article a montré que le stockage en batterie jouera un rôle important dans le futur système énergétique, car il permet de multiples applications utiles au réseau tout en offrant une grande réactivité. Pour cela, il doit toutefois être mis sur un pied d'égalité avec les autres technologies de stockage ou de flexibilisation en général. L'avantage dont bénéficient encore les centrales de pompage-turbinage par rapport à d'autres modes de stockage bénéfiques pour le réseau doit être supprimé – de nombreux acteurs l'exigent. En outre, des solutions (techniques) et des réglementations doivent être élaborées afin de permettre un usage multiple du stockage en batterie pour des applications de réseau et d'énergie. À titre d'exemple, la réglementation actuelle sur les RCP va dans le bon sens, mais elle pourrait être étendue de manière à permettre à une communauté RCP d'utiliser le réseau de distribution.

---

1 strom.ch  
2 swissolar.ch  
3 swissgrid.ch  
4 bfe.admin.ch  
5 greentechmedia.com  
6 swissgrid.ch  
7 swisscleantech.ch  
8 [https://aeesuisse.ch/wp-content/uploads/2022/06/FESS\\_Roadmap\\_Speicher\\_2\\_220620\\_FR-1.pdf](https://aeesuisse.ch/wp-content/uploads/2022/06/FESS_Roadmap_Speicher_2_220620_FR-1.pdf)  
9 Ce sujet est traité en détail dans le document « Gutachten zum regulierungsrechtlichen Umgang mit Energiespeichern in der Schweiz » (Simone Walther pour le compte du Forum Stockage d'énergie Suisse, 17 octobre 2018).

---







# Le stockage en batterie devient intéressant pour les propriétaires privés

Octobre 2022

De nombreux propriétaires ne sont pas encore convaincus des avantages du stockage en batterie. Un encouragement ciblé et un cadre réglementaire approprié, par exemple avec une exemption de redevance d'utilisation du réseau, pourraient changer la donne.

**Dr Marius Schwarz** est post-doctorant à l'Energy Science Center de l'EPF de Zurich, où il dirige le projet Nexus-e, un projet de coopération entre quatre chaires visant à développer une infrastructure de modélisation des systèmes énergétiques. Ses recherches se concentrent sur le rôle des politiques publiques dans la transformation des systèmes énergétiques pour atteindre les objectifs climatiques et énergétiques. Auparavant, il a conclu son doctorat sous la direction du professeur Volker Hoffmann, au sein du groupe Durabilité et technologie.



Le stockage en batterie peut aider les propriétaires d'installations photovoltaïques à consommer une plus grande partie de l'électricité solaire autoproduite. Les « accumulateurs de courant solaire » engrangent l'électricité autoproduite, qui ne sert pas directement en journée, et la restituent en soirée, lorsque les besoins en électricité augmentent. Le stockage du courant solaire peut ainsi non seulement augmenter la rentabilité des investissements dans les installations photovoltaïques, mais aussi remplir une fonction d'importance pour le futur système énergétique : il contribue à faire coïncider la production et la consommation d'électricité – à la fois dans le temps et dans l'espace – et soutient ainsi l'intégration des nouvelles énergies renouvelables au système électrique. En limitant l'injection, les accumulateurs de courant solaire permettent également de soulager le réseau de distribution.<sup>1</sup>

## **Le stockage du courant solaire améliore non seulement la rentabilité des installations photovoltaïques, mais œuvre également en faveur du futur système énergétique.**

Les « Perspectives énergétiques 2050+ »<sup>2</sup> partent du principe que 70 % des installations photovoltaïques seront associées à des accumulateurs de courant solaire d'ici 2050. L'évolution en Allemagne montre qu'une multiplication par dix de la part actuelle de 7 %<sup>3</sup> n'est pas impossible. En effet, 60 % des nouvelles installations photovoltaïques y sont déjà combinées à un accumulateur de courant solaire. En Suisse, pour l'instant, ce n'est le cas que pour 12 % des nouvelles installations photovoltaïques.<sup>4</sup>

Nous allons à présent nous intéresser aux deux questions suivantes :

- Peut-on s'attendre en Suisse à une évolution similaire à celle de l'Allemagne, malgré des différences significatives dans les conditions-cadres réglementaires et politiques ?
- Comment les conditions-cadres politiques doivent-elles être adaptées si les valeurs cibles fixées ne sont pas atteintes ?

## **L'attractivité dépend de nombreux facteurs**

Alors que le développement des accumulateurs de courant solaire dépend de nombreux facteurs, tels que les informations mises à disposition (par les installateurs), la conscience environnementale des investisseurs et les effets de voisinage<sup>5</sup>, l'accent est mis ici sur la rentabilité de l'investissement dans un accumulateur de courant solaire. Les principaux facteurs d'influence sont les suivants :

- coûts d'investissement, qui se composent des coûts d'acquisition de l'accumulateur et des coûts d'installation ;
- quantité d'électricité solaire autoproduite qui est absorbée quotidiennement par l'accumulateur et utilisée ensuite pour couvrir les besoins en électricité du ménage ;
- coûts d'achat de l'électricité du réseau et rétribution de l'injection d'électricité solaire dans le réseau.

À cela s'ajoutent :

- le rendement de la batterie (combien de courant est « perdu » lors des processus de charge et de décharge de l'accumulateur ?) ;
- les frais de financement (l'acquisition de l'accumulateur de courant solaire nécessite souvent de contracter un crédit) ;
- la durée de vie de la batterie (la capacité d'une batterie diminue au fur et à mesure de son utilisation ; à partir d'une certaine perte de capacité, la batterie a atteint sa « fin de vie »).

Les mesures politiques peuvent influencer ces facteurs. Bien que les accumulateurs de courant solaire ne bénéficient pas (encore) de subventions à l'échelle nationale, certains cantons proposent une aide financière. Le canton d'Appenzell Rhodes-Extérieures soutient par exemple les accumulateurs de courant solaire jusqu'à 80 kWh avec un montant de base de 1000 CHF et un montant lié à la puissance de 300 CHF par kWh.

Une autre condition-cadre qui influence indirectement les investissements dans les accumulateurs de courant solaire est le tarif de rachat, qui fixe le montant de la rétribution de l'injection d'électricité solaire autoproduite dans le réseau de distribution. Alors qu'un tarif de rachat élevé augmente la rentabilité des investissements dans les installations photovoltaïques, il incite moins à consommer soi-même le courant solaire produit.

La différence entre le tarif d'achat (coût d'achat de l'électricité) et le tarif de rachat est particulièrement déterminante pour la rentabilité des accumulateurs de courant solaire. Si le tarif de rachat est égal au tarif d'achat, comme cela a longtemps été le cas en Californie<sup>6</sup>, le réseau électrique

peut être utilisé par les ménages comme un stockage virtuel, efficace à 100 % et gratuit. En Suisse, le tarif de rachat est fixé par les gestionnaires du réseau de distribution. Il s'élève en moyenne à 9,4 centimes par kWh de courant injecté (situation en 2022). À titre de comparaison, l'électricité achetée par les consommateurs finaux coûte en moyenne 21,2 centimes par kWh en 2022.

### Exemple de calcul de la rentabilité des accumulateurs de courant solaire

Dans l'hypothèse d'un accumulateur de courant solaire d'une capacité de 13,5 kWh (taille du Powerwall de Tesla), qui est entièrement chargé de courant solaire chaque jour et déchargé le soir avec un rendement de 90 %, les frais d'électricité peuvent être réduits de

$$13,5 \text{ kWh} \times (21,2 \text{ ct./kWh} - 8,1 \text{ ct./kWh}) \times 90 \% = 1,45 \text{ CHF/jour} = 530 \text{ CHF/an.}$$

Les 21,2 ct./kWh correspondent au coût moyen de l'électricité pour les consommateurs finaux et les 8,1 ct./kWh au tarif de rachat moyen en Suisse.

Les tarifs de rachat doivent être pris en compte dans ce calcul car, en l'absence d'accumulateur de courant solaire, l'électricité stockée serait injectée dans le réseau et rétribuée à ce titre. Sur une durée de vie de 10 ans (et en supposant que les tarifs de rachat, les prix de l'électricité et la capacité des batteries restent les mêmes), cela représente un bilan financier de 5300 CHF.

Avec les coûts d'investissement actuels de 10 200 CHF pour un Powerwall Tesla (hors frais d'installation et de maintenance) et des frais de financement de 5 %, on obtient une valeur capitalisée de -6100 CHF.

Par conséquent, même dans des conditions plus favorables qu'en réalité (les batteries ne sont pas chargées et déchargées quotidiennement, surtout en hiver), l'investissement dans un stockage en batterie n'est pas intéressant.

L'exemple de calcul présenté ci-contre montre que les accumulateurs de courant solaire constituent rarement un investissement rentable aujourd'hui. Cela s'explique notamment par les importants coûts d'investissement, qui s'élèvent à environ 1000 CHF par kWh<sup>7</sup> (situation en 2021). De plus, en Suisse, les coûts d'installation sont plus élevés que dans la plupart des autres pays.

Mais comment la situation va-t-elle évoluer d'ici 2050 ? Comme pour la plupart des technologies, les coûts des accumulateurs de courant solaire diminuent eux aussi avec l'augmentation de la production, en raison des effets d'échelle et d'apprentissage. Pour les batteries lithium-ion, par exemple, les prix ont traditionnellement baissé d'environ 15 % à chaque doublement de la quantité produite<sup>8</sup>. Entre 2010 et 2020, les prix des « battery packs » (éléments de base des accumulateurs de courant solaire) sont passés de 668 \$/kWh à 137 \$/kWh. En fin d'année dernière, des prix inférieurs à 100 \$/kWh ont même été signalés.<sup>9</sup> Cependant, personne ne sait comment la baisse des prix des « battery packs » se répercutera sur les prix de marché des accumulateurs de courant solaire. En Europe, on estime que les prix des accumulateurs de courant solaire baisseront à environ 300 €/kWh d'ici 2040.<sup>10</sup> Les batteries de seconde vie, à l'instar de celles de Kyburz, pourraient permettre de réduire encore davantage les coûts à moyen terme, même si pour l'instant leur niveau de prix reste similaire à celui du Powerwall de Tesla.<sup>11</sup> Outre le coût des accumulateurs de courant solaire, d'autres facteurs tels que le prix de l'électricité et les tarifs de rachat vont évoluer d'ici 2050.

À l'aide de la plateforme Nexus-e, l'Energy Science Center de l'EPF de Zurich a étudié les effets de ces évolutions sur la diffusion des accumulateurs de courant solaire. L'accent a été mis sur les ménages et l'augmentation du taux d'auto-consommation, en laissant de côté d'autres applications. L'un des enseignements de cette étude est que, dans les conditions-cadres actuelles (et de nombreuses autres hypothèses de modèles et de données), la part des installations photovoltaïques avec stockage d'électricité n'atteindra pas 70 % d'ici 2050, mais probablement plutôt 45 à 55 % (en fonction des coûts d'investissement et de financement envisagés). Cela correspondrait à une capacité totale de stockage d'énergie solaire de 7 GWh pour 18 GWc de systèmes photovoltaïques installés.

## Des outils polyvalents – mais des objectifs difficiles à atteindre

Quelles sont les possibilités d'ajustement des conditions-cadres politiques pour atteindre l'objectif de 70 % d'installations photovoltaïques avec stockage de courant solaire ? L'Energy Science Center a notamment testé les effets de deux leviers : les tarifs de rachat et la rétribution unique.

### Tarifs de rachat

Comme supposé plus haut, les résultats de ces modélisations montrent eux aussi que des tarifs de rachat élevés réduisent la part d'électricité solaire stockée. Une augmentation de 50 % du tarif de rachat (8,1 ct./kWh actuellement) réduit la part du stockage de courant solaire de 50 à 42 %. Dans ce modèle, il apparaît en outre que seul un tarif de rachat fixé à 0 centime permettrait d'atteindre une part de 70 % de stockage de courant solaire.

Mais attention : ce pourcentage ne résulte pas d'une augmentation du nombre d'accumulateurs de courant solaire installés (la capacité installée reste en effet la même), mais de la diminution du nombre de systèmes photovoltaïques installés. L'impact des tarifs de rachat sur le stockage d'électricité solaire n'est donc pas marginal. Des tarifs de rachat bas augmentent la rentabilité des accumulateurs de courant solaire, mais diminuent la rentabilité des installations photovoltaïques.

### Rétribution unique

Comme pour les installations photovoltaïques (et les autres énergies renouvelables), une rétribution unique serait une mesure envisageable pour encourager le stockage de l'électricité solaire (plusieurs cantons ont d'ailleurs déjà retenu cette solution). Dans notre modèle, nous avons tablé sur une rétribution unique qui permettrait de réduire le coût de l'investissement de jusqu'à 30 %. Il apparaît toutefois que même avec des subventions aussi conséquentes, la capacité installée d'accumulateurs de courant solaire n'atteindrait qu'un peu plus de 60 %.

D'après notre étude, même en présence de conditions-cadres politiques favorables, il serait très difficile d'atteindre une part de 70 % d'accumulateurs de courant solaire avec les installations photovoltaïques.

## En servant à des applications multiples, le stockage en batterie pourrait être rentable dès aujourd'hui sans la moindre subvention publique.

Jusqu'à présent, un aspect important a cependant été négligé : outre l'augmentation de la part d'autoconsommation, les accumulateurs de courant solaire peuvent également servir à d'autres applications, comme la participation au marché de l'énergie de réglage, la mise à disposition de services réseau ou encore l'arbitrage de prix de l'électricité dynamiques.<sup>12</sup> À condition d'être utilisé pour plusieurs applications, le stockage en batterie serait dès aujourd'hui un investissement rentable, sans la moindre subvention publique.<sup>13</sup> Leur regroupement en centrales électriques virtuelles<sup>14</sup> permettrait notamment aux accumulateurs à batterie de réduire les pointes de charge et de limiter les situations critiques locales ou les congestions sur les réseaux de transport et de distribution.

## Des règles du jeu identiques pour tous

Jusqu'à présent, les exigences réglementaires empêchent toutefois de profiter des différentes applications possibles avec les accumulateurs de courant solaire. Une exemption de redevance d'utilisation du réseau (comme pour les centrales de pompage-turbinage) serait notamment un important prérequis. Depuis un certain temps déjà, une exemption de redevance d'utilisation du réseau est sollicitée pour tous les systèmes de stockage (quelle que soit la technologie utilisée). Jusqu'à présent, cette requête a cependant été rejetée au motif qu'une exonération suppose que le dispositif de stockage soit bénéfique pour le réseau, une condition qui ne serait pas toujours remplie par les stockages décentralisés.

Dans le cas des centrales de pompage-turbinage, les mécanismes de prix sur le marché de l'électricité coïncident avec un comportement bénéfique pour le réseau, car les prix de gros sont un indicateur approprié de l'état du réseau de transport. La charge et la décharge des accumulateurs décentralisés n'améliorent cependant pas toujours l'état du réseau de distribution, par exemple lorsque l'accumulateur est déjà entièrement chargé avant la mi-journée. Par ailleurs, l'exploitation des accumulateurs de courant solaire pour la gestion des congestions dans les réseaux de distribution reste souvent difficile en raison du faible nombre de systèmes de mesure installés, empêchant de connaître clairement l'état du réseau. Outre les prescriptions réglementaires, il faut davantage axer la recherche sur les autres facteurs ayant un impact sur les accumulateurs de courant solaire : l'interaction entre le stockage stationnaire (accumulateurs de courant solaire) et le stockage mobile (batteries des véhicules électriques) est par exemple un facteur important. Parviendront-ils à s'harmoniser ou les batteries automobiles vont-elles supplanter les batteries de stockage ?

Ainsi, les voitures électriques achetées comme deuxième voiture et qui, de ce fait, sont immobilisées à domicile une grande partie du temps, pourraient stocker l'électricité solaire autoproduite par le foyer et rendre superflue une batterie de stockage stationnaire. Un autre domaine sur lequel la recherche devrait se concentrer davantage est le rôle des accumulateurs de courant solaire dans les solutions de quartier. Un regroupement de consommation propre (RCP)<sup>15</sup> permet par exemple d'accroître la part d'autoconsommation de l'électricité solaire – même en l'absence de

## Les incitations financières ne sont pas seules à pouvoir inciter les ménages à investir dans le stockage en batterie et les technologies durables en général.

stockage par batterie.

Enfin, il convient de souligner une fois de plus que les incitations financières ne sont pas l'unique facteur susceptible d'inciter les ménages à investir dans le stockage en batterie et dans les technologies durables en général. On peut par conséquent se demander si des subventions plus élevées et des champs d'application supplémentaires suffiront à augmenter la proportion d'accumulateurs de courant solaire. Une campagne d'information pourrait s'avérer tout aussi utile pour faire comprendre que les accumulateurs de courant solaire sont un élément important sur la voie d'un approvisionnement énergétique renouvelable, décentralisé et sûr.

1 voir aussi l'article « Comment le stockage en batterie peut être mis "au service du réseau" » dans ce compendium

2 Perspectives énergétiques 2050

3 Swissolar

4 BFE

5 iopscience.iop.org

6 cpuc.ca.gov

7 cleanenergyreviews.info

8 nature.com

9 about.bnef.com

10 publications.jrc.ec.europa.eu

11 kyburz-switzerland.ch

12 cf. l'article « stockage au service du réseau » dans ce compendium

13 nature.com

14 p. ex. sonnengroup.com

15 pubdb.bfe.admin.ch







# Gestion intelligente de l'énergie et de la charge dans les bâtiments résidentiels

Octobre 2022

Dans les bâtiments résidentiels, les accumulateurs jouent plusieurs rôles : ils améliorent le degré d'auto-alimentation et permettent un fonctionnement bénéfique pour le réseau. L'article ci-après est un « rapport d'atelier » issu de la pratique.

**Thomas Nordmann**, un des pionniers suisses du solaire, s'intéresse à l'exploitation pertinente de l'énergie solaire et à l'utilisation rationnelle de l'énergie depuis 1974. En 1985, il a fondé la société TNC Consulting AG, qui a conçu, planifié et construit dès 1989 la première installation photovoltaïque de 100 kW au monde, installée sur les murs antibruit le long de l'autoroute A13 près de Coire. Avec sa filiale Effienergie AG de Zurich, TNC Consulting AG s'occupe depuis 2010 de la mise en œuvre du Programme national Bâtiments dans 13 cantons et de cinq programmes d'efficacité électrique ProKW. La société a été trois fois lauréate du Prix Solaire Suisse (1994, 1998 et 1999) et s'est vu décerner le Prix Solaire Européen 1997. Thomas Nordmann est porte-parole de l'économie pour le Forum Stockage d'énergie Suisse et représente l'initiative au sein du comité directeur de l'aeesuisse.



Grâce au photovoltaïque, les bâtiments d'habitation passent du statut de consommateurs d'énergie à celui de producteurs. Les bâtiments modernes conjuguent ainsi :

- efficacité énergétique,
- production PV intelligente,
- gestion et stockage d'énergie thermique,
- électromobilité et stockage en batterie.

Le recours à un système intelligent de gestion de l'énergie et de la charge, en guise de « tête pensante » du bâtiment, permet de réguler et d'optimiser la production photovoltaïque et la consommation d'électricité. La gestion des charges en présence peut contribuer à réduire les besoins de stockage supplémentaires au moyen de batteries qui restent coûteuses à l'heure actuelle, tout en optimisant l'autoconsommation et les services réseau, et en augmentant ainsi le rendement PV potentiel.

## Toujours plus d'électricité

Pour permettre un meilleur déploiement du marché national du photovoltaïque, il convient de prendre en compte le parc immobilier résidentiel. En Suisse, la demande de cette catégorie de consommateurs est responsable de plus de 50 % de la consommation d'énergie nationale, en incluant le chauffage, l'eau chaude et la mobilité privée (qui emploie encore majoritairement des voitures à carburants fossiles). Une forte puissance photovoltaïque installée génère un surplus d'électricité en été, mais pendant les trois mois d'hiver, le photovoltaïque reste insuffisant à lui seul pour assurer l'approvisionnement.

La Suisse et de nombreux autres pays continuent d'électrifier leur système énergétique : les chauffages fossiles sont remplacés par des pompes à chaleur électriques et la mobilité est convertie aux motorisations électriques.

Cela signifie que des consommateurs d'électricité supplémentaires viennent s'ajouter aux usages actuels de l'électricité dans les bâtiments résidentiels pour l'éclairage, la cuisine, la lessive, la ventilation, les télécommunications et d'autres appareils électriques. En matière de photovoltaïque, une habitation idéale se caractérise par une part maximale de PV dans la consommation totale d'énergie, c'est-à-dire un maximum d'autoconsommation. Elle utilise ainsi le photovoltaïque de manière rentable tout en garantissant un fonctionnement favorable au réseau, grâce à une consommation d'électricité équilibrée. Les pics de consommation et les situations de surcharge doivent être évités. Un défi supplémentaire réside dans le fait que le parc immobilier de la Suisse (environ 2,3 millions de bâtiments) ne doit pas être déconstruit et reconstruit, mais si possible mis à niveau.

## Toujours plus de coordination

À l'heure actuelle, les bâtiments sont dotés de divers équipements consommateurs d'électricité, de mazout et de gaz, pilotés chacun par son propre système de commande. Ces systèmes ne sont pas coordonnés ou harmonisés entre eux pour adapter la demande à la production photovoltaïque et limiter ainsi au minimum l'interaction avec le réseau électrique. Pour une transition en douceur vers un système d'approvisionnement en électricité presque 100 % renouvelable, il est essentiel que les investissements supplémentaires dans le réseau électrique soient réalisés au meilleur coût.

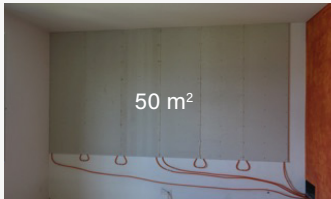
Depuis six ans, TNC développe, teste et optimise un système intelligent d'interconnexion du photovoltaïque, de l'électromobilité, des pompes à chaleur et du réseau électrique. Après 15 ans d'exploitation, une maison Minergie, construite en 1999 dans le canton de Zurich et portant le certificat n°64, a été remaniée et réaménagée afin de la rendre compatible avec la technique du bâtiment 2.0. Elle est utilisée pour tester le nouveau système TNC.ALL. En 2014, la chaudière gaz à condensation a été remplacée par un chauffage à pompe à chaleur géothermique.

**La coordination des organes énergétiques et le stockage local au sein du bâtiment nous permettrons désormais de couvrir environ 50 % de nos besoins d'énergie 8 mois par an grâce au photovoltaïque.**

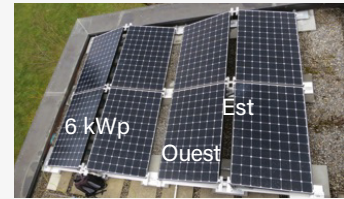
La pompe à chaleur atteint une puissance thermique de 8 kW maximum pour une consommation électrique maximum de 2,5 kW. Le captage de chaleur s'effectue via un forage géothermique de 200 m de profondeur. La puissance de l'installation photovoltaïque a été doublée, passant de 3 à 6 kW. La distribution, initialement assurée par un système de ventilation et de chauffage contrôlé, a été complétée par un chauffage mural d'une surface totale de 50 m<sup>2</sup>. Un véhicule électrique associé à un accumulateur d'électricité est disponible pour tester l'électromobilité.

Projet : **Maison individuelle Minergie n°64, construite en 1999**

257 m<sup>2</sup> de SRE Erlenbach Zurich



Modernisée en 2014



Stockage d'électricité et de chaleur dans un Smart Home

## Quels accumulateurs d'énergie pour une maison intelligente ?

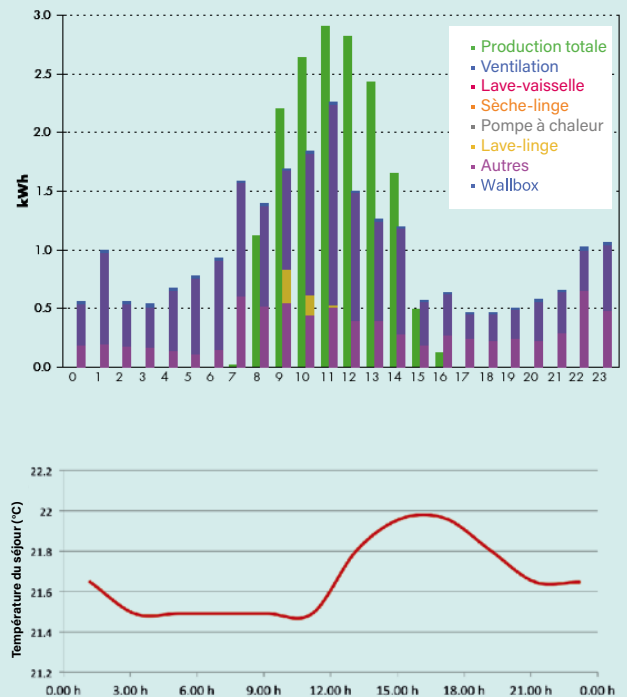
Dans l'objet décrit ici, il s'agit d'un accumulateur d'eau sanitaire d'un volume de 220 litres (env. 8 kWh<sub>th</sub>). La régulation individuelle des pièces permet d'utiliser la masse du bâtiment comme accumulateur thermoactif chargé par le chauffage mural. La capacité de stockage a été estimée à 40 kWh<sub>th</sub> par degré Kelvin. Avec 75 kWh<sub>el</sub>, le véhicule électrique jouit d'une autonomie de 450 km. Dans la suite du projet, un stockage local par batterie de 8 puis 16 kWh<sub>el</sub> a été mis en œuvre pour assurer la continuité jour/nuit.

## Le chauffage mural comme accumulateur thermoactif

Dans chaque pièce chauffée, un mur a été équipé d'éléments chauffants préfabriqués. Cette solution permet de limiter la perte d'espace à 2,5 cm. Une fois le mur replâtré, la différence est imperceptible.

En journée, la température ambiante est relevée de 21,5 à 22°C grâce au courant photovoltaïque et à la pompe à chaleur. Cela permet d'arrêter complètement la pompe à chaleur le soir et la nuit, tandis que le bâtiment isolé ne se refroidit que lentement de 22 à 21,5°C, ce qui reste confortable. Pour apporter la même quantité d'énergie au bâtiment, il faut 40 à 45 kWh<sub>th</sub> ou 10 kWh d'énergie électrique pour faire fonctionner la pompe à chaleur la nuit.

## Évaluations des mesures effectuées dans la maison pilote TNC.ALL



### Exploitation de la pompe à chaleur optimisée en fonction de l'installation photovoltaïque -

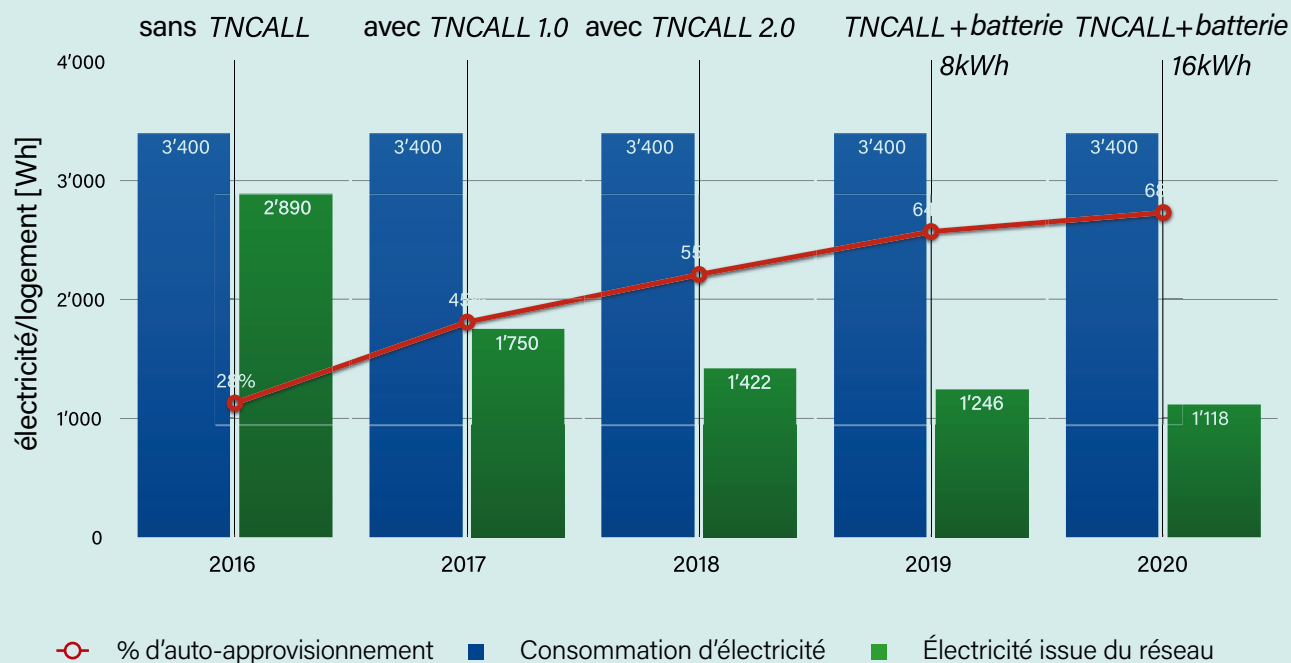
Exemple journalier 31.10.2017

- Chargement PV avec contrôle simultané de la température ambiante
- Masse du bâtiment en guise d'accumulateur thermique : 40 - 45 kWh/K
- $\Delta$  10 kWh<sub>el</sub> de stockage électrique
- Préparation d'eau chaude sanitaire int. : + 2.5 kWh<sub>el</sub> / 8 kWh<sub>th</sub>

Pour couvrir les besoins de 3400 kWh (2016), ces mesures et d'autres ont permis de réduire progressivement le recours au réseau de 2890 à 1120 kWh (2020). Sans modifier les installations techniques du bâtiment, le taux d'auto-alimentation est ainsi passé de 28 à près de 70 %.

## Optimisation de l'autoconsommation et de l'efficacité énergétique

Mesures ▪ 5 mois de mars à juillet



### Plus d'interconnexion et d'approches systémiques requises !

Pour maximiser les parts de marché du photovoltaïque, de l'ordre de 50 à 90 %, un système de gestion coordonné est nécessaire afin d'éviter des surinvestissements inefficaces dans le réseau de distribution d'électricité ainsi que dans les installations locales.

À cet égard, des conditions-cadres remaniées et optimisées sont nécessaires pour assurer une interconnexion intelligente du photovoltaïque, de l'électromobilité, des accumulateurs et des pompes à chaleur – à l'échelle des bâtiments, des sites et du réseau de distribution (niveau de réseau 7).

**La quantité de batteries doit être aussi limitée que possible, tout en étant aussi importante que nécessaire. Quand le stockage thermique est possible, il est plus économique. Pour l'éclairage, la force et l'informatique, l'électricité est toutefois irremplaçable.**

Cela permet de formuler trois conclusions :

1. Grâce à la coordination des organes énergétiques des bâtiments, le photovoltaïque permettra de couvrir à l'avenir jusqu'à 50 % des besoins énergétiques de la Suisse pendant 8 mois de l'année (de mars/avril à octobre/novembre). La consommation est fortement réduite et gérée de façon bénéfique pour le réseau !
2. Le nombre d'accumulateurs d'électricité locaux (batteries) doit être aussi limité que possible, tout en étant aussi important que nécessaire. Partout où le « problème du stockage » peut être résolu par un dispositif thermique, cette solution sera la plus économique. Pour des applications comme l'éclairage, la force et l'informatique, l'électricité reste toutefois irremplaçable.
3. Un développement coordonné du niveau 1 du réseau « top down » ainsi que du niveau 7 « bottom up » est indispensable.





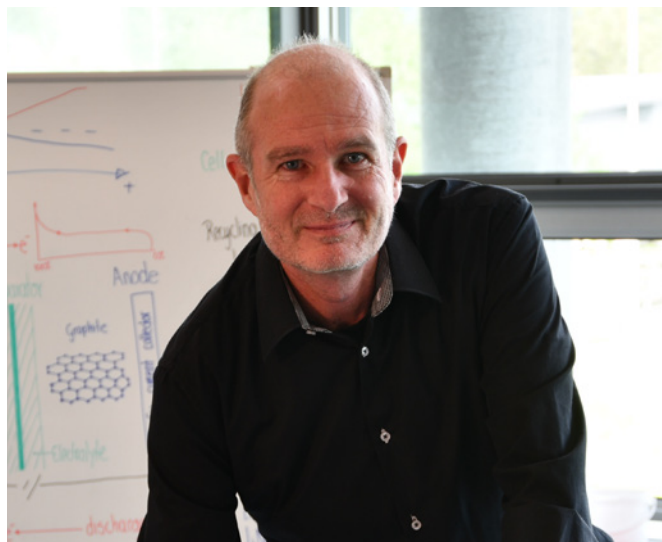


# Les batteries méritent-elles leur mauvaise réputation ?

Octobre 2022

Les batteries permettent d'utiliser de l'énergie renouvelable pour la mobilité et dans les réseaux électriques. Malgré cela, elles souffrent d'une réputation douteuse concernant leur bilan écologique. Qu'en est-il réellement ?

**Marcel Gauch** étudie la durabilité des technologies actuelles et à venir au sein du Technology & Society Lab de l'Empa et assure la fonction de délégué au développement durable de l'Empa. Ces études sont avant tout menées pour le compte d'institutions publiques et privées, sur des sujets tels que les ressources, l'énergie et la mobilité. Marcel Gauch peut s'appuyer sur l'expérience pratique acquise en tant qu'ingénieur mécanique dans le secteur des technologies environnementales et en tant que consultant en technologies environnementales et énergétiques dans un contexte de relations Nord-Sud. Il s'intéresse tout particulièrement aux pistes d'avenir en matière d'énergie et de mobilité, en utilisant des méthodes tenant compte de l'ensemble du cycle de vie.



Malgré leur usage très répandu dans les appareils portables tels que les téléphones mobiles, les accumulateurs d'énergie électrique – en particulier les batteries – sont perçus comme problématiques. Ils sont considérés comme polluants, dangereux et coûteux. Mais tous ces griefs sont-ils objectivement justifiés ? Le lauréat du prix Nobel John Goodenough est considéré comme le père du principe des batteries lithium-ion actuelles (batteries Li-ion). Apparues en 1991, les premières batteries commerciales de ce type utilisaient des cathodes en oxyde de cobalt pur. Aujourd'hui, on emploie des mélanges de différents métaux, généralement du nickel, du manganèse et du cobalt. Pour l'anode, le matériau principal a de tout temps été le graphite, partiellement enrichi de silicium sur les versions les plus récentes.

## **Les matières premières sont considérées de manière plus critique lorsqu'elles sont utilisées pour des nouvelles technologies émergentes.**

Une « bonne » batterie se caractérise en premier lieu par une capacité de stockage élevée par rapport à son poids ou à son volume (densité énergétique gravimétrique et volumétrique). Un certain nombre d'autres critères doivent également être remplis : une capacité de charge/décharge rapide, une longue durée de vie avant que la capacité diminue (nombre de cycles de charge), une grande sécurité de fonctionnement en toutes circonstances et une aptitude au recyclage. Naturellement, les éléments nécessaires à la batterie doivent être aussi irréprochables que possible (disponibilité, toxicité, prix) et l'impact environnemental doit être pris en compte, tant pour la fourniture des matières premières que pour la fabrication de la batterie.

## **L'écobilan des batteries**

Lors des discussions sur la problématique des batteries, on entend fréquemment parler de disponibilité des matériaux, de travail des enfants en Afrique, de problèmes d'eau dans les Andes, de bilan carbone, de véhicules en feu ou encore de recyclage insuffisant. Cet article se concentre sur les aspects matériels et environnementaux des technologies de batteries modernes. En fin de compte, pour répondre aux futures exigences de stockage de l'électromobilité et des réseaux électriques, les besoins en matières premières semblent aussi énormes que difficiles à couvrir.

Les écobilans aident à évaluer les produits sur l'ensemble de leur cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'au recyclage, en passant par la fabrication industrielle du produit et son utilisation. Concernant la fabrication de batteries Li-ion, les recherches menées sur le bilan énergétique et le bilan des matières premières révèlent une grande diversité de situations, se traduisant par des résultats très variés en termes d'écobilan. Ces derniers temps, il est toutefois apparu que les analyses obtenant de mauvaises valeurs d'écobilan reposaient sur des hypothèses irréalistes. La fameuse « étude suédoise »<sup>1</sup> ou les travaux norvégiens basés sur des valeurs élevées<sup>2</sup> ont entretemps été actualisés par leurs auteurs<sup>3</sup>, ce qui a permis d'obtenir des écobilans émanant de différentes sources qui s'avèrent désormais assez homogènes et se situent dans une fourchette plus basse.

La réputation controversée des batteries est également liée à la perception des problématiques spécifiques à certains matériaux : plus l'utilisation des matières premières s'inscrit dans une tradition de longue date (comme l'acier, le plomb, le pétrole), moins celles-ci sont considérées comme problématiques. En revanche, lorsqu'elles sont utilisées pour de nouvelles technologies émergentes, les matières premières sont perçues de manière plus critique. Dans les batteries Li-ion, on trouve, outre des éléments bien connus (comme le cuivre et l'aluminium), quelques éléments « inhabituels » qui sont jugés de manière beaucoup plus suspicieuse.



## Plus que du lithium

Dans la mesure où elles équipent tous les appareils électroniques (téléphones mobiles, ordinateurs portables) et toutes les voitures électriques, les batteries lithium-ion semblent être aujourd'hui sans alternative. Pourtant, contrairement à ce que pourrait faire penser le nom de cette technologie, l'élément lithium ne représente qu'environ 2 % de la masse d'une batterie. En tant que porteurs de charge, les ions de lithium jouent toutefois un rôle déterminant. Troisième élément du tableau périodique des éléments (après l'hydrogène et l'hélium), le lithium présente l'avantage d'être le métal le plus léger de cette classification, tout en ayant le meilleur potentiel électrochimique. D'un point de vue purement théorique, son rôle de favori semble donc évident : le lithium offre la tension la plus élevée pour le poids le plus faible. Le lithium fait l'objet d'un débat controversé sur le plan du respect de l'environnement, mais comparé à d'autres matières premières, il ne présente pas de problème particulier en termes de gisements, de production et de toxicité.

## Les batteries peuvent contenir d'autres porteurs de charge que le lithium.

En effet, d'autres éléments sont également considérés, avec des propriétés très prometteuses et des performances qui se sont – tout récemment – révélées impressionnantes. Le principe de base est simple, sa mise en œuvre bien plus complexe... il s'agit « simplement » d'identifier deux partenaires avec des potentiels électrochimiques aussi différents que possible (haute tension) qui s'accommodent bien avec les conditions de fonctionnement exigeantes qui règnent dans une cellule de batterie, sur une longue durée (nombre de cycles) et dans toutes les circonstances (courant de charge et de décharge potentiellement élevé, température). En laboratoire et au format pilote, on construit par exemple des batteries avec des porteurs de charge autres que les ions lithium (p. ex. sodium, magnésium, aluminium), avec des sels fondus (p. ex. sodium-chlorure de nickel), des métaux fondus (p. ex. calcium-antimoine), du soufre ou tout simplement du fer (p. ex. fer métallique et oxydé). Un des objectifs est de remplacer les électrolytes organiques liquides actuels par des substances solides ininflammables. Les alternatives n'étant qu'aux premiers stades de développement, les batteries lithium-ion resteront probablement encore longtemps la technologie de choix pour les applications exigeantes. Pour des applications comme le stockage stationnaire d'électricité, certaines alternatives sont néanmoins très prometteuses pour l'avenir, tant en termes d'écobilan que de coûts.

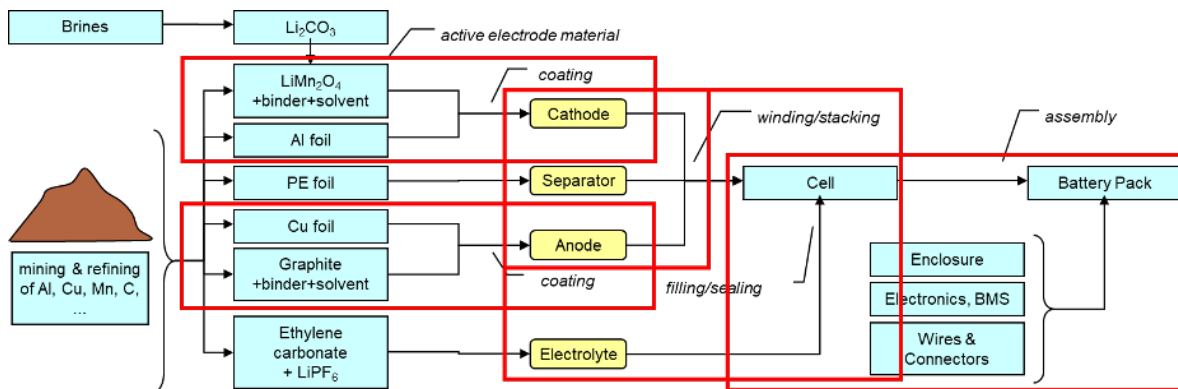
- 
- 1 Romare, Dahllöf ; The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries ; Report number C 243 ; IVL Swedish Environmental Research Institute 2017
  - 2 Ellingsen et.al. ; 2017 ; Identifying key assumptions and differences in life cycle assessment studies of lithium-ion traction batteries with focus on greenhouse gas emissions : Transportation Research Part D (2017) 82-90 ; DOI 10.1016/j.trd.2017.06.028
  - 3 Emilsson, Dahllöf ; Lithium-Ion Vehicle Battery Production ; Report number C 444 ; IVL Swedish Environmental Research Institute 2019
-

## Plus que de l'électrochimie

Les connaissances sur les processus électrochimiques internes des batteries ont considérablement progressé. Les performances ont été sensiblement améliorées grâce à de nouvelles combinaisons de matériaux, allant de pair avec une réduction considérable des coûts, une amélioration de la qualité et une augmentation de la durée de vie. La chimie des cellules proprement dite n'est cependant pas le seul aspect décisif. Le parcours complet, de l'approvisionnement en matières premières à la fabrication de la batterie prête à l'emploi, a lui aussi son importance.

### Réduire l'« emballage » en limitant le ballast

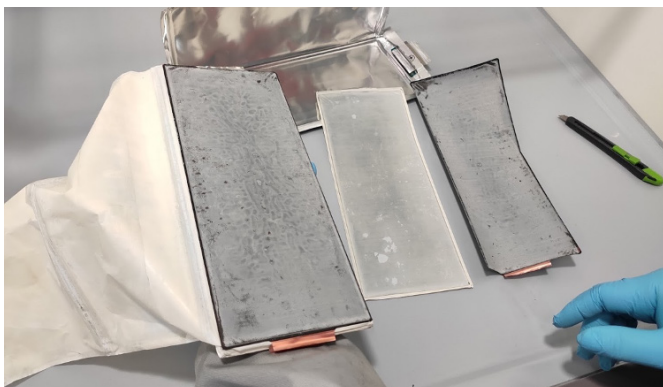
Dans une cellule de batterie, seules les couches dites actives sont déterminantes pour le stockage de l'énergie. Du côté négatif (pôle -) de la batterie, cette couche active est, dans pratiquement 100 % des cas, du graphite appliqué sur une fine feuille de cuivre. Du côté positif (pôle +), la couche active est constituée d'un oxyde métallique déposé sur une fine feuille d'aluminium. Les deux pôles sont séparés par un film perméable aux ions afin d'éviter tout court-circuit. Les couches sont reliées entre elles par un milieu conducteur (électrolyte), mises en forme selon les besoins (couches rondes ou plates) et protégées par un emballage. Plus on peut retirer de ballast non actif d'une cellule de batterie, plus la densité énergétique est élevée. En d'autres termes, plus les feuilles métalliques sont fines, moins il y a d'électrolyte et plus l'emballage est léger, plus la cellule peut stocker d'énergie par rapport à son poids. Il faut néanmoins tenir compte de la robustesse et de la longévité, ce qui limite le potentiel d'amélioration.



Étapes de production d'une batterie lithium-ion

### Processus innovants

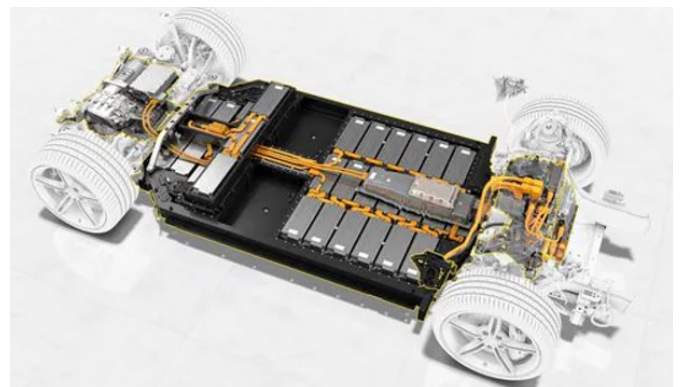
Les méthodes actuelles de production de batteries ressemblent beaucoup à l'impression typographique : des mélanges visqueux de différents matériaux sont fabriqués (matériau d'électrode), puis appliqués sur un matériau support (feuilles métalliques) et séchés. Différentes couches sont ensuite pliées ou enroulées, avant d'être emballées dans une enveloppe protectrice. Des approches prometteuses améliorent le processus de mélange et d'homogénéisation et permettent d'appliquer le matériau d'électrode sans solvant, ce qui permet de se passer complètement d'énergie thermique pour le séchage et la récupération du solvant. L'« entraînement » des matériaux à leur fonction de stockage d'énergie peut se faire via des processus de charge et de décharge de type pendulaire, peu consommateurs d'électricité. Ainsi, les processus modernes de production des cellules de batteries peuvent considérablement réduire leurs besoins en énergie et, en employant de l'électricité renouvelable, diminuer drastiquement les émissions de CO<sub>2</sub> correspondantes.



Intérieur d'une cellule de batterie pour une voiture électrique (exemple : Renault Zoe).

### Assemblage des cellules en une batterie complète

Les cellules de batterie sont habituellement transformées en modules, qui sont assemblés pour former une batterie complète. Jusqu'à présent, la conception par modules devait faciliter le remplacement individuel de ces derniers en cas de problème. Cependant, en raison du faible nombre de pannes, cette opération s'est rarement avérée nécessaire. La tendance actuelle consiste par conséquent à renoncer aux modules et à relier toutes les cellules en une batterie complète. Cela permet de réduire la complexité et, grâce à une meilleure gestion de la température, d'économiser du volume et du poids. Grâce à une conception habile, la batterie peut servir à améliorer la résistance à la torsion du véhicule, ce qui permet une réduction du poids du châssis de ce dernier (p. ex. BYD, Tesla). Le potentiel d'amélioration est considérable, mais cette intégration accrue au niveau de la construction ne doit pas se faire au détriment de l'aptitude au recyclage de la batterie.



Les batteries de traction sont généralement intégrées au plancher du véhicule, optimisant ainsi son centre de gravité.

## Laisser l'espace nécessaire à la recherche et au développement

Les milieux scientifique et économique sont en ébullition : le rythme soutenu des annonces témoigne du dynamisme avec lequel le secteur des batteries évolue, tant en matière de chimie fondamentale qu'au niveau des technologies de conception et de fabrication.

Certaines approches divergeant radicalement des principes des batteries actuelles, suscitent l'attention. Il faut laisser à cette créativité l'espace nécessaire pour s'épanouir et ne pas intervenir trop tôt par des mesures réglementaires telles que des normes ou des standardisations. Un environnement politique favorable à l'innovation et aux investissements devrait permettre à la Suisse de contribuer au développement du stockage d'énergie électrique.

D'un autre côté, il faut s'attendre à ce que le développement des systèmes d'énergie renouvelable entraîne une augmentation massive des besoins de stockage, afin d'atteindre simultanément les objectifs de la politique climatique et un approvisionnement énergétique stable. Cela implique une planification prospective dans laquelle des aspects comme la disponibilité des ressources, un mode de production peu émetteur de CO<sub>2</sub> et des exigences élevées en matière de recyclabilité doivent jouer un rôle aux yeux du législateur. Le stockage d'électricité peut apporter une contribution notable à un système énergétique plus durable. Le potentiel de réduction de l'impact environnemental existe et doit être mis à profit avec le soutien des instances politiques.

## Principales matières premières des batteries Li-ion actuelles

Matière première	Caractéristiques entre parenthèses : défis actuels pour une extraction durable	Utilisation habituelle dans les batteries lithium-ion
Lithium Li	Extrait principalement dans des mines à ciel ouvert en Australie (consommation de terres, paysage, biodiversité) et dans des lacs salés dans les Andes (consommation d'eau, flamants roses rares). La production est simple et bon marché. Les gisements de lithium sont sujets à controverse. Il existe des réserves considérables dans l'eau de mer, mais la concentration y est faible, contrairement aux gisements solides (mines) et fluides (lacs salés).	En tant que porteur de charge, le lithium est déterminant pour le fonctionnement. Les ions de lithium sont intégrés dans l'anode lors de la charge et dans la cathode lors de la décharge. La masse du lithium ne représente qu'environ 2 % de la masse totale de la cellule de batterie.
Cobalt Co	Extrait principalement dans des mines à ciel ouvert en République démocratique du Congo (travail des enfants, contrôle par des groupes militaires, conditions de travail). Le traitement est complexe (processus thermiques et électrolytiques nécessitant beaucoup de produits chimiques et d'énergie).	Sous forme d'oxyde de cobalt, le cobalt est un des composants de la cathode. Alors que leur teneur en cobalt était autrefois élevée, on trouve désormais des batteries qui en sont dépourvues.
Cuivre Cu	Provient de mines de différents continents, est extrait au Congo parallèlement au cobalt, son traitement est tout aussi complexe. Considéré comme non critique malgré un impact environnemental élevé, probablement parce que ce métal est connu et largement utilisé depuis longtemps.	Feuille de support de l'anode
Aluminium Al	La bauxite, minerai d'aluminium, est extraite en grandes quantités dans différents pays. Cet élément est fréquent et ne pose pas de problème particulier, mais sa production est très énergivore.	Feuille de support de la cathode. Dans les cellules NCA de Tesla, c'est aussi un composant de la cathode.
Nickel Ni	Comme le cuivre, le nickel est un métal bien connu dont l'occurrence ainsi que la complexité des traitements thermique et chimique sont similaires. Il est principalement utilisé dans les alliages d'acier. Pour de nombreuses personnes, le nickel a l'effet d'un allergène.	Composant de la cathode
Manganèse Mn	Comme le nickel, le manganèse est principalement utilisé dans les alliages d'acier. Courant dans la croûte terrestre, il n'est pas considéré comme critique.	Composant fréquent de la cathode
Phosphate de fer FePO4	Ce composé permet de fabriquer un matériau de cathode fréquemment utilisé dans les poids lourds (bus, camions), mais aussi de plus en plus dans les voitures particulières. La densité énergétique est inférieure à celle des batteries Li-ion avec cathodes en oxydes métalliques, mais les cellules sont considérées comme robustes et durables.	Composant de la cathode
Graphite C	Le graphite est une forme de carbone. Contrairement à d'autres composés carbonés comme le charbon ou le diamant, le graphite est organisé en feuillets. L'anode est constituée de graphite naturel ou artificiel, entre les couches duquel les ions de lithium peuvent s'intercaler. Le carbone sert également à améliorer la conductivité.	Matériau d'anode dans pratiquement toutes les batteries Li-ion.





# Recyclage des batteries : état des lieux du secteur

Octobre 2022

En matière de « recyclage des batteries », les faits et les opinions divergent. Les interrogations sont nombreuses et les réponses sont rarement simples. C'est pourquoi, nous tentons de dresser ici un état des lieux sous l'angle du développement durable.

**Olivier Groux** est le directeur du département Batteries de KYBURZ Switzerland AG. Il est responsable du développement et de la mise en œuvre d'un processus de recyclage direct, visant à séparer les différents composants des batteries au lithium usagées sans traitement chimique. Il a eu l'occasion de présenter ses travaux de recherche et de développement lors d'événements spécialisés tels que la Green Battery Conference ou EV Battery Recycling & Reuse, et a pris part à la plateforme resourcing.eu financée par l'UE, ainsi qu'à la EU Raw Materials Week de Bruxelles.

Après avoir travaillé comme laborantin en chimie, durant ses études de Bachelor of Science à la ZFH en ingénierie environnementale/énergies renouvelables, il s'est spécialisé dans les procédés respectueux de l'environnement pour le démantèlement des batteries.



Co-auteur : Marcel Gauch |  
Empa, Technology & Society Lab



Dans le contexte de la mobilité et des réseaux électriques, les batteries permettent de se détourner des sources d'énergie fossiles et d'utiliser des énergies renouvelables. Cette conversion nécessite toutefois de grandes quantités d'énergie, de capitaux et de matières premières, sans oublier la part correspondante d'énergie grise. Une fois extraites, les ressources matérielles peuvent toutefois rester quasi éternellement dans la technosphère (économie circulaire), à condition d'être soigneusement recyclées avec un minimum de pertes (déperditions dans l'environnement). Avant de recycler les matériaux, il convient cependant de les utiliser le plus longtemps possible. Les batteries de véhicules offrent notamment d'intéressantes possibilités de prolonger leur durée d'utilisation : après avoir servi à bord d'un véhicule, une batterie pourrait connaître une deuxième vie, par exemple comme stockage d'électricité stationnaire (pour le courant issu d'une installation photovoltaïque ou comme accumulateur de secours) ou dans un véhicule moins performant (applications de seconde vie).

**Des taux de recyclage de 90 % sont aujourd'hui courants, les entreprises avant-gardistes annoncent même 95 %.**

## Situation actuelle

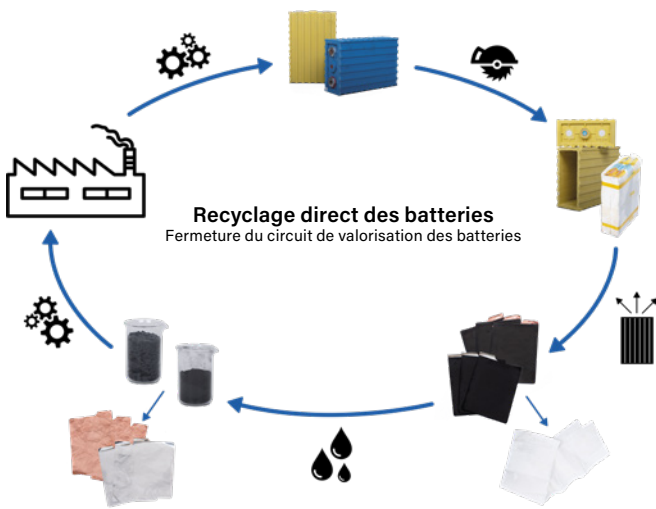
Contrairement à une opinion largement répandue, le recyclage des batteries est depuis des années une obligation légale (et pas seulement en Suisse). Grâce à une taxe d'élimination anticipée (TEA), les batteries peuvent être confiées gratuitement aux filières de collecte, ce qui élimine la tentation d'une élimination inappropriée pour des raisons financières. Des exceptions à l'obligation de reprise et à la taxe d'élimination s'appliquent aux metteurs en circulation de batteries industrielles dans les voitures, à condition qu'ils « assurent l'élimination des batteries dans le respect de l'environnement et couvrent l'intégralité des coûts qui en résultent » (ORRChim, état au 01.05.2022). En Suisse, le système de recyclage des batteries est géré par Inobat sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement OFEV. À l'exception des batteries de démarrage plomb-acide traditionnelles pour voitures, les batteries collectées sont envoyées à l'entreprise Batrec à Wimmis, où les plus petites d'entre elles sont valorisées via un processus thermique. Les batteries de plus grande taille, comme celles des véhicules électriques ou des applications stationnaires, sont soumises à un prétraitement mécanique (broyage), puis les produits intermédiaires sont envoyés à des entreprises spécialisées et agréées à l'étranger (notamment en France, en Allemagne et en Belgique) pour y être retraités. Pour les grandes batteries provenant de l'industrie et des véhicules, les taux de recyclage atteignent couramment 90 %, les entreprises avant-gardistes annoncent même 95 %. Ces chiffres dépassent l'exigence légale de 85 % de recyclabilité pour l'homologation des nouvelles voitures (à moteur électrique ou thermique). Les taux de recyclage des voitures se situent actuellement autour de 70 % (pertes importantes dues à l'incinération des composants combustibles/RESH). À ce jour, il n'existe pas de définition uniforme de ce qui est pris en compte dans le taux de recyclage. L'objectif doit évidemment être un degré élevé de valorisation des matériaux, visant à récupérer en grande partie les composants en tant que matières premières secondaires de haute qualité. Le cas échéant, les composants utilisés comme granulats dans la construction routière ou valorisés thermiquement comme substituts de combustibles peuvent également être pris en compte.

À l'heure actuelle, les batteries peuvent être recyclées à hauteur d'environ 80 % avec un intérêt économique. La part restante est en grande partie réalisable sur le plan technique et judicieuse sur le plan environnemental, mais pas encore rentable sur le plan économique. La taxe d'élimination anticipée permet précisément de compenser cette lacune financière.



## Procédés de recyclage

En termes de traitement, on peut distinguer trois types de procédés, pouvant être combinés entre eux de diverses manières : mécaniques, thermiques et chimiques. Chacune de ces méthodes possède ses avantages et ses inconvénients et est utilisée par différentes entreprises de recyclage. Le prétraitement mécanique est le plus souvent réalisé de façon décentralisée. Plus complexe, le traitement thermique et/ou chimique des composants difficiles à séparer (matériaux actifs des anodes et des cathodes) est ensuite effectué dans des installations centrales plus grandes.



### Procédés mécaniques

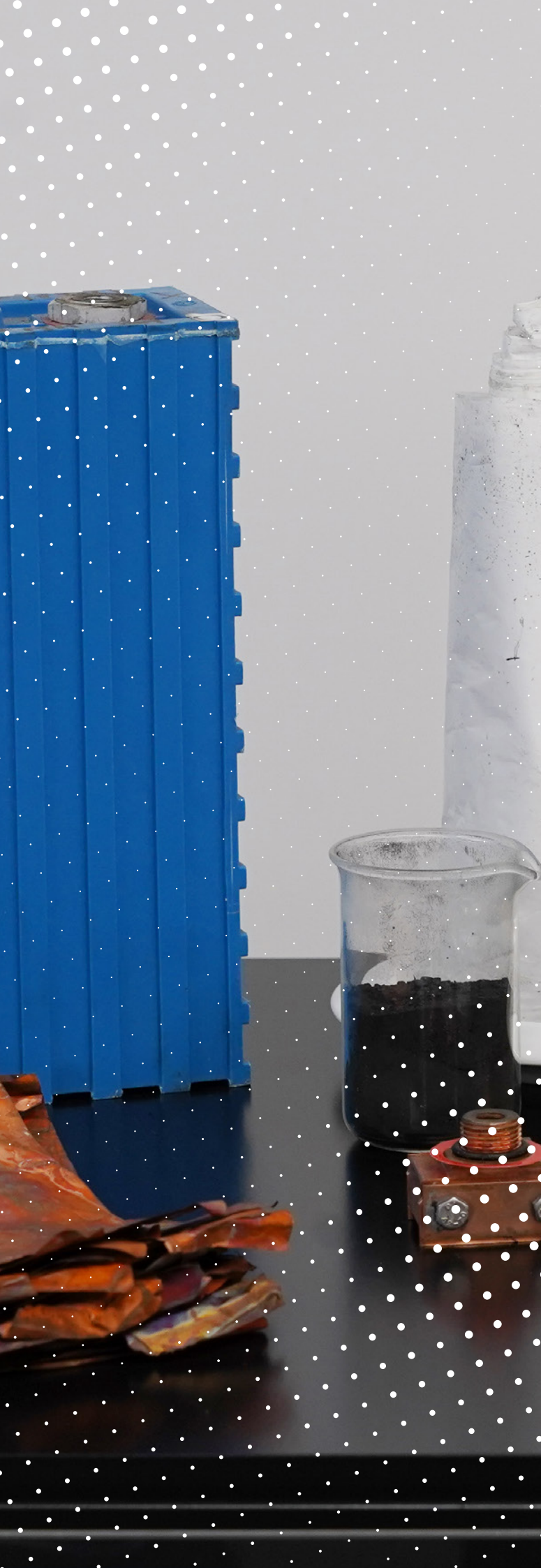
Les principaux composants d'une batterie sont simples : son principe de fonctionnement pourrait être comparé à un livre (ennuyeux) dans lequel alternent deux pages (anode en feuille de cuivre recouverte de graphite, cathode en feuille d'aluminium recouverte d'oxyde métallique), séparées par une fine pellicule de plastique perméable aux ions (séparateur), mouillée par un liquide conducteur d'ions (électrolyte), le tout hermétiquement emballé dans un boîtier de forme variable. De la même manière que les différentes couches de films ont été mécaniquement regroupées, roulées, pliées et emballées, elles peuvent en principe être à nouveau désolidarisées avec une très grande efficacité de séparation. Une solution alternative consiste à utiliser des broyeurs, qui réduisent les batteries en petites particules qui doivent ensuite être séparées et retraitées. Afin d'éviter les courts-circuits et les incendies, le broyage se fait généralement sous atmosphère protectrice.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- La séparation mécanique permet une grande pureté des matériaux valorisés.</li> <li>- Taux de recyclage potentiel &gt; 96 % qui permet de refermer dans une large mesure le circuit des matériaux pour batteries.</li> <li>- Faible consommation d'énergie.</li> <li>- Faibles coûts d'investissement pour les installations.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les batteries doivent préalablement être triées.</li> <li>- Faible débit.</li> <li>- Degré d'automatisation limité, plus de travail manuel requis le cas échéant.</li> <li>- Les processus automatisés doivent être adaptés individuellement à la forme de la batterie.</li> </ul>

### Procédés thermiques (pyrométallurgie)

La pyrométallurgie traite les matériaux selon un procédé bien connu de fusion des matières premières métalliques. Dans des bains de cuivre ou de plomb liquide, par exemple, les métaux soumis à de très hautes températures peuvent former des alliages qui sont ensuite séparés en différents métaux purs (comme le cuivre, le cobalt et le nickel). Les composants de la batterie, tels que le boîtier en plastique, le liquide électrolytique inflammable ou le matériau de l'anode, le graphite, sont brûlés ou servent de combustible. Les métaux que sont le lithium et l'aluminium se retrouvent sous forme oxydée dans les scories et sont revendus ainsi (p. ex. comme agrégats dans l'industrie du béton) ou peuvent être retraités en métaux purs dans une étape supplémentaire (réduction).

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tous les types de batteries sont recyclables thermiquement</li> <li>- Aucun tri préalable nécessaire en fonction des composants chimiques ou des formes</li> <li>- Débit élevé</li> <li>- Aucune connaissance préalable des batteries, de leur domaine d'utilisation et de leur état n'est requise</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forte consommation d'énergie</li> <li>- Émissions élevées</li> <li>- Taux de recyclage des matériaux limité (40 à 60 %) : ne permet de refermer que partiellement le circuit de recyclage des batteries</li> <li>- Coûts d'investissement très élevés pour les installations de recyclage, économies d'échelle</li> </ul>



### Procédés chimiques (hydrométallurgie)

À l'aide de solvants, d'acides et d'électricité, la « masse noire », c'est-à-dire le matériau actif sur les électrodes, peut être séparée avec une grande pureté sans fusion. Il convient de faire preuve de professionnalisme dans l'utilisation des produits chimiques, qui ne doivent pas être rejetés dans l'environnement, ni mettre en danger la santé des collaborateurs. Tout traitement chimique suppose un traitement mécanique préalable (broyage plus séparation des métaux lourds et légers).

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"><li>- Fondièrement possible pour tous types de batteries</li><li>- Taux de recyclage élevé, jusqu'à 95 %</li><li>- Pas de tri préalable des batteries nécessaire en fonction de leur composition chimique ou de leur forme</li><li>- Le circuit de recyclage des batteries peut dans une large mesure être bouclé</li><li>- Faible consommation d'énergie possible</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Utilisation de produits chimiques nécessitant des contrôles pour la sécurité</li><li>- Processus de broyage nécessaire au préalable</li><li>- Plusieurs sous-processus nécessaires</li><li>- La contamination des produits chimiques doit être évitée, nécessité de retraitement</li></ul>

## Quelle évolution se dessine ?

Le secteur suisse des batteries est très actif et fonctionne en réseau. Les échanges sont principalement favorisés par deux initiatives nationales (situation en 2022) : l'association iBAT et le projet CircuBAT.

### **Le secteur suisse des batteries est actif et fonctionne en réseau grâce à iBAT et CircuBAT.**

L'association iBAT, présidée par la Haute école spécialisée bernoise, regroupe 14 partenaires de recherche (hautes écoles spécialisées, universités, instituts de recherche) et 52 partenaires de réseau (industrie, matières premières, entreprises de transport, entreprises de recyclage). L'association souhaite accélérer la conversion des innovations en produits, permettre un échange de connaissances et renforcer la compétitivité de la Suisse dans le domaine des batteries, de la production au recyclage.

CircuBAT est un projet phare d'Innosuisse, l'agence suisse pour l'encouragement de l'innovation. Il doit avoir un impact direct sur l'amélioration de l'aptitude au recyclage des batteries de véhicules électriques. La collaboration transdisciplinaire de 11 partenaires de recherche et de 24 partenaires industriels permet d'étudier non seulement les aspects habituels du recyclage, mais par exemple aussi l'allongement de la durée de vie, notamment en termes d'applications de seconde vie, de fiabilité, de sécurité et de criticité des matières premières. Des entreprises comme Kyburz Switzerland AG et Librec font profiter CircuBAT de leurs connaissances. À la clé, l'empreinte écologique des batteries de véhicules électriques doit être réduite grâce à une optimisation globale de leur circularité.

Dans un avenir proche, c'est l'industrie automobile qui sera la principale pourvoyeuse de batteries. Des incertitudes subsistent encore quant à la vitesse de transition vers les véhicules électriques et concernant les évolutions technologiques. Certains constructeurs automobiles étrangers n'ayant pas encore décidé de la manière de gérer leurs batteries en fin de vie, les importateurs automobiles cherchent à obtenir une prolongation de l'autorisation exceptionnelle négociée avec la Confédération (exonération de la taxe d'élimination anticipée TEA). Certaines entreprises sont en train de mettre en place leurs propres filières (par exemple Volkswagen et Tesla, qui conçoivent dès le départ leurs installations de production en y intégrant une division dédiée au recyclage). Pour les petits importateurs de voitures, regroupés au sein de l'Association suisse du commerce

automobile indépendant (VFAS), une solution de branche a été acceptée par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). SENS eRecycling garantit que les batteries de propulsion automobile sont recyclées dans le respect de l'environnement. Cette solution de branche est financée par une contribution anticipée de recyclage (CAR).

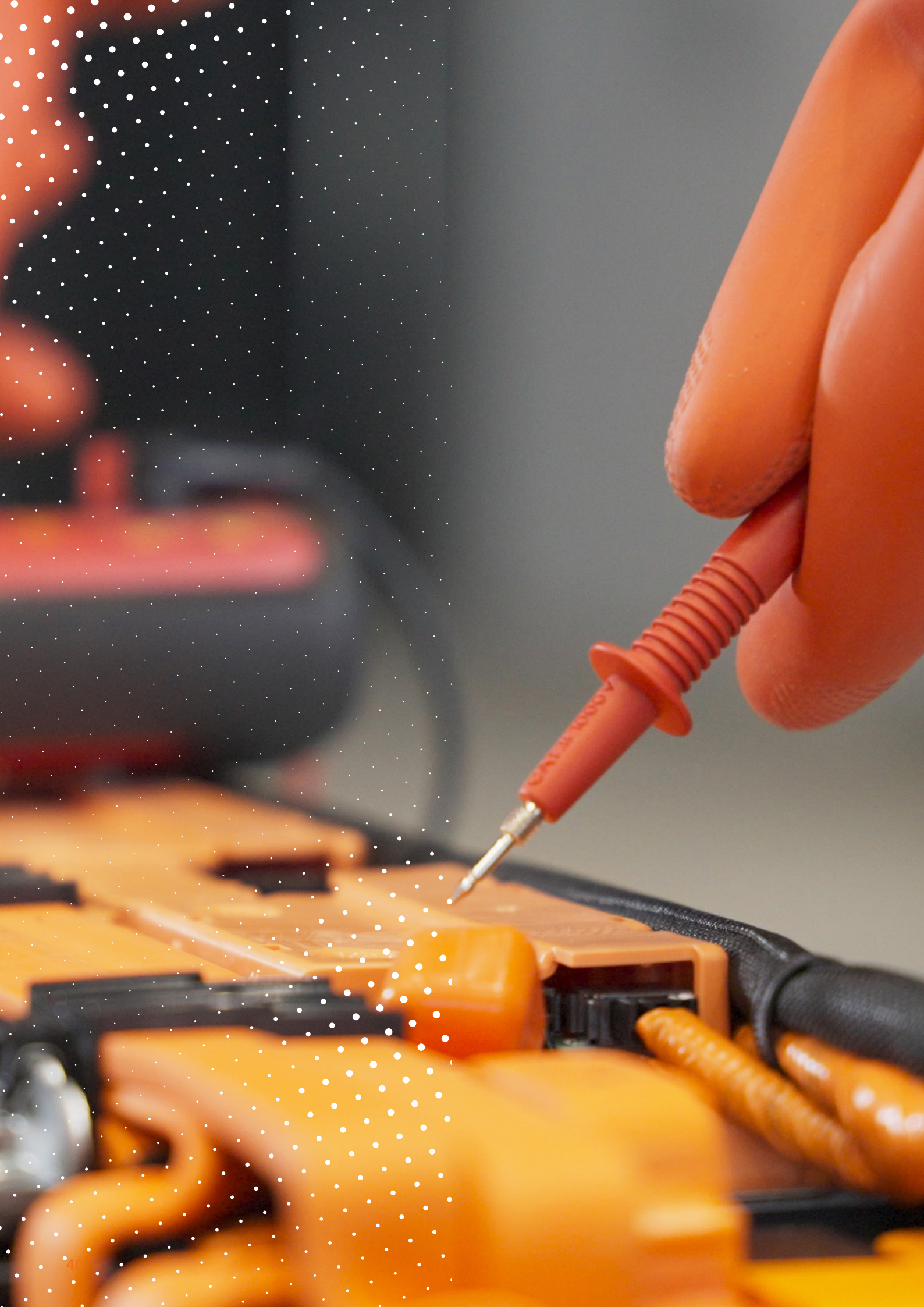
En somme, le recyclage des batteries n'en est encore qu'à ses balbutiements. Non en raison de difficultés techniques, mais parce que la pression exercée par le législateur ainsi que le volume de batteries à valoriser demeurent encore relativement faibles. Les entreprises avant-gardistes développent progressivement des solutions maison, qui influenceront à leur tour la législation. Dès que les possibilités et les limites seront plus claires, la directive européenne sur les batteries devrait renforcer les exigences en matière de

### **Le recyclage des batteries n'en est encore qu'à ses balbutiements. Pas pour des raisons techniques, mais parce que la pression législative et la quantité de batteries à traiter demeurent faibles.**

recyclage, en fixant des taux de recyclage distincts pour les différents matériaux. Une exigence qui ne devrait pas seulement s'appliquer aux batteries, mais plus généralement à la valorisation de tous les déchets.

En résumé, avec un taux de recyclage tout à fait réaliste de plus de 90 %, les défis mentionnés en introduction concernant les besoins d'énergie et de matières premières des batteries destinées à la mobilité et au réseau électrique peuvent être palliés à moyen terme par le recyclage. À court terme, les nouveaux matériaux doivent évidemment d'abord être extraits, avant d'être intégrés dans le cycle des matières premières des batteries.





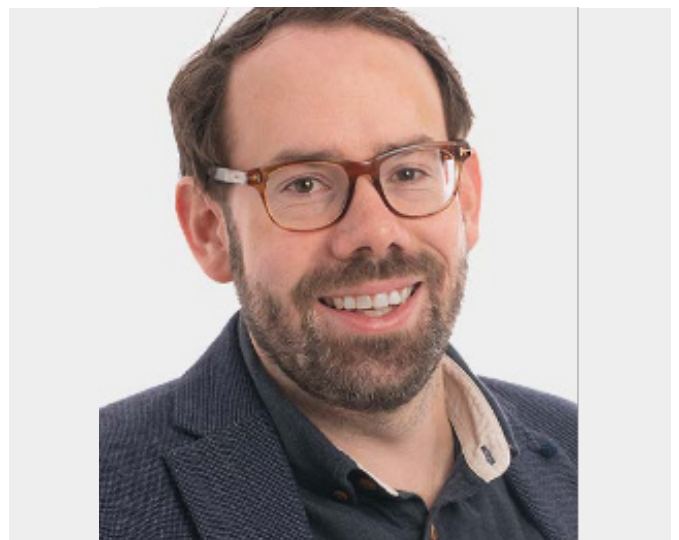


# Le rôle de la Suisse dans la chaîne de valeur globale des batteries

Octobre 2022

La fabrication de batteries est en train de devenir un marché considérable en Europe. Jusqu'à présent, la Suisse n'a guère profité de cette nouvelle chaîne de création de valeur. Comment y remédier ?

**Christian Ochsenbein** est co-directeur exécutif du centre Stockage d'énergie de la BFH. À ce poste, il est responsable des solutions de stockage dédiées à la mobilité et de l'exploitation du Battery Testing Laboratory. Avec le Swiss Battery Technology Center, il dirige l'un des quatre centres de recherche du Switzerland Innovation Park Biel/Bienne. À ce titre, il mène des recherches dans les domaines du recyclage des batteries et de leur intégration dans des applications. En tant que directeur de l'iBAT Management Office, il s'engage pour la force d'innovation de l'industrie suisse des batteries.



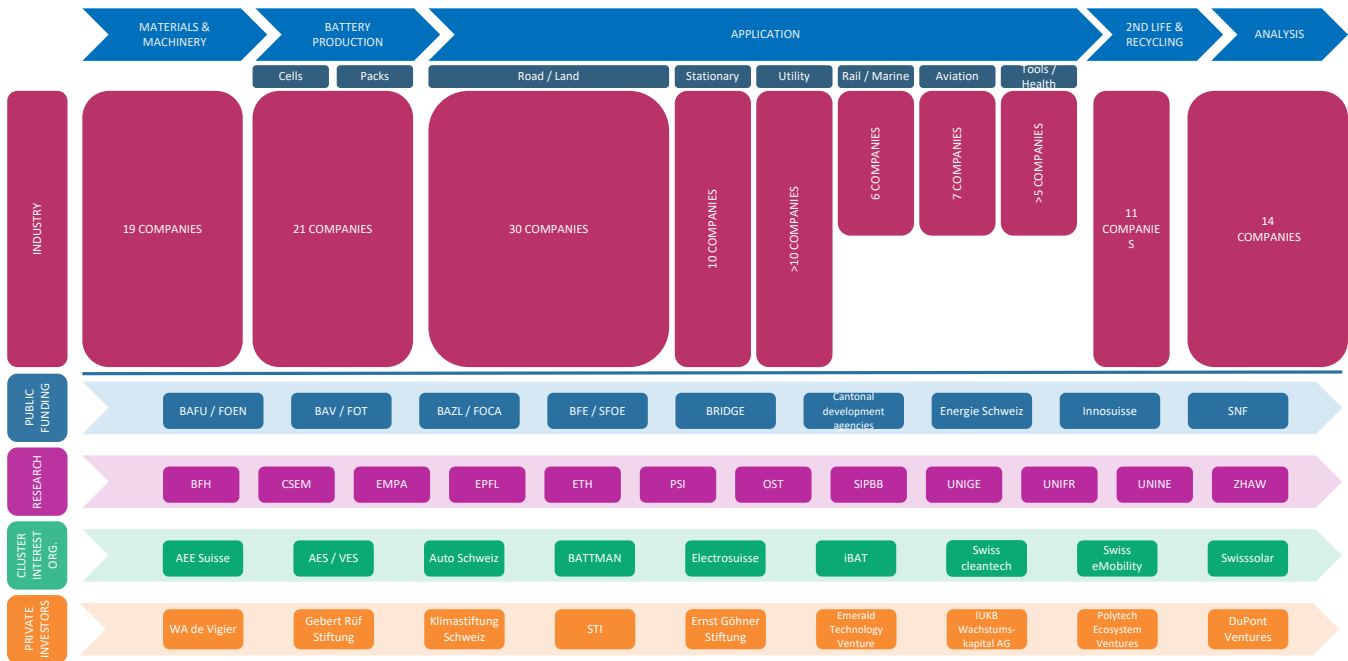
Le marché mondial des batteries au lithium-ion (Li-ion) connaît une croissance fulgurante, largement déclenchée par l'essor de l'électromobilité. La demande croissante de véhicules électriques et le spectre d'une interdiction des motorisations thermiques dans l'Union européenne à partir de 2035 sont les moteurs de la transformation de l'industrie automobile européenne. Les principaux constructeurs automobiles européens ont ainsi l'intention de passer à la propulsion électrique d'ici 2030<sup>1</sup> ou 2035. D'autres secteurs, comme l'énergie ou les véhicules utilitaires, suivent eux aussi cette tendance, ce qui se traduit par une demande supplémentaire de batteries. L'abandon des carburants fossiles dans le secteur de la mobilité entraîne une augmentation des besoins en électricité. Cette évolution a un impact considérable sur la chaîne d'approvisionnement et l'industrie de la sous-traitance. Le composant le plus important d'un véhicule électrique est la batterie, parce qu'elle représente la plus grande part de valeur ajoutée et parce que sa fabrication génère des émissions significatives de gaz à effet de serre.

Si, jusqu'à récemment, les batteries étaient presque exclusivement fabriquées en Asie, une industrie de la batterie est en train de se mettre en place en Europe depuis quelque temps. Actuellement, une trentaine de « Giga-factories » sont en cours de planification, de construction ou d'exploitation en Europe pour la fabrication de cellules de batteries représentant un volume de stockage de plus de 600 GWh par an<sup>2</sup>.

## L'augmentation massive de la demande de batteries entraîne aussi une forte hausse des besoins de matières premières.



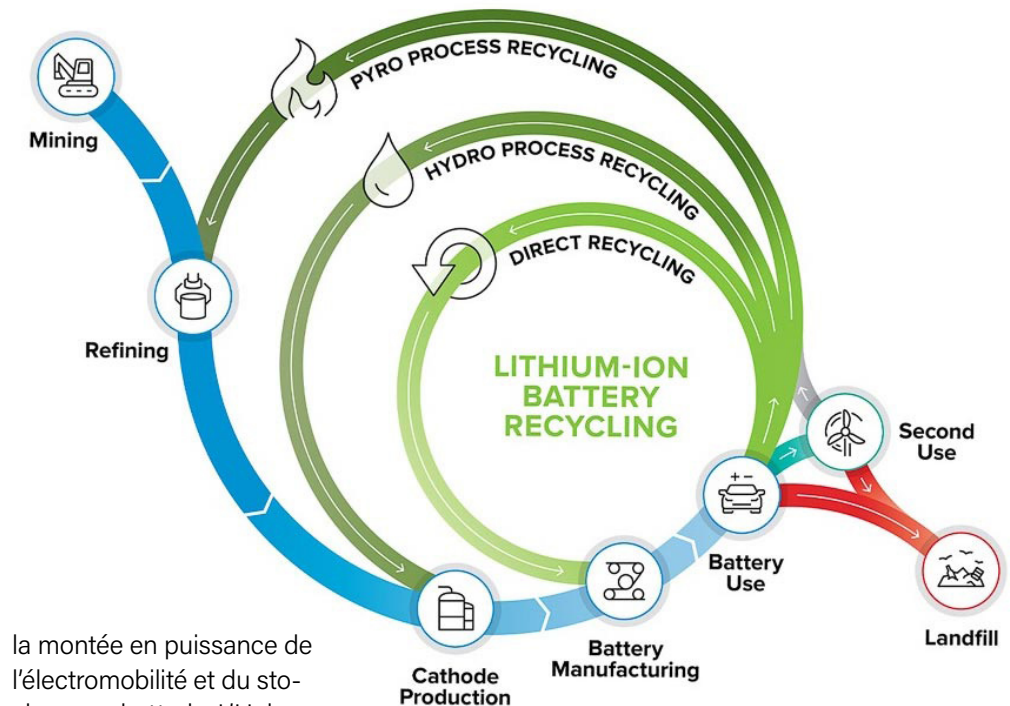
Gigafactories prévues pour la production de cellules de batteries en Europe<sup>3</sup>



« Paysage des batteries » en Suisse\*

Cet article met en lumière le rôle de la Suisse dans la chaîne de valeur mondiale des batteries. Une première analyse a permis d'évaluer une bonne centaine d'entreprises en Suisse, réparties sur l'ensemble de la chaîne de création de valeur des batteries. La sélection comprend aussi bien des start-ups, que des PME ou des grands groupes, qui participent tous avec succès à ce nouveau marché à forte intensité capitalistique.

L'augmentation massive de la demande de batteries entraîne également une forte hausse des besoins de matières premières, notamment du nickel, du lithium, du cobalt, du manganèse, du graphite, du cuivre et de l'aluminium. Certaines de ces matières premières sont considérées comme critiques.<sup>5</sup> Dans les années à venir, cela provoquera des pénuries d'approvisionnement qui pourraient compromettre



la montée en puissance de l'électromobilité et du stockage en batterie. L'Union européenne a reconnu ces problèmes et exigera, dans sa nouvelle directive sur les batteries, que les batteries soient recyclées et que le cycle des matières premières soit respecté.

Économie circulaire des batteries avec différents procédés de recyclage<sup>5</sup>

## Malgré des recherches de pointe, la Suisse reste sur la touche

Jusqu'à présent, la Suisse n'a que peu profité du boom de l'électromobilité et du développement de l'industrie européenne des batteries qui en découle. La European Battery Alliance (EBA), soutenue par la Commission européenne, les pays de l'UE, l'industrie et le secteur scientifique, s'attend à ce que la technologie Li-ion représente un chiffre d'affaires annuel global de 250 milliards d'euros à partir de 2025.<sup>7</sup> Malgré les recherches de pointe menées au niveau international par des instituts suisses (Empa, EPF, PSI et autres), notre pays tarde à reconnaître le potentiel économique de l'électromobilité et de la fabrication de batteries qu'elle implique.

En comparaison avec d'autres pays européens comme la Norvège ou l'Allemagne, la Suisse ne possède pas de feuille de route à long terme dans le domaine des batteries. De même, les responsabilités n'ont pas été clairement définies au sein des offices fédéraux en ce qui concerne les batteries et le stockage. Ainsi, la responsabilité de l'électromobilité incombe-t-elle à l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), tandis que le recyclage relève de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Aucune compétence n'ayant cependant été attribuée pour une perspective de développement à long terme, la Suisse n'est pas activement représentée dans les initiatives européennes.

Les batteries sont davantage perçues comme un mal nécessaire que comme une opportunité pour l'économie suisse. Il est par conséquent logique qu'aucune Gigafactory ne soit construite en Suisse, même si les conditions requises, comme une production d'énergie peu émettrice de gaz à effet de serre ou une main-d'œuvre bien formée, sont bien données.

Un autre problème pour l'industrie suisse est la dépendance vis-à-vis des producteurs asiatiques. Les fabricants suisses sont avant tout présents sur des marchés spécialisés comme les véhicules utilitaires et communaux, les trains ou les vélos électriques. Comme ces fabricants n'utilisent pas les mêmes capacités de batterie que l'industrie automobile, il leur est extrêmement difficile d'être approvisionnés de manière fiable par les fabricants de cellules. Ces incertitudes sont un frein aux investissements dans les technologies durables.

## Davantage de « swissness » dans la chaîne de valeur des batteries

La Suisse a-t-elle vraiment raté son entrée sur le marché européen et mondial ? La probabilité qu'une Gigafactory de batteries Li-ion soit construite en Suisse est très faible. Si l'on considère le cycle de création de valeur dans son ensemble, l'industrie suisse peut cependant encore se faire une place sur le marché.

### **Avec quelques années de décalage par rapport à la montée en puissance de l'électromobilité, un grand marché du recyclage des batteries va voir le jour.**

Avec quelques années de décalage par rapport à la montée en puissance de l'électromobilité, un grand marché du recyclage des batteries va voir le jour. Les procédés de recyclage étant actuellement à la pointe de la recherche et du développement, des opportunités de se positionner sur ce marché existent par exemple dans le domaine de la construction de machines spéciales destinées aux entreprises qui fabriquent des capteurs ou gèrent des données. Avec son nouveau cadre réglementaire pour les batteries (Regulatory Framework for Batteries<sup>8</sup>), l'Union européenne pose également les bases du développement d'une industrie locale de recyclage des batteries. Dès 2030, une partie des matières premières utilisées pour la fabrication de nouvelles cellules de batteries devra être issue du recyclage.

Outre les batteries Li-ion, d'autres types de stockage électrochimique vont s'établir sur le marché. Il s'agira d'une part des batteries solides qui pourraient bien supplanter les batteries Li-ion dans les applications mobiles à long terme. Parmi les technologies intéressantes pour le stockage stationnaire figurent les batteries au sodium, qui comprennent notamment les batteries sodium-ion ou batteries à eau salée. La Suisse pourrait jouer un rôle important dans ces nouveaux types de batteries, par exemple par le biais des entreprises FZSoNick du Tessin ou Natron Energy du Valais.

D'autre part, la Suisse peut s'établir dans le domaine des marchés spéciaux, qui nécessitent par exemple de très longues durées de vie ou des densités énergétiques élevées, et où la création de valeur par unité de batterie est plus élevée. Les domaines d'application se trouvent dans le transport longue distance par camion, par train, voire par voie aérienne.



## Réussir via l'écosystème d'innovation

Afin de faciliter l'arrivée sur le marché des entreprises suisses et d'encourager les innovations issues de l'écosystème d'innovation, nous proposons une série de mesures :

- un service général de coordination au sein du Secrétariat d'État à l'économie (SECO), qui orchestre la coordination avec les offices fédéraux OFEN et OFEV et le Secrétariat d'État à la formation, à la recherche et à l'innovation (SEFRI), représente la Suisse en mission officielle au niveau international, et entretient un canal de communication direct avec l'association professionnelle iBAT ;
- la création d'un fonds national pour le développement durable permettant de financer de grands projets scientifiques et économiques ;
- une offensive de communication auprès des grandes associations professionnelles de Suisse telles que Swissmem, Swiss Mechanic, aeesuisse, AES, Economiesuisse, swisscleantech, Energie-Cluster, afin de faire connaître les opportunités du marché, mais aussi les avantages écologiques ;
- la mise en place de possibilités de formation pour les dispositifs de stockage électrochimiques à différents niveaux ;
- la création de clusters de compétences et de plateformes d'innovation sur les différentes thématiques du stockage ;
- la promotion de la recherche et de l'innovation pour des applications spécifiques sur le marché des batteries, par exemple l'aviation, les véhicules utilitaires ou le stockage stationnaire.

Grâce à ces mesures, la Suisse pourra à l'avenir contribuer de façon non négligeable au marché mondial du stockage en batterie.

- 
- 1 EU to Urge 2035 Goal to End Combustion-Engine Era in Autos - Ewa Krukowska, Alberto Nardelli – 2021  
<https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-07-09/europe-to-propose-end-of-combustion-engine-era-in-green-overhaul>
  - 2 Gigafactories: Europe's major commitment to economic recovery through the development of battery factories - Sara Ortiz, 2021 -  
<https://cicenergigune.com/en/blog/gigafactories-europe-commitment-economic-recovery-battery-factories>
  - 3 CIC energiGUNE; Version 7, 2/2022
  - 4 Batterie-Stakeholder Befragung, Christian Ochsenbein, iBAT Association - 2021
  - 5 [https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials\\_nl](https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_nl)
  - 6 DOE launches its first lithium-ion battery recycling R&D center: ReCell - Tona Kunz – 2019  
<https://www.anl.gov/article/doe-launches-its-first-lithiumion-battery-recycling-rd-center-recell>
  - 7 Building a European battery industry, 2021 KIC InnoEnergy SE  
<https://www.eba250.com/?cn-reloaded=1>
  - 8 Batteries and accumulators [https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/batteries-and-accumulators\\_en](https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/batteries-and-accumulators_en)
-

## Partenaires



Haute école  
spécialisée bernoise



Avec le soutien de



## Forum Stockage d'énergie Suisse

Falkenplatz 11  
Case postale  
3001 Berne

Téléphone : 031 301 89 62  
Fax : 031 313 33 22

E-mail : [speicher@aeesuisse.ch](mailto:speicher@aeesuisse.ch)  
web : [stockage.aeesuisse.ch](http://stockage.aeesuisse.ch)

