

Stockage saisonnier de l'énergie : un aperçu

Interrelations, importance et perspectives
dans le contexte suisse

Rapport de synthèse



MENTIONS LÉGALES

ÉDITRICE ET CONTACT

Académies suisse des sciences (a+)
Commission élargie de l'énergie des Académies suisses des sciences
Maison des Académies • Laupenstrasse 7 • Case postale • 3001 Berne • Suisse
+41 31 306 93 59 • johan.noethiger@scnat.ch • energie.academies-suisse.ch •  Académies suisses

PROPOSITION DE CITATION

Nöthiger J, Neu U (2025) Stockage saisonnier de l'énergie: un aperçu.
Interrelations, importance et perspectives dans le contexte suisse. Rapport de synthèse.
Swiss Academies Reports 20 (9)

AUTEURS

Johan Nöthiger (a+/SCNAT) • Urs Neu (a+/SCNAT)

DIRECTION DE PROJET

Johan Nöthiger (a+/SCNAT)

CONSEIL SCIENTIFIQUE

Commission de l'énergie des Académies suisses des sciences

RÉDACTION

Johan Nöthiger (a+/SCNAT)

IMAGE DE COUVERTURE ET GRAPHIQUES

Sandra Schwab

MISE EN PAGE

Olivia Zwyygart

1^{re} édition, 2025

Ce rapport se fonde sur un rapport de base plus détaillé, qui a été élaboré en collaboration avec d'autres chercheur-e-s et avec des organisations et expert-e-s actifs dans ce domaine et qui contient également des références détaillées.

Remarque: L'élaboration des rapports a été soutenue financièrement par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Seul les Académies suisses des sciences portent la responsabilité de son contenu.

Le rapport de base ainsi que le rapport de synthèse sont disponibles sous forme électronique à l'adresse go.akademien-schweiz.ch/commission-energie

ISSN (print) 2297-1564
ISSN (online) 2297-1572

DOI: doi.org/10.5281/zenodo.17406409



Au travers de la présente publication, les Académies suisses des sciences contribuent à l'ODD 7.

> sdgs.un.org

> agenda-2030.eda.admin.ch/de

Stockage saisonnier de l'énergie : un aperçu

**Interrelations, importance et perspectives
dans le contexte suisse**

Rapport de synthèse

Table des matières

1	Introduction	2
2	Les messages centraux	3
3	Bases	4
3.1	L'énergie dans le cycle saisonnier.....	4
4	Stockage de l'énergie sur de longues périodes	5
4.1	Caractéristiques du stockage saisonnier de l'énergie.....	5
4.2	Technologies disponibles pour la Suisse.....	5
4.3	La problématique des besoins de stockage.....	7
5	Intégration du stockage saisonnier dans le système énergétique	9
5.1	Interactions entre le stockage saisonnier et l'infrastructure énergétique.....	9
5.2	Utilisations potentielles de l'électricité estivale.....	10
5.3	Die Rolle der Biomasse.....	11
5.4	Aspects liés à la production nationale d'agents énergétiques chimiques.....	12
6	Importations d'énergie	13
6.1	Besoins futurs d'importations d'énergie.....	13
6.2	L'influence du stockage saisonnier sur la résilience et la dépendance à l'étranger.....	13
7	Aspects économiques, juridiques et sociaux	14
7.1	Aspects économiques et incertitudes.....	14
7.2	Cadre réglementaire.....	14
7.3	Acceptation sociale du stockage saisonnier d'énergie.....	15
8	Options pour la promotion du stockage saisonnier d'énergie	16

1 Introduction

Qu'est-ce que le stockage saisonnier d'énergie ? Comment fonctionne-t-il et la Suisse en a-t-elle vraiment besoin ?

Ces questions prennent de plus en plus d'importance au fur et à mesure de la transformation du système énergétique suisse pour un avenir durable et neutre en CO₂. Elles sont d'autant plus déterminantes que les énergies fossiles doivent être remplacées par des sources renouvelables dont la disponibilité fluctue fortement selon les saisons, comme le photovoltaïque. En même temps, l'électrification croissante du chauffage (notamment pour les pompes à chaleur) et de la mobilité entraîne de nouvelles dépendances, mais aussi de nouvelles opportunités influençant les besoins saisonniers en énergie. Face à ces enjeux, le stockage saisonnier d'énergie apparaît comme un moyen prometteur d'atténuer, voire de résoudre, des défis centraux. Mais à quel point est-ce réaliste ? Et quelles options concrètes cela ouvre-t-il ?

La présente synthèse aborde le sujet sous différents angles. Elle apporte aux décideurs actifs dans la politique, l'économie et l'administration ainsi qu'au public intéressé une vue d'ensemble claire, structurée et étendue. L'objectif est de présenter les interactions technologiques et institutionnelles de manière aisément compréhensible, de situer le rôle du stockage saisonnier dans le système énergétique suisse et d'identifier les principaux facteurs susceptibles d'influencer les besoins en stockage. Des options d'action et des orientations stratégiques sont également esquissées, lesquelles ouvrent la voie à un système énergétique résilient répondant aux variations des besoins saisonniers.

Pour plus d'information, le rapport de base (RB) approfondit les thèmes abordés dans ce rapport de synthèse. À la fin de chaque chapitre, la référence aux chapitres correspondants du rapport de base est indiquée entre crochets (p. ex. [RB 4.2]).

2 Les messages centraux

Il n'est pas seulement question d'électricité ; toutes les formes d'énergie doivent être considérées

Malgré l'électrification d'une grande part du système énergétique, la demande finale en énergie ne se compose souvent pas d'électricité, mais p.ex. de chaleur (énergie calorifique) à différents niveaux de température, laquelle peut être produite de diverses manières. De ce fait, une analyse du stockage saisonnier devrait prendre en compte toutes les formes d'énergie sur un pied d'égalité, afin de déterminer les moyens de stockage les plus efficaces afin de concilier offre et demande (chap. 5.1).

Le stockage saisonnier doit être pensé avec l'ensemble du système énergétique

Le stockage est en effet étroitement associé à d'autres éléments du système. Le stockage saisonnier peut accroître la flexibilité à court et à long termes et, ainsi, soulager les réseaux énergétiques, augmenter l'intégration des énergies renouvelables et optimiser l'efficacité du système (chap. 5.1).

Les systèmes de stockage saisonnier sont déjà très avancés techniquement, mais, leur disponibilité reste limitée à ce jour en Suisse

Il existe différentes technologies abouties techniquement pour le stockage saisonnier. De grands lacs de retenue et des réservoirs de combustible sont déjà en service. Les accumulateurs de chaleur saisonniers et les grands réservoirs de gaz sont techniquement très avancés, mais pas encore utilisés à grande échelle en Suisse. L'électricité ne peut pas être stockée directement de manière rentable pendant des mois, elle doit être convertie pour le stockage (chap. 4.2).

L'optimisation de la production d'énergie réduit les besoins de stockage

Un développement ciblé de la production peut réduire la nécessité de stockages saisonniers. Cela s'applique en particulier aux éoliennes, aux installations solaires alpines, mais aussi au photovoltaïque sur les toits combiné à un système de réduction de sa puissance lors d'excédents de production (p.ex. en été) (chap. 4.3).

Les systèmes de stockage saisonnier de chaleur ont un grand potentiel et procurent beaucoup d'avantages supplémentaires

Un grand nombre de technologies de stockage, souvent efficaces et relativement peu coûteuses, permettent de stocker la chaleur. Elles procurent des avantages supplémentaires : la flexibilité du réseau électrique peut être augmentée, la climatisation peut être améliorée en été, moins d'agents énergétiques chimiques coûteux (comme le biométhane) sont nécessaires pour stabiliser les réseaux thermiques et finalement la demande en électricité peut être réduite l'hiver de manière significative (chap. 5).

Les systèmes de stockage saisonnier renforcent la résilience et l'indépendance

Les systèmes de stockage saisonnier augmentent la résilience du système énergétique, notamment grâce au stockage intermédiaire des sources d'énergie importées. En même temps, ils permettent une meilleure utilisation de l'énergie produite en Suisse et favorisent ainsi l'indépendance énergétique (chap. 6.2).

Rôle limité de la biomasse pour le stockage saisonnier

La biomasse peut être stockée directement, p.ex. sous forme de bois, ou transformée en agents énergétiques de stockage comme le biométhane. Les quantités disponibles sont toutefois bien trop faibles pour compenser de manière significative les écarts saisonniers entre la demande et la production d'énergie (chap. 5.3).

Rentabilité limitée des sources d'énergie chimiques aptes au stockage issues d'une production nationale

La production d'agents énergétiques chimiques pouvant être stockés comme l'hydrogène, le biométhane ou les e-carburants est techniquement possible en Suisse, mais la production de grandes quantités n'est guère compétitive économiquement par rapport aux importations. Cela s'explique surtout par un potentiel de biomasse limité et les fortes fluctuations saisonnières de l'offre d'électricité (chap. 5.4).

Incertitudes économiques du stockage saisonnier

Le stockage saisonnier profite de fortes différences de prix saisonnières. Les investissements comportent néanmoins des risques, du fait que l'évolution future des prix demeure incertaine. Afin de renforcer la compétitivité des solutions alternatives de stockage, le prix des énergies fossiles faciles à stocker doit être fixé de manière appropriée (p.ex. prix du CO₂) (chap. 7.2).

Obstacles réglementaires pour les systèmes de stockage de chaleur et l'hydrogène

Des questions en suspens en matière d'aménagement du territoire compliquent actuellement le développement de systèmes de stockage de chaleur. Des incertitudes réglementaires en ce qui concerne l'utilisation de l'hydrogène devront notamment être levées, en vue d'encourager les investissements et de sécuriser sa planification (chap. 7.2).

Acceptation sociale du stockage saisonnier incertaine

Alors que les lacs de retenue existants sont très largement acceptés par la population, les nouveaux projets de construction rencontrent parfois des résistances. Concernant l'acceptation sociale des accumulateurs de chaleur ou du stockage de gaz, nous ne disposons actuellement guère de données fiables (chap. 7.3).

3 Bases

3.1 L'énergie dans le cycle saisonnier

Les besoins en énergie suivent un schéma répétitif: des cycles journaliers, hebdomadaires et annuels. Le déroulement annuel est fortement influencé par la température extérieure, avec des besoins en chauffage plus élevés l'hiver et des besoins croissants en climatisation l'été. La production d'énergies renouvelables présente également certaines régularités: le photovoltaïque est soumis à un cycle quotidien et annuel. Tout comme l'énergie hydraulique, il fournit principalement de l'électricité en été. L'énergie éolienne produit en revanche majoritairement l'hiver.

Dans le système énergétique actuel, les fluctuations saisonnières sont principalement compensées par des énergies fossiles, gaz naturel et produits pétroliers, pour les secteurs de la chaleur et de la mobilité. Dans le secteur de l'électricité, les fluctuations sont essentiellement compensées par l'hydroélectricité à accumulation et par des importations de l'étranger selon les années.

En raison de l'électrification de nombreuses applications, les secteurs de la chaleur et de la mobilité sont de plus en plus couplés à celui de l'électricité. La sortie du nucléaire supprime en outre une importante source d'électricité pour l'hiver. Les besoins supplémentaires en production d'électricité qui en découlent seront probablement surtout compensés par le développement du photovoltaïque.

Pour réussir la transition énergétique, il faudra donc trouver des solutions afin de compenser le déséquilibre saisonnier entre production et demande d'énergie. Le présent document aborde le thème sous différents angles. Le stockage à court et moyen termes n'est pas traité en détail dans ce rapport. [RB 2]

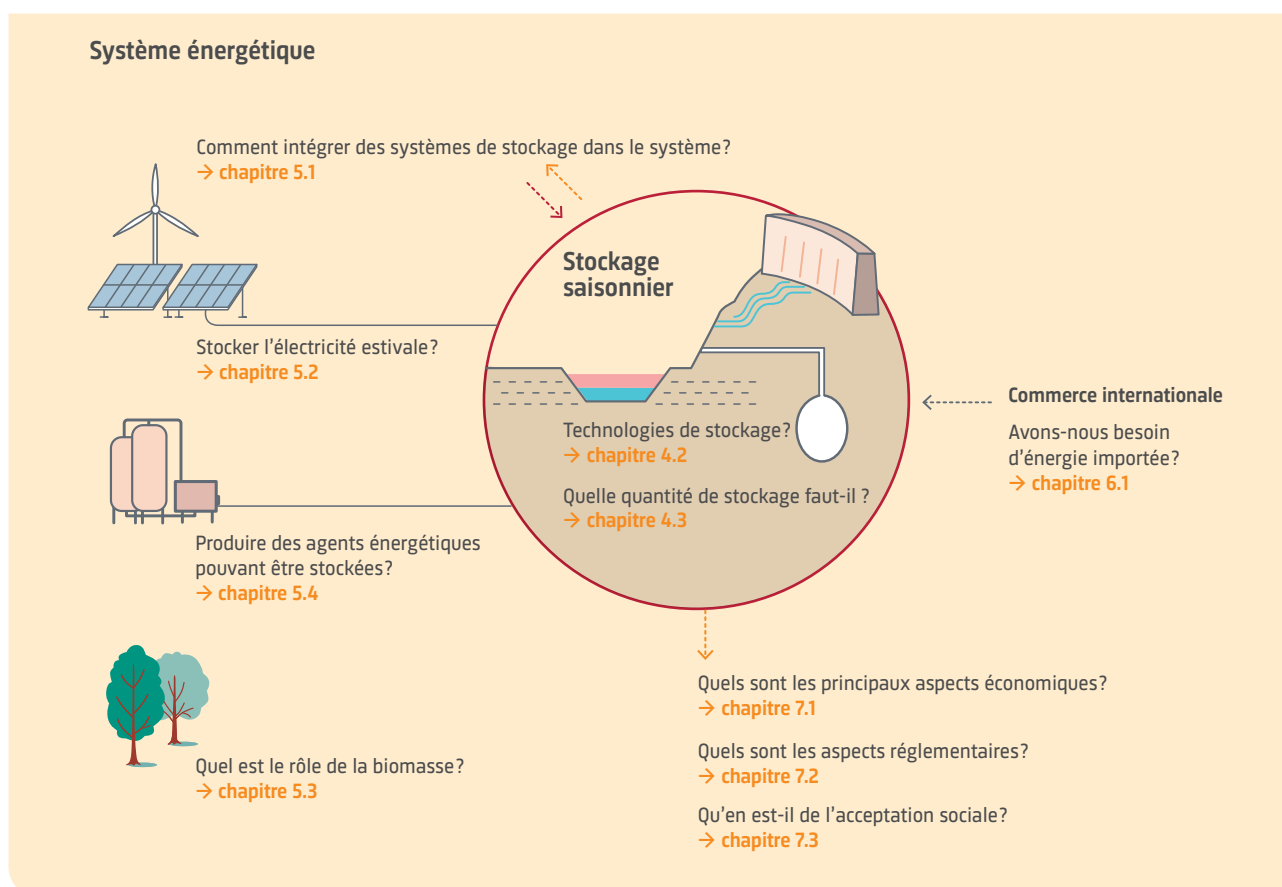


Figure 1: Structure de ce rapport: Nous abordons d'abord les technologies de stockage saisonnier, puis l'interaction avec le système énergétique et finalement d'autres aspects pertinents.

4 Stockage de l'énergie sur de longues périodes

4.1 Caractéristiques du stockage saisonnier de l'énergie

Les systèmes de stockage d'énergie absorbent de l'énergie, la stockent pendant une durée déterminée et la restituent selon les besoins. On distingue des systèmes « rechargeables », qui sont chargés par un apport actif d'énergie, et à flux, qui retiennent les flux d'énergie naturels. Les batteries et les systèmes thermiques sont p.ex. chargés par un apport actif d'énergie électrique ou thermique, alors que le lac de retenue d'une centrale à accumulation se remplit lors de précipitations dans le bassin versant. Le bois que l'on conserve constitue aussi un système à flux, avec un potentiel annuel renouvelable dans une mesure limitée. Seuls les systèmes de stockage « rechargeables » peuvent conserver de l'énergie « excédentaire ».

Les exploitants de systèmes de stockage d'énergie réalisent généralement leurs bénéfices lors de la décharge, c'est-à-dire quand ils restituent l'énergie stockée. Les coûts sont essentiellement conditionnés par l'achat d'énergie¹ ainsi que par les investissements initiaux dans la technologie de stockage. Plus un système de stockage est déchargé fréquemment au cours de sa durée de vie, plus les coûts d'investissement peuvent être répartis sur un grand nombre de cycles de décharge. Le stockage est donc particulièrement rentable quand il existe d'une part une forte différence de prix entre la recharge avantageuse et la décharge plus coûteuse et si, d'autre part, de nombreux cycles de charge-décharge peuvent être réalisés.

En raison des coûts d'investissement relativement élevés par capacité de stockage, les dispositifs de stockage tels que les batteries ou les centrales hydroélectriques accumulant de l'eau par pompage (centrales à accumulation) doivent être utilisés le plus souvent possible, c'est-à-dire chargés et déchargés, afin d'être rentables. Compte tenu du peu de différences de prix que l'on peut raisonnablement escompter entre la charge et la décharge, l'exploitation de tels systèmes afin de stocker de l'énergie de saison en saison durant toute une année n'est pas rentable. De tels systèmes ne sont de ce fait pas adaptés au stockage saisonnier, même s'ils en seraient parfois techniquement capables.² Ils sont mieux adaptés comme dispositifs de stockage à court et moyen termes.³

¹ Les exploitants de systèmes de stockage à flux comme les lacs de barrage ne paient évidemment pas de prix d'énergie direct pour le chargement, mais ils doivent néanmoins supporter des coûts, p.ex. sous forme de redevances pour l'utilisation de l'eau.

² Certains dispositifs de stockage à court terme comme les batteries présentent par ailleurs une décharge spontanée plus importante ou une usure plus rapide à des niveaux de charge élevés, ce qui constitue un obstacle supplémentaire au stockage saisonnier.

³ Parmi les systèmes de stockage à court et moyen termes, on trouve également des technologies telles que le stockage adiabatique d'air comprimé (A-CAES), les batteries à flux (batteries à flux redox), les condensateurs, les accumulateurs à volant d'inertie, les petits ballons d'eau chaude, les accumulateurs de chaleur à haute température, etc.

À l'inverse, les technologies adaptées au stockage saisonnier se distinguent par des propriétés techniques et une structure de coûts permettant une exploitation rentable sur peu de cycles de charge par an. Cela s'explique notamment par de faibles coûts d'amortissement en raison d'une longue durée de vie et/ou de faibles coûts d'investissement, une décharge spontanée moindre et une grande différence entre les coûts de charge et de décharge. [RB 3.1]

4.2 Technologies disponibles pour la Suisse

Les explications ci-après présentent les options de stockage saisonnier d'énergie susceptibles d'intervenir dans le système énergétique suisse. Une appréciation de la future capacité de stockage est abordée à la fin du chapitre 4.3.

Lacs de retenue: Les centrales hydroélectriques à accumulation constituent, depuis des décennies, l'un des principaux moyens de stockage d'énergie en Suisse et ils sont, et resteront, indispensables pour garantir un approvisionnement électrique stable tout au long de l'année. Une augmentation de la capacité n'est possible que dans une mesure limitée et les effets du changement climatique, ainsi que l'évolution du marché, confrontent l'énergie hydraulique à accumulation à des défis. En raison de leur structure de coûts, les centrales à accumulation par pompage ne sont pas adaptées au stockage saisonnier de l'énergie. [RB 3.2.1]

Stockage de chaleur: Les dispositifs de ce type stockent l'énergie produite en été et la restituent l'hiver pour le chauffage. La chaleur peut être stockée dans le sol à température ambiante et récupérée par le biais d'une pompe à chaleur. Par rapport à une pompe à chaleur air-eau, le niveau de rendement est supérieur et cela permet donc d'économiser de l'électricité en hiver. Comme la température de stockage est proche de la température ambiante dans le sol, la dispersion est faible. Il existe déjà quelques dispositifs géothermiques en Suisse, p.ex. à l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich (EPFZ) à Höggerberg. Une autre possibilité est de stocker la chaleur à la température utile et de s'en servir directement pour le chauffage. Cela peut p.ex. s'effectuer à l'aide de très grands bassins remplis d'eau, de grands réservoirs isolés (réservoirs de stockage) profondément situés dans le sol ou des aquifères. Ces réservoirs peuvent être chargés en été, p.ex. au moyen de pompes à chaleur, de chaleur industrielle résiduelle ou d'installations solaires thermiques et, l'hiver, ils soutiendront ou prendront en charge l'approvisionnement thermique, principalement dans les réseaux de chaleur. Selon la technologie et la taille, il est possible d'atteindre des rendements de stockage relativement élevés malgré

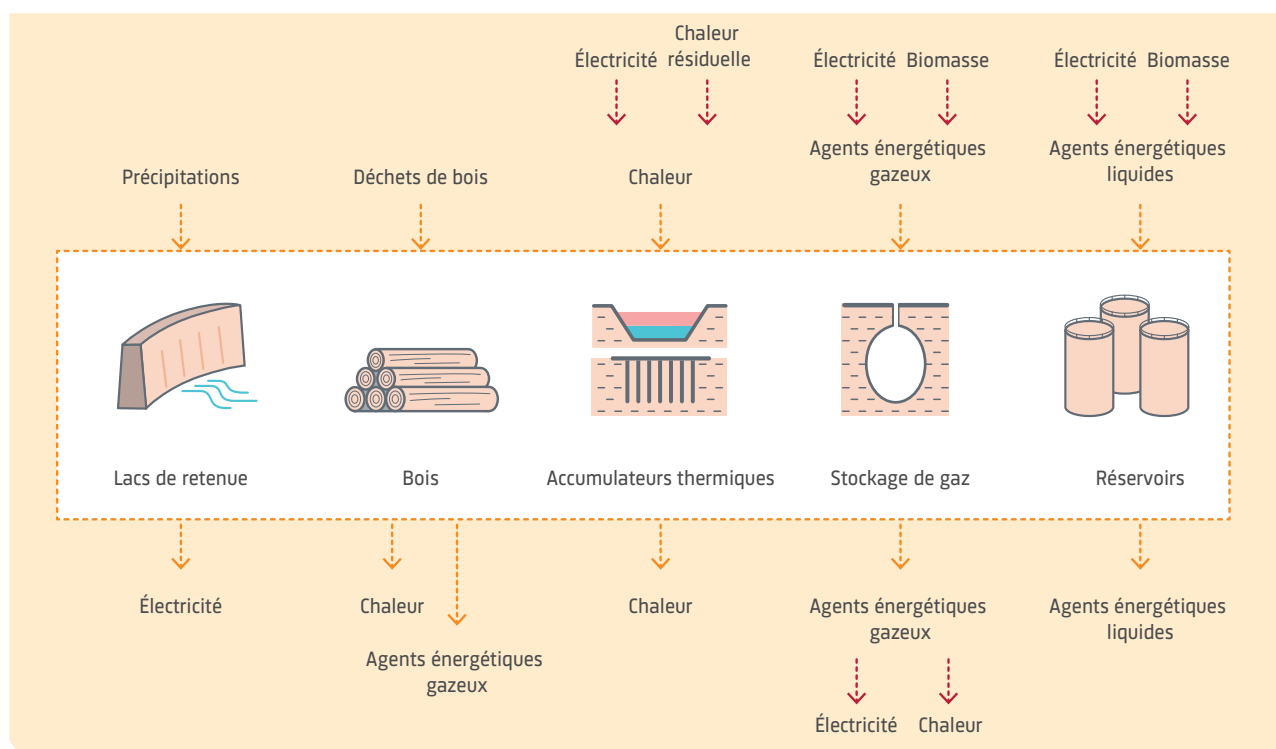


Figure 2: Exemples de technologies de stockage saisonnier avec les sources d'énergie de charge et de décharge correspondantes.

des températures supérieures (p.ex. jusqu'à 90 % d'efficacité de stockage pour les grands réservoirs en fosse). Les réservoirs souterrains dans les sols ou les aquifères sont très répandus dans des pays nordiques comme les Pays-Bas et le Danemark, mais ils ne se sont pas encore établis en Suisse. Des réservoirs saisonniers sont en revanche déjà disponibles dans le commerce et utilisés. En plus des dispositifs de stockage de chaleur mentionnés, qui stockent une chaleur « tangible »,⁴ il en existe également à changement de phase ou à sorption.⁵ Certaines de ces technologies ont déjà atteint la maturité commerciale (p.ex. les accumulateurs de glace), mais la plupart sont encore au stade de la recherche. [RB 3.3]

Stockage de gaz : Les gaz comme le méthane ou l'hydrogène peuvent être stockés dans des cavités rocheuses étanches et des cavités artificiellement créées. Il n'en existe pas encore en Suisse, mais un projet correspondant est en cours de planification. Un stockage dans des cavités salines ou dans des roches poreuses est également possible. Le potentiel de ces variantes est encore largement flou en Suisse. Le gaz liquéfié peut également être stocké dans des réservoirs isolés ou dans des réservoirs tubulaires sous forme gazeuse. En raison des coûts élevés, ces

derniers ne seront vraisemblablement pas envisageables pour le stockage de grandes quantités de gaz. D'une façon générale, il est possible de stocker du gaz produit dans le pays et importé, fossile et renouvelable. Comme par le passé, il serait en outre possible de louer des capacités dans des réservoirs de gaz à l'étranger. [RB 3.4]

Stockage des agents énergétiques liquides : Des agents énergétiques liquides peuvent toujours être stockés avantageusement dans de grands réservoirs. Les réservoirs de carburant et de combustible (réserves d'urgence, mais aussi citernes de mazout) constituent aujourd'hui de loin le plus grand stockage saisonnier d'énergie en Suisse. À l'avenir, les combustibles liquides neutres en CO₂ reprendront ce rôle important dans l'équilibrage saisonnier, qu'ils soient importés ou produits localement. [RB 3.4]

Stockage des agents énergétiques solides : Les agents énergétiques solides (comme le bois ou, à l'avenir, des métaux), peuvent être très facilement stockés à moindre coût dans des silos. Les métaux utilisés comme agents énergétiques libèrent lors de leur décharge de la chaleur (et, selon la technologie, également de l'hydrogène) et peuvent être rechargés par apport d'électricité ou d'hydrogène renouvelable. Cette technologie est encore au stade de développement. [RB 5.3, 5.1.4]

Dans de nombreuses technologies de stockage saisonnier, ce n'est pas le stockage en soi qui représente le plus grand défi, mais la production du support de stockage (p.ex. pour l'hydrogène ou les agents énergétiques liquides). De ce fait, ces aspects sont également abordés ci-après.

⁴ Il s'agit ici d'énergie thermique qui est absorbée ou dégagée lors d'un changement de température d'un corps sans que l'état physique de celui-ci soit modifié. Elle peut être mesurée directement avec un thermomètre.

⁵ Les accumulateurs à changement de phase sont des accumulateurs de chaleur qui stockent ou libèrent de la chaleur latente par un changement d'état physique (p.ex. solide ↔ liquide), p.ex. par congélation et décongélation de l'eau (accumulateurs de glace). La température reste alors pratiquement constante. Les accumulateurs à sorption sont des accumulateurs thermochimiques qui stockent l'énergie en liant la vapeur d'eau (sorption).

Encadré 1: Faut-il vraiment un stockage saisonnier d'électricité ?

L'électricité est la source d'énergie centrale du futur système énergétique. Dans de nombreux domaines cependant, nous n'avons pas directement besoin d'électricité, mais p.ex. de chaleur. Celle-ci peut être produite l'hiver à partir d'électricité par des pompes à chaleur – le même processus est pourtant aussi possible l'été, la chaleur obtenue pouvant être stockée pour l'hiver. Pour le chauffage, la provenance de la chaleur n'a pas d'importance. L'élément déterminant n'est donc pas de stocker de l'électricité pour pouvoir l'utiliser l'hiver, mais de s'assurer que tous les besoins énergétiques puissent être couverts de manière fiable et économique en hiver. À cet égard, il convient de privilégier des solutions qui ne nécessitent aucun stockage saisonnier (comme l'énergie éolienne, produite principalement en hiver), du fait que le stockage augmente les coûts et réduit l'efficacité. Il ne s'agit pas non plus de transférer obligatoirement l'énergie excédentaire de l'été vers l'hiver. Tant que les besoins hivernaux sont couverts, l'énergie excédentaire de l'été peut simplement être réduite avec une régulation adaptée.

4.3 La problématique des besoins de stockage

Idéalement, la production d'électricité correspond à tout moment aux besoins en électricité. Comme dans le système énergétique moderne,⁶ la production d'énergie ne peut pas être pilotée que de manière limitée pour des raisons techniques et économiques, un stockage de l'énergie sur différentes échelles de temps s'impose donc. Cependant, ce stockage implique toujours des coûts supplémentaires et des pertes d'efficacité. D'autres sources d'énergie ont d'autres restrictions. Dans le cas de la chaleur, la distance entre le lieu de production et celui d'utilisation reste limitée, en raison de la difficulté à transporter la chaleur sur de longues distances. Les besoins de stockage d'énergie dépendent donc, d'une part, de la disparité temporelle et spatiale entre production et besoins d'énergie dans le système énergétique, d'autre part, de la disponibilité de solutions alternatives pour réduire cette disparité. [RB 2.3, 2.4, 9]

Les besoins de stockage dépendent ainsi de conditions cadres décrites ci-dessous.

Type de production d'électricité: Les besoins de stockage sont influencés de manière déterminante par le type et la saisonnalité de la production d'électricité. L'énergie hydraulique et les installations photovoltaïques sur les toits

produisent l'essentiel de leur électricité au printemps et en été (au moment de la fonte des neiges et des journées ensoleillées) influençant ainsi les écarts saisonniers de production. L'énergie éolienne en revanche, grâce à une production supérieure l'hiver, peut compenser cette disparité. Toutefois, son développement est limité principalement par un manque d'acceptation. Il en va de même du photovoltaïque alpin, dont la mise en œuvre échoue souvent en raison de coûts d'infrastructure élevés et/ou de conflits d'usage sur les zones de construction avec la protection des paysages et de la biodiversité. Le développement du photovoltaïque sur les toits, combinée à une réduction accrue de la production en été, peut également augmenter la production d'électricité en hiver,⁷ mais pour ce mécanisme de fonctionnement manque encore d'attrait économique et d'acceptation. De grandes centrales à gaz procurent une production flexible, mais elles ne pourront probablement pas fonctionner entièrement avec du gaz local. Cela implique une dépendance aux importations et la nécessité de disposer de grands réservoirs de stockage saisonniers pour garantir la résilience et la sécurité d'approvisionnement. De nouvelles centrales nucléaires seraient réalisables au plus tôt à partir de 2050 et, tendanciellement, elles seront coûteuses et peu adaptées pour combler des pénuries d'approvisionnement en hiver, en raison du rapport investissements/coûts d'exploitation (voir encadré 4). Ainsi mieux nous arriverons à surmonter les obstacles liés aux technologies susmentionnées, plus la production d'électricité en hiver sera élevée et donc moins les besoins de stockage seront importants. D'un point de vue technico-économique, l'énergie éolienne et les centrales à gaz apparaissent comme des solutions de soutien particulièrement attrayantes pour réduire le déficit hivernal de production et couvrir les besoins de pointe. [RB 2.4, 4.1]

Importations: Les importations peuvent partiellement se substituer au stockage saisonnier et, ainsi, en réduire le besoin. En même temps, elles augmentent cependant la dépendance à l'étranger et peuvent réduire la résilience ainsi que la sécurité d'approvisionnement. Pour pallier aux interruptions ponctuelles, les importations peuvent être stockées temporairement dans de grands dispositifs de stockage, ce qui en augmente toutefois à nouveau les besoins selon le niveau de résilience et de sécurité visé (voir chapitre 6.2). [RB 7]

Efficience du système saisonnier: L'efficacité énergétique qui influence également la nécessité de stockage d'énergie et qui dépend notamment: des enveloppes de bâtiments, des systèmes de chauffage et des véhicules électriques ainsi que la suffisance peuvent réduire la demande to-

⁶ Dans un système énergétique traditionnel, la demande n'était pas contrôlable alors que la production l'était. Un approvisionnement fiable était ainsi possible à tout moment. Dans le futur système énergétique, la demande sera parfois contrôlable, mais la production ne le sera plus toujours. Une nouvelle approche s'impose de ce fait pour garantir un approvisionnement fiable.

⁷ Les installations photovoltaïques sur les toits produisent aussi de l'électricité l'hiver, mais nettement moins qu'en été. Si les coûts du photovoltaïque continuent de baisser, il pourrait devenir intéressant d'un point de vue économique d'installer des panneaux sur les toits pour produire de l'électricité en hiver, du fait qu'elle sera nettement plus valorisée en hiver qu'en été, malgré une production hivernale moindre. L'été, la production serait le cas échéant partiellement limitée (voire stoppée) à travers une régulation adaptée.

taille. L'efficacité exergetique joue par ailleurs un rôle de plus en plus important (voir encadré 2). Elle décrit le niveau d'efficacité de l'utilisation de l'énergie fournie par un agent énergétique. Les systèmes dont l'efficacité exergetique est élevée priorisent et combinent les processus et les agents énergétiques de sorte à obtenir un rendement global maximal. De plus, une utilisation saisonnière optimisée des sources d'énergie peut augmenter l'efficacité du système: celles qui sont faciles à stocker, comme le bois ou les combustibles liquides, devraient être conservées et utilisées de manière ciblée pendant les périodes où les alternatives sont rares, p.ex. en hiver ou en cas d'urgence. Une optimisation de l'efficacité saisonnière du système peut ainsi réduire les besoins de stockage, en particulier ceux de coûteux agents énergétiques chimiques. [RB 4.3, 4.4]

Une estimation quantitative des besoins saisonniers en stockage est très difficile compte tenu des conditions parallèles évoquées précédemment, et elle ne serait possible qu'en les spécifiant, dans différents « scénarios » p.ex. Un survol des modèles de systèmes énergétiques peut fournir certaines indications sur l'ordre de grandeur, mais elles doivent être considérées avec prudence en raison de divers facteurs.⁸ Le potentiel des lacs de retenue est exploité au maximum dans tous les modèles, avec une capacité de stockage d'environ 10 TWh (énergie électrique) en 2050.⁹ Le stockage saisonnier de chaleur n'est en revanche pas du tout modélisé dans de nombreux scénarios. Si le stockage saisonnier de chaleur était modélisé, la capacité de stockage de chaleur en 2050 serait de 2 à 6 TWh. La modélisation est toutefois rudimentaire dans la plupart des cas et ne peut tenir compte de contraintes réelles telles que l'espace nécessaire, les conditions géologiques, etc. et, par ailleurs, elle ne couvre qu'une partie des technologies de stockage disponibles. Dans la plupart des scénarios modélisés, les réservoirs de gaz ne sont pas construits pour des raisons de coûts alors que, dans certains scénarios, jusqu'à 2,3 TWh de méthane ou d'hydrogène sont stockés en 2050 avec une hypothèse de prix d'importation très élevés. La quantité de bois et d'agents énergétiques liquides stockés n'est généralement pas indiquée du fait que, compte tenu des possibilités de stockage simples et peu coûteuses, le stockage n'est pas le facteur limitant, mais plutôt la disponibilité du bois et le prix de production des agents énergétiques liquides. En plus de l'énergie hydraulique de stockage et de l'utilisation saisonnière du bois ainsi que des agents énergétiques liquides, les ac-

cumulateurs de chaleur semblent constituer une option intéressante comme, dans uniquement certains cas, les réservoirs de gaz. L'incertitude reste cependant élevée et dépend fortement de l'évolution de facteurs externes. [RB 3.1]

Encadré 2: Comment peut-on gaspiller quelque chose qui ne peut pas diminuer?

Le « gaspillage énergétique » donne lieu à bien des débats. Selon le principe que « rien ne se perd, tout se transforme », l'énergie ne peut donc être ni créée ni détruite. Comment pourrait-on dès lors gaspiller quelque chose qui ne peut pas diminuer? L'énergie thermique ou calorifique se compose toujours d'une partie utile pouvant être utilisée pour effectuer un travail, l'exergie, et d'une partie qui ne peut être utilisée pour un travail et que l'on appelle anergie. La quantité d'exergie dans l'énergie thermique dépend de la différence par rapport à la température ambiante. L'énergie thermique d'un objet dont la température est élevée se compose principalement d'exergie alors que l'énergie contenue p.ex. dans la température ambiante se compose presque uniquement d'anergie. Toutes les autres formes d'énergie (énergie chimique, électricité, etc.) correspondent à de l'exergie pure. Si l'énergie chimique, du bois p.ex., est utilisée directement pour chauffer des pièces, il en résulte d'abord une température très élevée avec une grande teneur en exergie, mais celle-ci ne sert qu'à augmenter légèrement la température ambiante. Une grande partie du potentiel de travail (exergie) est utilisée vainement, ce qui constitue un « gaspillage » et entraîne une faible efficacité exergetique. Cependant, presque toute l'énergie du bois est transformée en chaleur ambiante, ce qui correspond à une efficacité énergétique élevée. Si l'on introduisait en revanche un processus industriel ou la production d'électricité, le travail pourrait être effectué et la chaleur résiduelle encore utilisée pour le chauffage, dans un réseau de chaleur p.ex.. L'utilité de l'énergie contenue dans le bois augmente et le processus atteint une efficacité exergetique supérieure. En soi, la quantité d'énergie n'a ainsi pas d'importance, seule son utilité compte. Un système énergétique dont l'efficacité exergetique est élevée exploite mieux le potentiel de travail de l'énergie.

8 Les modèles de systèmes énergétiques trouvent la solution économiquement optimale pour couvrir les besoins à tout moment, avec les technologies dont ils disposent et dans les conditions cadres définies. Toutefois, de nombreux aspects politiques et sociaux ne sont pris en compte que comme conditions cadres données et beaucoup de technologies de stockage saisonnier, telles que les accumulateurs de chaleur ne sont souvent pas intégrés dans le modèle, si bien qu'elles ne font pas non plus partie des solutions proposées et qu'aucun « besoin » pour ce type de stockage n'est donc identifié.

9 En raison de la présence de grandes quantités de sédiments quand le niveau d'eau est bas, provoquant une usure accrue de la centrale, et afin d'assurer des réserves, les lacs de retenue ne sont généralement pas entièrement vidés. Les valeurs historiques indiquent une utilisation de la capacité à seulement 73 %.

5 Intégration du stockage saisonnier dans le système énergétique

5.1 Interactions entre le stockage saisonnier et l'infrastructure énergétique

Les systèmes de stockage saisonnier d'énergie sont en lien étroit avec d'autres infrastructures énergétiques qui soit transportent de l'énergie comme les réseaux d'électricité, de chaleur et de gaz, ou la transforment, comme les pompes à chaleur, les turbines à gaz, les électrolyseurs et d'autres technologies de couplage sectoriel. Une évaluation du stockage saisonnier implique par conséquent d'étudier l'interaction avec le reste de l'infrastructure énergétique, pour comprendre son rôle, les possibilités et les limitations, comme l'illustre dans l'encadré 3. [RB 4]

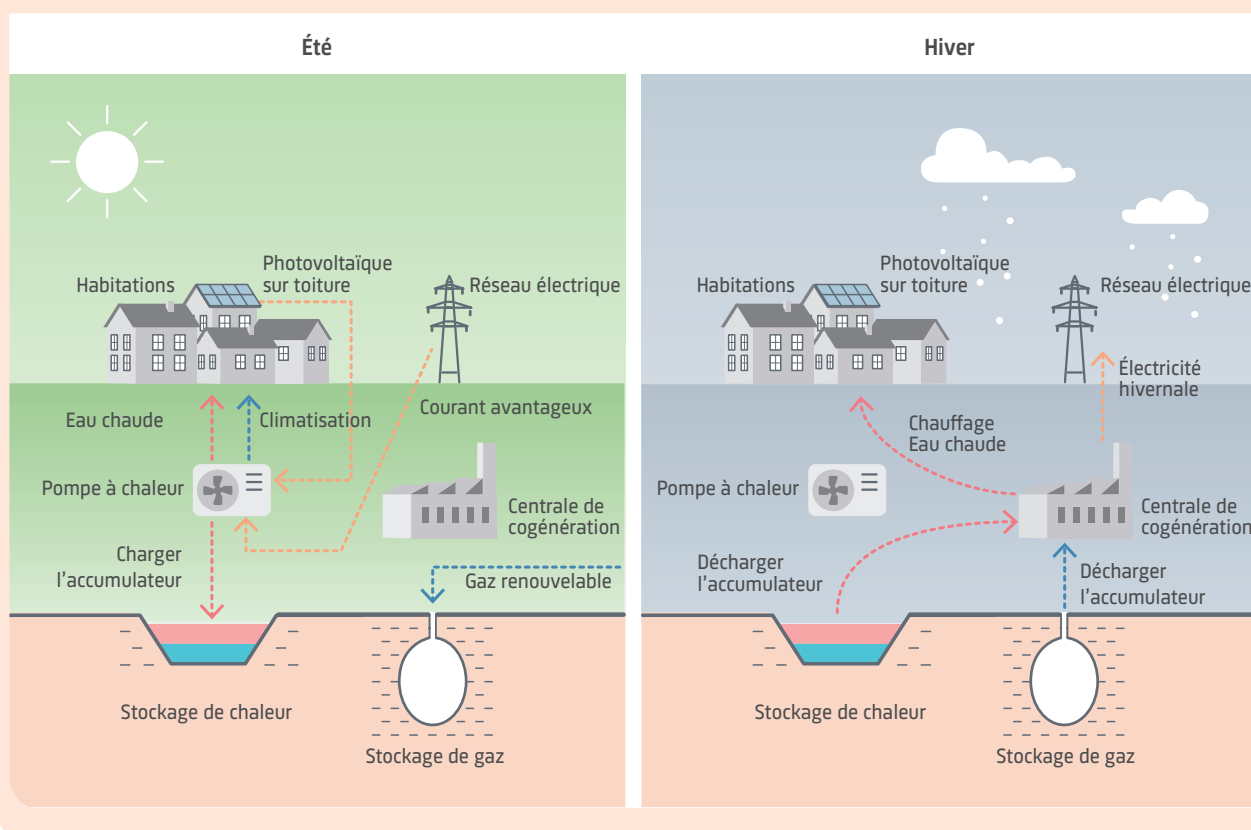
En plus de l'étroite interdépendance physique entre les systèmes de stockage saisonnier de l'énergie et les infrastructures énergétiques, l'interaction temporelle dynamique entre systèmes de stockage et infrastructures énergétiques est également importante, car:

- Dans les réseaux de chaleur, les accumulateurs de chaleur peuvent contribuer à couvrir les pics de demande, lesquels sont souvent compensés par la combustion de gaz ou de bois. Ces précieuses sources d'énergie sont ainsi disponibles pour d'autres applications disposant de moins d'alternatives, comme la production de chaleur industrielle à haute température.

Encadré 3 : Optimiser l'approvisionnement thermique de manière saisonnière ?

Dans le cas d'une centrale de cogénération au gaz renouvelable combinée à une pompe à chaleur et à un accumulateur de chaleur qui alimente un réseau de chaleur, son exploitation peut se présenter de la manière suivante: l'été, quand les besoins en chaleur sont faibles et que la disponibilité de l'électricité est bonne, la pompe à chaleur fonctionne, fournit l'énergie nécessaire au réseau pour l'eau chaude et stocke le surplus dans un accumulateur saisonnier. Des bâtiments peuvent en outre être refroidis et la chaleur extraite sera stockée dans un accumula-

teur de chaleur. L'hiver, la centrale fonctionne au gaz renouvelable stocké durant l'année. Elle produit de la chaleur pour l'eau chaude et le chauffage ainsi que de l'électricité. L'accumulateur de chaleur chargé en été est utilisé en renfort, p. ex. pour couvrir des pics de demande en chaleur. Dans cet exemple, le système est raccordé aux réseaux d'électricité, de gaz et de chaleur, et recourt aux accumulateurs de chaleur et aux réservoirs de gaz pour optimiser le fonctionnement saisonnier.



- Les grands réservoirs de gaz, tels que les cavités rocheuses, peuvent être utilisés pour une stabilisation dynamique du réseau gazier. La montée en puissance de gros consommateurs comme les centrales électriques de secours entraîne notamment une chute de pression dans le réseau gazier environnant, ce qui peut être compensé par les réservoirs situés à proximité.
- L'énergie hydraulique de stockage est aujourd'hui déjà l'une des principales sources d'électricité pouvant être contrôlées et à même de réagir aux fluctuations ponctuelles de la demande. Il en ira sans doute de même à l'avenir.
- Des dynamiques à court terme, comme de fortes fluctuations de l'offre d'électricité entraînant une fluctuation des prix, constituent toutefois d'autres défis. P. ex., la production d'agents énergétiques chimiques à partir d'électricité devrait profiter d'une constante disponibilité d'électricité bon marché, étant donné qu'elle dépend d'un taux d'utilisation élevé en raison des coûts d'investissement élevés.¹⁰

L'optimisation de l'interaction avec l'infrastructure énergétique sur toutes les échelles de temps est déterminante pour générer une valeur ajoutée maximale, mais aussi pour surmonter des défis éventuels. [RB 4]

5.2 Utilisations potentielles de l'électricité estivale

Le stockage saisonnier de l'électricité est un thème important, surtout en raison du « surplus » estival généré selon les scénarios avec une part élevée de photovoltaïque et d'énergie hydraulique. À cet égard, il convient de noter que la part importante de flexibilité à court terme dans le réseau électrique grâce aux systèmes intelligents de consommation et aux systèmes de stockage à court terme permettra d'utiliser une grande partie des excédents quotidiens et hebdomadaires, ce qui « lissera » la demande. Par ailleurs, il sera inévitable de réduire une partie de la production aux heures de pointe (p. ex. en coupant l'alimentation photovoltaïque entre midi et 14 heures), du fait que les réseaux nécessiteraient des investissements considérables pour utiliser chaque kilowattheure. Ces investissements seraient totalement disproportionnés par rapport à la perte de création de valeur de l'énergie rejetée. Il n'est donc pas juste de parler de « surplus », puisque l'électricité produite sera soit valorisée, soit limitée (abattue) en fonction des besoins et des capacités du réseau.

Durant les mois d'été, beaucoup d'électricité est néanmoins à disposition à des prix très avantageux, voire négatifs, et celle-ci pourrait être mise à profit de l'approvisionnement énergétique l'hiver. Diverses possibilités existent :

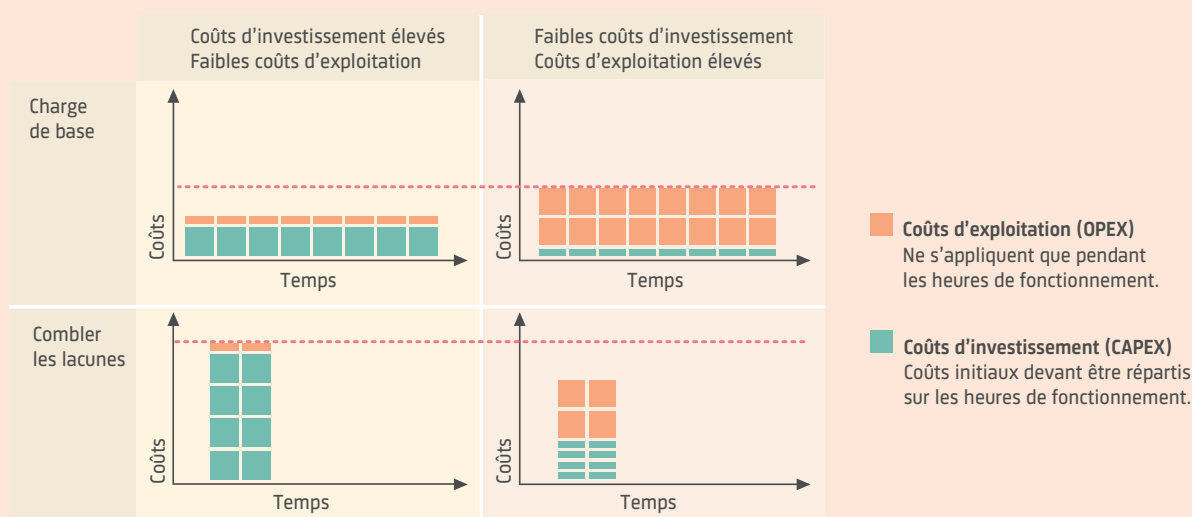
- L'électricité peut se substituer à des sources d'énergie plus faciles à stocker en été, lesquelles sont alors disponibles en plus grandes quantités l'hiver. Cela concerne surtout le bois, mais aussi le gaz et des combustibles liquides utilisés dans des processus disposant d'une alternative électrique. Il s'agit notamment du chauffage des locaux et de la production d'eau chaude, mais aussi de certains processus industriels à des températures généralement inférieures. [RB 4.3]
- L'électricité peut être utilisée pour recharger des accumulateurs de chaleur qui réduisent, voire éliminent, la consommation d'électricité pour le chauffage des locaux l'hiver. En hiver, nous avons en effet surtout besoin de chaleur et pas forcément d'électricité, ce qui offre une possibilité intéressante d'utiliser l'électricité de manière économique, très efficace et judicieuse lorsqu'elle est disponible. Cela s'effectue idéalement en même temps que le refroidissement des locaux, qui prend de plus en plus d'importance, si bien que la chaleur ainsi produite est directement acheminée vers les accumulateurs par des pompes à chaleur. [RB 4.2]
- L'électricité peut être utilisée pour permettre ou améliorer la production d'agents énergétiques chimiques. Ceux-ci peuvent ensuite être stockés puis utilisés, dans la cogénération p. ex., pour des processus industriels ou pour couvrir les pics de consommation hivernaux. En raison des coûts d'investissement élevés, des pertes de transformation importantes et de la concurrence d'importations sans doute plus avantageuses, ces procédés reviennent très cher et ne devraient intervenir que dans une moindre mesure dans le futur système énergétique. [RB 5.2]

¹⁰ Si un électrolyseur (utilisant l'électricité pour produire un agent énergétique chimique) ne fonctionnait que par beau temps, il ne serait en service qu'un huitième du temps dans l'année. Pour atteindre la rentabilité, l'utilisation doit cependant être nettement supérieure, à savoir un tiers à la moitié du temps. Cela implique le recours à des sources d'électricité plus coûteuses ou des systèmes de stockage à court terme, qui renchérissent encore le processus.

Encadré 4 : Rapport entre coûts d'investissement, d'exploitation et temps de fonctionnement

Des technologies nécessitant des investissements élevés (CAPEX élevé), mais dont les coûts d'exploitation sont faibles (OPEX bas), nécessitent un taux d'utilisation élevé, du fait que les coûts d'investissement peuvent être ainsi répartis sur un plus grand nombre d'heures de fonctionnement et représentent donc une part plus faible du prix du produit. Les coûteuses centrales nucléaires, les grandes centrales à cycle combiné gaz-vapeur et les usines d'incinération des déchets, elles aussi coûteuses, nécessitent un taux d'utilisation élevé et fournissent de préférence de l'énergie pour une charge de base avec un courant constant. À l'inverse, des technologies présentant des coûts d'investissement bas (CAPEX bas) et d'exploitation élevés (OPEX élevé) sont tendanciellement davantage adaptées à un nombre réduit

d'heures d'utilisation, au cours desquelles l'énergie produite peut être vendue très cher. P.ex., les groupes électrogènes de secours, qui fonctionnent avec des combustibles liquides avec une efficacité énergétique est faible et la consommation coûteuse, sont plus adaptés sur le plan économique pour pallier temporairement les « lacunes » de production, même si les technologies susmentionnées (CAPEX élevé, OPEX bas) en auraient la capacité technique. Dans un système énergétique où les énergies renouvelables sont les principales sources d'énergie, il faudra surtout des technologies à même de combler les lacunes, et non plus de coûteuses centrales électriques pour la charge de base.



5.3 Le rôle de la biomasse

La biomasse est une matière première polyvalente qui jouera également un rôle majeur dans le futur système énergétique. Le bois notamment, mais aussi des produits issus de la biomasse tels que le biométhane peuvent être utilisés pour le stockage saisonnier. La teneur énergétique de la biomasse exploitable de manière durable chaque année en Suisse est évaluée à environ 30 TWh en 2050. Cette valeur n'est pas équivalente à p.ex. 30 TWh d'électricité, du fait qu'une part notable du potentiel est perdue lors de la conversion en une forme d'énergie utilisable. En réalité, seuls quelques TWh d'électricité pourraient être produits si la biomasse servait principalement à la production d'électricité. Elle est cependant aussi intéressante pour produire notamment de la chaleur à haute température, qui ne peut souvent pas être produite directement à partir d'électricité, ou pour la production de sources d'énergie chimiques d'origine biologique telles que le biométhane ou le biodiesel. Jusqu'à présent, une part importante de la biomasse est déjà exploitée, seuls

le lisier et le bois forestier présentent encore un potentiel inutilisé notable. Le défi pour exploiter les potentiels inutilisés réside surtout dans la répartition à grande échelle de la biomasse et dans le fait qu'elle est souvent difficile à transporter, ce qui limite la taille des installations et complique aussi le raccordement aux réseaux énergétiques (p.ex. le réseau de gaz). La biomasse déjà exploitée de nos jours sert principalement au chauffage de locaux. En raison de l'efficacité exergétique évoquée dans l'encadré 2, cela n'est toutefois pas optimal. Une utilisation optimisée de la biomasse nécessiterait donc aussi un changement d'affectation de celle déjà produite. Comme il existe d'autres domaines de demande que l'utilisation énergétique, p.ex. pour le bois comme matériau de construction, il faudrait viser une utilisation en cascade. Le bois serait p.ex. d'abord utilisé pour la construction, puis valorisé énergétiquement. La ressource limitée fournit alors le meilleur apport possible. Actuellement, cela n'est pas encore suffisamment pratiqué.

Par ailleurs, la biomasse sera également un facteur important dans d'émissions négatives de CO₂. La manière d'associer le plus judicieusement l'utilisation énergétique de la biomasse et des émissions de CO₂ négatives n'est pas encore précisée, pas davantage que l'application qui devrait être prioritaire.

En résumé, on peut dire que la biomasse peut être utilisée de multiples manières, mais quoi qu'il en soit, elle ne suffira pas à elle seule pour compenser les écarts saisonniers. [RB 5.3]

5.4 Aspects liés à la production nationale d'agents énergétiques chimiques

Malgré l'électrification du système énergétique, les agents énergétiques chimiques continueront de jouer un rôle important. En raison de leur aptitude au stockage, ils présentent notamment un intérêt dans le cadre du stockage énergétique saisonnier. Le stockage est très simple et avantageux pour les agents énergétiques chimiques liquides et solides, mais possible également sous forme gazeuse. Une production neutre en CO₂ constitue cependant une limitation majeure. Même si de nombreuses possibilités de production techniquement abouties et beaucoup d'autres en cours de développement existent, elles présentent certains défis fondamentaux susceptibles d'influencer leur utilisation potentielle de manière déterminante, et donc également le stockage en Suisse. [RB 5.1]

- Tous les agents énergétiques chimiques basés sur l'électricité comme l'hydrogène, l'e-méthane, les e-carburants et les métaux, nécessitent, pour être économiquement attrayants, d'une part des installations coûteuses avec, dans l'idéal, un taux d'utilisation élevé et, d'autre part, une électricité très bon marché, laquelle n'est disponible que ponctuellement. Ces deux conditions ne peuvent être réunies simultanément en Suisse, si bien qu'un compromis délicat se pose sur le plan économique, en particulier par rapport aux importations provenant de régions bénéficiant de meilleures conditions.¹¹ De petites quantités d'hydrogène peuvent être produites en Suisse, principalement à partir du « surplus » d'électricité excédentaire très bon marché, alors que des quantités plus importantes nécessiteraient la construction de générateurs d'électricité supplémentaires (p.ex. des installations photovoltaïques), de sorte qu'une production accrue entraîne des coûts plus élevés par kilo d'hydrogène (effet d'échelle inversé). [RB 5.2]
- Les agents énergétiques chimiques issus de la biomasse (p.ex. biométhane, biodiesel) ont tendance à être moins chers que ceux basés sur l'électricité, du fait que la biomasse contient déjà de l'énergie utilisable. En raison

du potentiel très limité en Suisse, la capacité de production d'agents énergétiques issus de la biomasse est forcément limitée et loin de suffire à couvrir les besoins futurs en sources d'énergie gazeuses et liquides en Suisse. [RB 5.1]

- Les agents énergétiques liquides (p.ex. biodiesel) nécessitent généralement des installations de production nettement plus complexes et coûteuses que les formes gazeuses, ce qui pose des défis particuliers. Dans le cas de transformation d'électricité en agents énergétiques liquides, le compromis à trouver entre taux d'utilisation du système de transformation et disponibilité d'électricité bon marché est encore plus délicat. En raison des économies d'échelle, l'utilisation de la biomasse rend les grandes installations à haut débit particulièrement intéressantes, mais elles sont difficiles à réaliser du fait de la disponibilité limitée de biomasse aisément transportable. [RB 5.1.3, 5.1.4]

Même si techniquement, de nombreuses possibilités de produire des agents énergétiques chimiques neutres en CO₂ en Suisse existent, la production de grandes quantités est très coûteuse du fait du contexte local et sans doute pas rentable par rapport aux équivalents neutres en CO₂ importés. Sous certaines conditions locales bien spécifiques, telles qu'une bonne disponibilité des matières premières ou l'absence d'autres possibilités d'utilisation, de petites installations de production fabriquant des molécules simples et de petite taille comme l'hydrogène, le méthane ou le méthanol, pourraient néanmoins être rentables. [RB 5.1.3]

¹¹ Les coûts de transport jouent un certain rôle, surtout pour l'hydrogène, mais ils ne devraient pas être déterminants compte tenu d'une nette amélioration des conditions de production et d'économies d'échelle.

6 Importations d'énergie

6.1 Besoins futurs d'importations d'énergie

La Suisse importe aujourd'hui une grande partie de l'énergie dont elle a besoin, surtout sous forme de sources d'énergie fossiles, liquides et gazeuses ainsi que d'uranium, qui représentent au total une quantité d'environ 210 TWh par an. Grâce à l'électrification et aux gains d'efficacité qui en découlent, les besoins énergétiques globaux diminueront fortement à l'avenir, ce qui réduira aussi les importations. En contenu énergétique, l'un de nos besoins majeurs en énergie importée en 2050 concernera les carburants pour l'aviation, lesquels ne peuvent être produits de manière rentable en Suisse dans les quantités requises (de l'ordre de 20 TWh). En outre, des quantités importantes d'agents énergétiques gazeux (hydrogène ou biométhane) seront importées selon les prévisions, et ce principalement pour les processus industriels et la production d'électricité, la production nationale ne devrait en effet pas non plus suffire dans ce domaine (de l'ordre de 15 à 30 TWh). L'hiver, les importations d'électricité représenteront également plusieurs TWh en 2050. [RB 7.2]

La quantité de sources d'énergie renouvelables gazeuses importée à l'avenir dépendra fortement du niveau de prix, encore incertain à l'heure actuelle. Des quantités plus importantes d'agents énergétiques chimiques auront sans doute tendance à être plus avantageuses de l'étranger que la production locale. Les importations d'électricité resteront probablement attrayantes en matière de prix, du fait que la disponibilité en est élevée, surtout l'hiver. Les importantes capacités éoliennes des régions côtières d'Europe favorisent cette tendance, car de grandes quantités d'électricité éolienne y sont produites en hiver. En cas de pénurie d'électricité en Europe, p.ex. dans des périodes sans ensoleillement ni vent et donc de prix élevés, la Suisse pourrait également exporter de l'électricité grâce à ses capacités hydrauliques. À titre complémentaire, des centrales électriques de réserve sont construites pour pallier d'éventuelles pénuries. Un accord sur l'électricité avec l'UE demeure néanmoins la condition d'un échange d'électricité fiable. Une réduction des importations d'électricité sans développement simultané et majeur de l'énergie éolienne, principalement, ne ferait que déplacer les importations sur une autre ressource telle que le gaz. [RB 7.1]

Techniquement, il serait possible de réduire à un minimum les importations de tous les types d'agents énergétiques pour n'utiliser pratiquement que de l'énergie produite en Suisse, mais cela entraînerait des surcoûts¹² très

importants et réduirait probablement la résilience et la sécurité d'approvisionnement.

6.2 L'influence du stockage saisonnier sur la résilience et la dépendance à l'étranger

Un système énergétique fiable et robuste implique avant tout une sécurité d'approvisionnement et de la résilience.¹³ Cependant, celle-ci ne dépend pas directement du niveau de dépendance à l'étranger. Si des importations d'agents énergétiques chimiques sont stockées en continu dans de grands réservoirs, des interruptions même prolongées des importations se compensent aisément. Une intégration dans le marché européen de l'électricité renforce encore la résilience, en permettant de surmonter plus facilement d'éventuelles pannes critiques dans les infrastructures ou les réseaux en Suisse. Grâce à l'énergie hydraulique suisse, aux stockages de courte durée et aux centrales de secours fonctionnant avec des sources d'énergie chimiques nationales ou importées, des interruptions dans les importations d'électricité hivernale pourraient théoriquement être compensées à l'avenir pendant plusieurs semaines. Dans les faits, la résilience diminue quand le degré d'indépendance est très élevé, notamment du fait que l'approvisionnement énergétique est alors moins diversifié et donc moins robuste.

Les systèmes de stockage à court et à long termes peuvent donc augmenter sensiblement la résilience du système énergétique, et ce, indépendamment du niveau de dépendance à l'étranger. Par ailleurs, les systèmes de stockage contribuent à réduire la nécessité de limiter la production d'énergie renouvelable, ce qui diminue d'autant plus la dépendance à l'étranger. [RB 7]

¹² Il faudrait notamment développer d'importantes surcapacités photovoltaïques et éoliennes, augmenter la production d'agents énergétiques chimiques (répartie sur quelques heures de fonctionnement en été) et utiliser davantage de coûteux systèmes de stockage à court terme, ce qui entraînerait globalement des surcoûts considérables.

¹³ La sécurité d'approvisionnement désigne l'assurance de disposer à tout moment d'énergie en quantité suffisante. Cette notion est complétée par celle de résilience, qui signifie la capacité du système énergétique à réagir à des perturbations telles que des catastrophes naturelles, des pannes techniques ou des crises géopolitiques sans compromettre durablement l'approvisionnement énergétique.

7 Aspects économiques, juridiques et sociaux

7.1 Aspects économiques et incertitudes

Les incertitudes liées au stockage saisonnier d'énergie résident surtout dans l'évolution du marché et des prix, ainsi que dans le domaine des questions politiques et sociales.

L'ampleur des différences de prix saisonnières sur une source d'énergie est l'un des principaux facteurs de rentabilité du stockage saisonnier.¹⁴ Tant le gaz que l'électricité subiront sans doute certaines différences de prix saisonnières. Il n'est cependant pas certain actuellement que cet aspect suffise à garantir l'intérêt économique du stockage saisonnier. Dans le cas du stockage d'électricité, les accumulateurs de chaleur présentent de nets avantages par rapport au stockage au moyen d'agents énergétiques chimiques et deviennent attrayants dès que de petites différences de prix saisonnières s'établissent.

Le degré de résilience et de sécurité d'approvisionnement conditionne le stockage saisonnier et il est principalement influencé par la politique et la société. Un niveau élevé de résilience nécessite davantage de stockage et génère des coûts qui seront finalement supportés par la collectivité. Simultanément, les mêmes acteurs doivent aussi décider d'autres paramètres du système énergétique, tels que la quantité d'énergie éolienne ou l'extension des réseaux, lesquels ont à leur tour un impact sur le stockage saisonnier (voir chapitre 4.3). On ne sait pas encore très bien comment ces aspects évolueront, notamment parce que de les conséquences économiques de nombreuses décisions ne sont pas encore clairement chiffrées.

La disponibilité et les coûts des agents énergétiques chimiques importés demeurent aussi de grandes inconnues. Des prix avantageux et une bonne disponibilité de l'hydrogène et du biométhane importés pourraient réduire les besoins de stockage. Si les prix sont vraiment avantageux, et les agents énergétiques liquides neutres en CO₂ disponibles, le défi de l'approvisionnement énergétique saisonnier pourrait être nettement atténué grâce à un stockage peu coûteux. Ce sont cependant précisément les agents énergétiques liquides qui soulèvent les plus grandes incertitudes en matière de coûts, de sites de production, de voies de transport, de quantités disponibles, etc. Comme les pays voisins sont confrontés à des défis similaires à ceux de la Suisse dans ce domaine, une coopération permettrait de profiter de synergies.

Par ailleurs, les prix pourraient aussi augmenter du fait de la concurrence. [RB 8.1]

7.2 Cadre réglementaire

Divers aspects réglementaires, mineurs ou majeurs, sont susceptibles d'influencer la nature et la quantité de stockage saisonnier en Suisse [RB 8.2]:

Les accords internationaux: L'accord sur l'électricité avec l'UE a un impact majeur sur la nature et la quantité nécessaire de stockage saisonnier. Sans accord sur l'électricité, il faudra probablement construire et utiliser davantage de technologies de stockage plus coûteuses et l'infrastructure énergétique requise à cet effet. La décision relative à l'accord sur l'électricité influencera sans doute aussi l'issue d'autres accords entre l'UE et la Suisse, p.ex. sur l'hydrogène et le biométhane.

Décarbonisation obligatoire: Le prix du CO₂ exerce une influence déterminante sur le rythme de la transition énergétique. Les solutions de stockage saisonnier sont souvent en concurrence directe ou indirecte avec les énergies fossiles, bon marché et faciles à stocker. Leurs chances sur le marché resteront limitées sans un prix adéquat du CO₂. Les mesures contraignantes de décarbonisation apportent une sécurité d'investissement, afin que le prix du CO₂ puisse déployer son effet régulateur et rendre les technologies respectueuses du climat compétitives par rapport aux énergies fossiles. En Suisse, de telles mesures clairement définies et d'une ampleur suffisante manquent pour l'instant, hormis certaines initiatives comme le système d'échange de quotas d'émission, et cela augmente encore l'incertitude pour les investissements en matière de stockage durable de l'énergie.

Conditions-cadres du stockage de chaleur: Il n'existe pas de cadre juridique précis en ce qui concerne le stockage saisonnier de chaleur. Ces technologies de stockage devraient p.ex. être explicitement intégrées dans la planification territoriale et énergétique à tous les niveaux politiques pour améliorer la sécurité juridique et, par conséquent, celle des investissements.

Tarifs dynamiques: De petits systèmes de stockage thermique saisonnier chez l'utilisateur final devraient devenir plus attrayants par des prix de l'électricité dynamiques. De tels tarifs existeraient sans doute plus rapidement dans le cas d'un libre choix du prestataire.

Système de réserves: Les réglementations relatives aux réserves énergétiques obligatoires devraient tenir compte de tous les types de stockage saisonnier et de leur contribution respective à la résilience et à la sécurité d'appro-

¹⁴ Un stockage saisonnier est rentable quand il permet d'économiser une coûteuse énergie hivernale, d'un coût de revient supérieur à celui du stockage. Comme l'énergie achetée en été fait partie des coûts de revient du stockage, celui-ci profite fortement des grandes différences de prix entre l'été et l'hiver.

visionnement, en les rémunérant de manière appropriée. Cela pourrait imposer une extension des réglementations actuelles, dont certaines sont encore en cours d'élaboration. La constitution d'un marché de réserve saisonnière bien réglementé pourrait également être une option intéressante sur ce plan.

Conditions-cadres pour l'hydrogène: Le développement d'une infrastructure suisse pour l'hydrogène nécessite des règles claires en matière de production et, surtout, de transport. Cela implique notamment une harmonisation avec les règles européennes, qui seront probablement nécessaires pour un accord d'importation ou un raccordement à l'«European Hydrogen Backbone» (EHB). Sans importation d'hydrogène, le développement d'une infrastructure de transport suisse à grande échelle et donc de réservoirs d'hydrogène est improbable.

Encouragement de l'efficacité exergétique: Afin de promouvoir l'efficacité exergétique et l'efficacité saisonnière des systèmes, des règles pourraient accélérer la transition vers un système plus performant. Alors que les prix de l'énergie favoriseront sans doute finalement cette évolution, des règles claires pourraient l'accélérer sensiblement.

7.3 Acceptation sociale du stockage saisonnier d'énergie

L'acceptation sociale joue un rôle décisif dans le développement d'infrastructures énergétiques et, par la même, des technologies de stockage.

L'énergie hydraulique jouit d'une acceptation très élevée au sein de la population, alors que les nouveaux projets de construction se heurtent souvent à des résistances. Il n'existe pas encore de données fiables sur l'acceptation d'autres technologies de stockage telles que stockage de chaleur et les réservoirs de gaz, notamment du fait que ces technologies restent peu répandues en Suisse. En ce qui concerne les infrastructures énergétiques destinées au stockage, telles que les réseaux énergétiques, l'acceptation dépend fortement de l'impact sur le paysage, de l'implication de la population locale dans les projets, etc. (voir encadré 5). Dans le cas des réseaux de chaleur notamment, l'acceptation est nettement supérieure dans les régions qui en disposent déjà que dans celles où ils sont inexistantes. [RB 8.3]

Encadré 5 : L'acceptation sociale

L'acceptation sociale des infrastructures énergétiques est une question complexe qui fait intervenir beaucoup de facteurs hétérogènes et dépend fortement du projet, du contexte et du site. D'une façon générale, le coût pour la population concernée devrait être inférieur aux avantages. À cet égard, il convient de relever que le coût n'est pas seulement de nature financière (p. ex. dépréciation des terrains), mais englobe également une baisse ressentie de la qualité de vie (p. ex. en raison des nuisances sonores), une insécurité accrue (évolution incertaine), une perte d'influence, une atteinte à d'importants apports de la nature (biodiversité), etc. De même, l'avantage n'est pas seulement financier, mais peut comprendre d'autres aspects tels que de meilleures infrastructures (nouvelles routes), une indépendance énergétique accrue, une plus-value locale, un gain d'attractivité de la région, etc. En plus du rapport coûts-bénéfices, des idéologies, le bouche-à-oreille ou des leaders d'opinion locaux, les partis politiques et les connaissances existantes sur les caractéristiques d'une technologie, jouent également un rôle important.

Les projets ayant le plus tendance à réussir sont donc ceux pour lesquels la population locale a participé aux planifications (principalement des personnes influentes comme les présidentes ou présidents de commune et les grands employeurs/investisseurs locaux), qui prévoient une information claire et transparente de la population, qui attirent des investisseurs locaux, tiennent compte du paysage (sans empiéter sur des sites protégés) et respectent les apports de la nature (biodiversité).

8 Options pour la promotion du stockage saisonnier d'énergie

Des mesures politiques et réglementaires ciblées sont nécessaires pour renforcer la sécurité d'approvisionnement à long terme et l'efficacité du système énergétique. Les recommandations ci-après visent à stimuler les investissements, à utiliser efficacement les ressources et à garantir les infrastructures stratégiques.

1. Clarifier les conditions-cadres du stockage de chaleur

Actuellement, le développement du stockage de chaleur est bloqué par des incertitudes réglementaires et des procédures complexes en matière d'aménagement du territoire. Pour accélérer les processus et attirer des investissements, il faut mettre en place un cadre juridique clair en matière de planification et d'exploitation, simplifier les procédures d'autorisation et définir précisément les compétences et les instruments de planification. Les accumulateurs thermiques, en tant que technologie centrale pour le stockage saisonnier de l'énergie, pourront fournir une précieuse contribution à la stabilité du système et à l'efficacité énergétique.

2. Promouvoir systématiquement l'efficacité exergétique

Les conditions-cadres de la politique de l'énergie devraient favoriser une utilisation aussi efficace que possible des ressources en termes d'exergie. Les sources d'énergie à faible niveau d'exergie, telles que la chaleur environnementale (comme par ex. l'hydrothermie) ou la chaleur résiduelle (issue de processus industriels), devraient être utilisées en priorité pour les besoins de chauffage, alors que celles à haute valeur ajoutée, comme les énergies synthétiques (comme par ex. hydrogène) ou d'origine biologique (bois, biométhane, biocarburants, etc.), devraient être sciemment utilisées là où il n'existe pas d'alternatives. Cela augmente l'efficacité globale du système énergétique et permet également de réduire les besoins en stockage saisonnier.

3. Encourager l'utilisation du bois en cascade

Le bois, une ressource naturelle disponible en quantités limitées, devrait d'abord servir de matériau, dans la construction p.ex. ou comme matière première, avant d'être valorisé énergétiquement. Idéalement, l'utilisation énergétique serait associée à des technologies à émissions négatives, pour maximiser les avantages climatiques de la biomasse.

4. Promouvoir la construction de grands réservoirs de gaz

Afin de garantir durablement l'approvisionnement en gaz en Suisse, il faudrait étudier la construction de grands réservoirs de stockage de gaz sur le territoire national, dans des cavités rocheuses p.ex., en complément des accords d'importation et de stockage avec l'étranger. De tels réservoirs contribuent à la sécurité de l'approvisionnement et à la stabilité du réseau gazier, surtout durant la saison froide.

5. Accélérer le développement de la production d'électricité hivernale

L'énergie éolienne est décisive pour surmonter des pénuries saisonnières d'électricité en hiver. Il s'agit donc de la développer. Parallèlement, des incitations devraient être créées afin de réduire de manière contrôlée la production d'électricité en été, créée notamment par les installations photovoltaïques. Cela permettrait d'augmenter la part d'électricité photovoltaïque produite en hiver sans surcharger les réseaux durant l'été. Ces installations devraient dans l'idéal être couplées à des accumulateurs de chaleur dans le même bâtiment pour valoriser une part plus grande d'électricité au lieu de la réduire.

6. Étendre le système de réserves ou l'établir comme marché

Le système saisonnier de réserves tel qu'il existe actuellement, composé de réserves hydroélectriques et de centrales thermiques, devrait être repensé et perfectionné. Un système de réserves basé sur le marché pourrait créer des incitations supplémentaires à investir dans la résilience du système énergétique. L'essentiel est d'inclure toutes les formes de stockage adéquates, en particulier le stockage de chaleur. La résilience pourrait ainsi être établie comme un facteur négociable, ayant une valeur économique sur le marché de l'énergie.

7. Renforcer les coopérations et promouvoir la planification intersectorielle

Des solutions de stockage saisonnier avec des infrastructures énergétiques adaptées, nécessitent une planification coordonnée entre secteurs et niveaux administratifs. À cet effet, il faut promouvoir des formats ciblés de coopération entre les fournisseurs d'énergie, les autorités de planification, la recherche et l'industrie. Des processus de planification transdisciplinaires, des espaces de données partagés et des analyses de scénarios intégrées peuvent aider à identifier les synergies, à éviter les doublons dans les investissements, à accroître l'efficacité du système et à favoriser l'acceptation. C'est le fondement d'une stratégie de stockage optimisée de manière globale et apte à la mise en œuvre en situation réelle.

Qui sommes-nous ?

Les **Académies suisses des sciences** regroupent les quatre académies scientifiques suisses, l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT), l'Académie suisse des sciences humaines et sociales (ASSH), l'Académie suisse des sciences médicales (ASSM) et l'Académie suisse des sciences techniques (SATW). Elles comprennent en outre les centres de compétences TA-SWISS et Science et Cité ainsi que d'autres réseaux scientifiques. La relève scientifique s'organise dans la Jeune Académie Suisse. Les Académies suisses des sciences promeuvent la collaboration entre les scientifiques à l'échelon régional, national et international. Elles représentent la communauté scientifique aussi bien sur le plan des disciplines qu'au niveau interdisciplinaire et indépendamment des institutions et des branches spécifiques. Leur activité est orientée vers le long terme et vise l'excellence scientifique. Elles se fondent sur les savoirs scientifiques pour conseiller les politiques et le public sur des questions touchant de près la société

La **Commission élargie de l'énergie des Académies suisses** des sciences promeut et coordonne la discussion et échange scientifique sur les thèmes de l'énergie et de l'utilisation durable des ressources au sein de la communauté de recherche et cultive le dialogue avec la politique et la société. Elle recherche la collaboration avec les hautes écoles et les hautes écoles spécialisées suisses et entretient un réseau de la communauté de recherche suisse sur le thème de l'énergie.

