



# FICHE D'INFORMATION SECURITE DE L'APPROVISIONNEMENT

---

## Résumé

Un des éléments fondamentaux pour une mise en œuvre réussie de la stratégie énergétique 2050 est le suivant: quelque soit le bouquet électrique qui sera choisi, l'approvisionnement électrique doit être garanti en tout temps. L'idée d'un bouquet avec une part importante de photovoltaïque suscite de l'inquiétude auprès de nombreuses personnes, car la production fluctuante de courant solaire pourrait menacer, selon elles, le haut niveau de sécurité de l'approvisionnement. Mais ce souci est infondé. Bien au contraire: une mise en œuvre conséquente de l'approvisionnement 100% renouvelable, demandé par l'Alliance-Environnement, augmente la sécurité de l'approvisionnement.

La fiche d'information Sécurité de l'approvisionnement montre, en détail, le lien de cause à effet et permet à toutes les personnes intéressées d'avoir un aperçu des débats. Voici en un coup d'œil les principaux constats et conclusions:

- Toutes les études montrent que jusqu'à 20% de la consommation actuelle de courant (10-12 TWh) peuvent être couverts par le photovoltaïque, sans devoir investir dans des capacités d'équilibrage supplémentaires, comme des systèmes de stockage, ou d'autres centrales flexibles. La situation actuelle, avec les centrales hydrauliques existantes et le développement programmé des centrales de pompage-turbinage, crée les conditions idéales pour un développement optimal et une intégration, sans pénurie, de toutes les énergies renouvelables.
- Si la part du photovoltaïque dépasse 20%, toute carence dans la production hivernale ou tout surplus de production peuvent être absorbés par des ajustements ciblés du système électrique actuel.

La construction supplémentaire de centrales à gaz ou le développement massif de besoins en stockage n'est en aucun cas nécessaire. Il existe en effet toute une série de mesures, respectueuses de l'environnement et peu coûteuses, permettant de garantir la sécurité de l'approvisionnement. Leur utilisation peut être adaptée à l'évolution des nouvelles énergies renouvelables:

1. Optimisation de la consommation d'électricité: essentiellement efficacité électrique hivernale, lissage à court terme des pics de consommation et interaction entre utilisation de courant, de chaleur et de froid.
2. Optimisation de la production d'électricité: en particulier installations solaires avec une orientation optimale et limitations des pics de puissance ainsi qu'installations à biogaz et usines d'incinération avec des pointes hivernales.
3. Echanges stratégiques avec le marché électrique européen: en particulier importation de courant éolien ou provenant d'installations solaires thermiques. Plusieurs compagnies d'électricité suisses investissent dans de grands parcs éoliens et des installations solaires à l'étranger.
4. Développement de solutions de stockage supplémentaires: power-to-gas, batterie de stockage et autres.

Une politique conséquente en faveur d'un approvisionnement électrique sûr, 100% renouvelable et sans émissions supplémentaires de CO<sub>2</sub>, augmente la sécurité de l'approvisionnement notamment



parce qu'elle diminue notre dépendance envers les pays exportateurs de gaz comme la Russie ou l'Azerbaïdjan.

La bonne position de la Suisse doit être exploitée de manière optimale pour le développement et l'intégration, sans pénurie, des énergies renouvelables. A long terme, une combinaison, respectueuse de l'environnement et peu coûteuse, des quatre éléments ci-dessus doit être réalisée.

## Sommaire

<b>100% renouvelable et 100% sûr – est-ce possible?</b> .....	<b>3</b>
<b>Le système électrique suisse aujourd'hui</b> .....	<b>4</b>
L'import-export pour compenser les variations saisonnières.....	5
Réseau électrique top-down pour les grosses entreprises et import-export .....	6
<b>Le système électrique suisse de demain</b> .....	<b>7</b>
La sécurité de l'approvisionnement en hiver .....	7
<i>Le rôle des énergies renouvelables fluctuantes</i> .....	7
<i>Contributions possibles de l'efficacité électrique</i> .....	9
<i>Contributions possibles du renouvelable avec pointes hivernales indigène ou étranger</i> .....	9
<i>Contributions possibles des technologies de stockage supplémentaires</i> .....	10
La sécurité de l'approvisionnement avec des carences ou des surplus de production .....	11
<i>Faire face aux carences de production</i> .....	11
<i>Faire face au surplus de production</i> .....	11
Le réseau électrique de demain .....	12
<i>Les réseaux top-down deviennent des réseaux bidirectionnels et intelligents</i> .....	13
<i>Quel développement du réseau est nécessaire au tournant énergétique suisse?</i> .....	13
<b>Résumé et recommandations</b> .....	<b>14</b>
Sources et liens.....	16
Contacts & logos.....	17



## 100% renouvelable et 100% sûr – est-ce possible?

La stratégie 100%POUR des organisations environnementales repose sur deux piliers: une utilisation efficace de l'énergie et un approvisionnement en énergies renouvelables. En 2035 au plus tard, dans le secteur de l'électricité, l'approvisionnement devra être d'origine 100% renouvelable, durant toute l'année. Le bouquet de courant 100%POUR pourrait avoir la composition suivante:

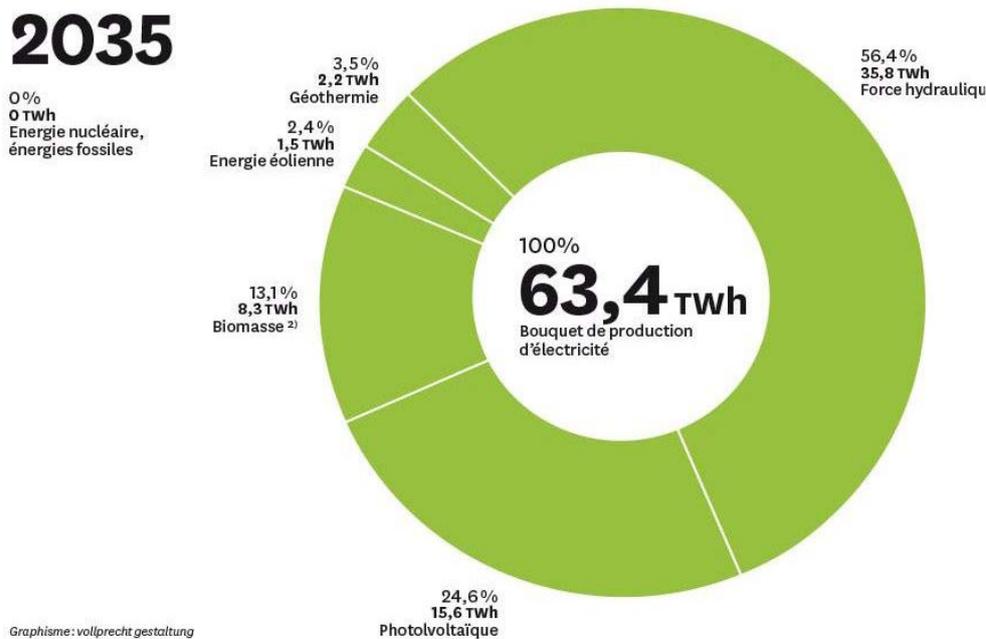


Illustration 1: bouquet 100%POUR sans vecteurs énergétiques nucléaires ou fossiles. Source: [21]

Le bouquet électrique 100%POUR sera essentiellement composé de force hydraulique, photovoltaïque et biomasse (y compris déchets). La garantie de la sécurité de l'approvisionnement<sup>1</sup> sera par conséquent fortement liée à la contribution du photovoltaïque, dont la production est fluctuante, pour couvrir les besoins en courant. Ainsi,

- les fluctuations de production ou de consommation à **court terme** de quelques heures,
- les fluctuations à **moyen terme** liées à des conditions météorologiques persistantes (quelques jours) et
- les variations à **long terme, saisonnière**, de production et de consommations

doivent pouvoir être compensées.

Il est évident que, pour ce faire, il faut une transformation du système d'approvisionnement. Dans cette perspective, certains affirment que la sécurité de l'approvisionnement ne peut pas être garantie avec un bouquet électrique uniquement renouvelable, sans centrales à gaz et nucléaires. Une affirmation qui **n'est pas** confirmée par les études disponibles actuellement basées sur des modélisations, heure par heure, de la situation pour les différents scénarios d'approvisionnement et de consommation.

<sup>1</sup> La production indigène d'électricité ainsi que l'électricité importée permettent de couvrir la demande en puissance et en quantité d'énergie en tout temps.



Nous expliquons dans la présente fiche d'information les défis de la sécurité de l'approvisionnement pour la production, la consommation et les réseaux et nous démontrons, qu'à l'avenir, le bouquet 100%POUR n'a plus besoin de centrales à énergies fossiles.

## Le système électrique suisse aujourd'hui

Comme le réseau électrique ne doit subir ni surcharge, ni pénurie, lors de la construction des centrales nucléaires il a fallu s'assurer que la production de courant, provenant des centrales hydrauliques au fil de l'eau et des centrales nucléaires, pratiquement pas modulable, trouve preneur, même quand la demande est faible. Ceci en particulier la nuit. Des consommateurs du courant superflu ont été générés: chauffages électriques et centrales de pompage-turbinage. Aujourd'hui déjà, des structures existent pour compenser les différences de production et de consommation à court, moyen et long terme.

Illustration 2 montre comme la capacité des chauffages électriques à accumulation a augmenté parallèlement à l'augmentation de la capacité nucléaire (gauche). Cette évolution a été accompagnée de tarifs de l'électricité extrêmement bas (droite): celui qui utilise de l'électricité en ruban, lorsqu'elle est produite en excès, est récompensé. **Pour le bouquet électrique 100%POUR, les consommateurs de courant, subventionnés en hiver ou durant la nuit, ne sont plus souhaités.**

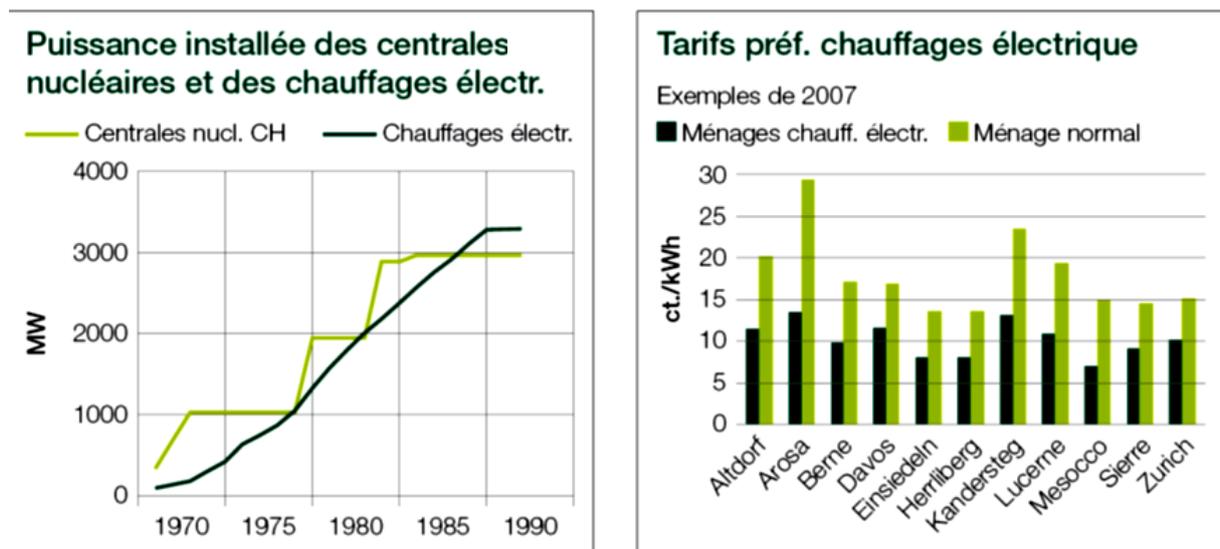


Illustration 2: Augmentation de la capacité des chauffages électriques en Suisse parallèlement à l'augmentation de celle du nucléaire (gauche) et exemple des incitations tarifaires pour les chauffages électriques en 2007. Source: [9]

Une évolution semblable s'est profilée avec le développement de la capacité des centrales à accumulation par pompage. Aujourd'hui, avec 1.75 GW, cela représente plus que la puissance cumulée des trois plus anciennes centrales nucléaires suisses. Ces centrales de pompage-turbinage consomment essentiellement la nuit.

Les **pointes de consommation** durant le jour sont aujourd'hui couvertes de manière flexible (cf. Illustration 3 ci-dessous présentant l'évolution de la production durant 4 jours exemplaires en 2011). Illustration 3 montre tout d'abord que les **centrales à accumulation mettent à disposition aujourd'hui déjà, à court terme, des puissances importantes – une bonne base pour le bouquet 100%POUR**. Deuxièmement, il est évident qu'avec les débits élevés des affluents en été, les centrales au fil de l'eau ont une puissance bien plus importante en été qu'en hiver; la révision des centrales nucléaires se fait à cette saison d'où leur baisse importante de puissance en été.

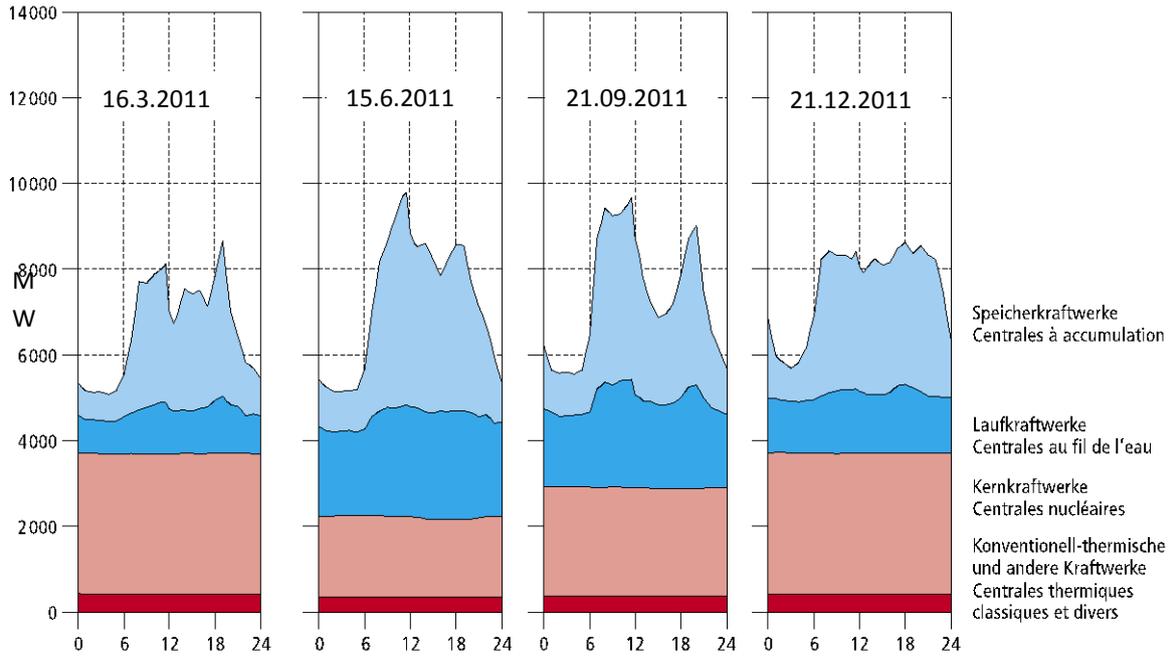


Illustration 3: Production du parc énergétique suisse durant 4 mercredis exemplaires en mars, juin, septembre et décembre 2011 (Source: Statistique suisse de l'électricité 2011, page 30)

### L'import-export pour compenser les variations saisonnières

La **sécurité saisonnière de l'approvisionnement** est aujourd'hui garantie par l'importation et l'exportation, comme le montre l'illustration ci-dessous:

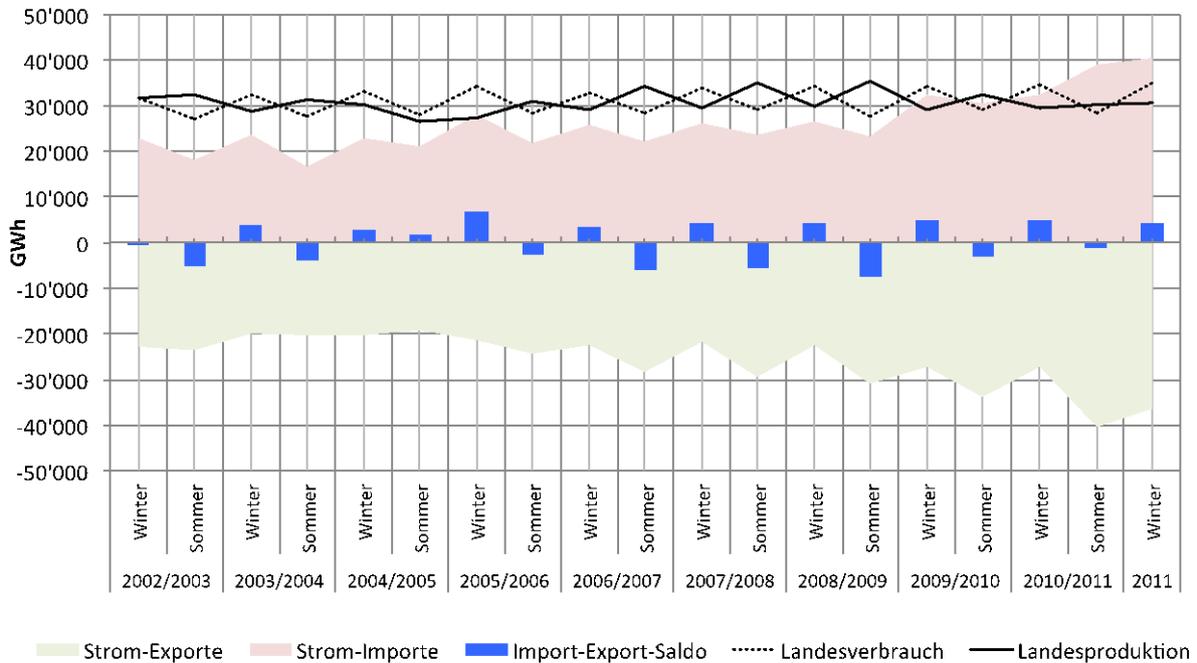


Illustration 4: consommation et production semestrielles d'électricité (lignes noires) ainsi qu'importation et exportation en Suisse de l'hiver 2002 à l'hiver 2011 (source: Statistique suisse de l'électricité 2002 à 2011, illustration Greenpeace)



Illustration 4 montre que la Suisse effectue des échanges d'électricité avec d'autres pays. A peu près autant de courant est importé qu'exporté (surfaces rouge et verte) que consommé dans le pays (ligne pointillée). En hiver, pour toutes les années représentées, on relève une importation nette de courant (barrette bleue) afin de compenser la différence entre la consommation et la production indigènes (ligne pleine). En hiver 2005/2006, avec 6'931 GWh, plus de 20% de la consommation indigène nette a été importée.

Dans le contexte européen, il n'y a pas de risque de pénurie de courant en hiver dans un avenir prévisible. L'Europe dispose actuellement d'un parc de centrales électriques qui peut produire en hiver nettement plus de courant que celui consommé. Ainsi, le premier pays importateur (Italie) pourrait s'approvisionner seul en courant. Mais cela n'est pas le cas car de nombreuses centrales à mazout – comme celle de Chavalon (CH) – ne sont plus exploitées pour des raisons économiques. Un approvisionnement suffisant en électricité est aujourd'hui une question de prix que l'on est d'accord de mettre.

### Réseau électrique top-down pour les grosses entreprises et import-export

Le réseau électrique actuel suisse a été optimisé selon la structure suivante: **la Suisse dispose d'un réseau électrique optimisé avec d'immenses capacités transfrontalières grâce à de grandes centrales et de l'import-export de courant.** Ceci garantit que les importantes quantités de courant produites par les grandes centrales soient dirigées vers des interconnexions transfrontalières et vers les consommateurs (cf. illustration ci-dessous). Parmi les consommateurs, on trouve les centrales de pompage-turbinage qui sont aujourd'hui directement reliées aux grosses centrales et aux interconnexions transfrontalières.

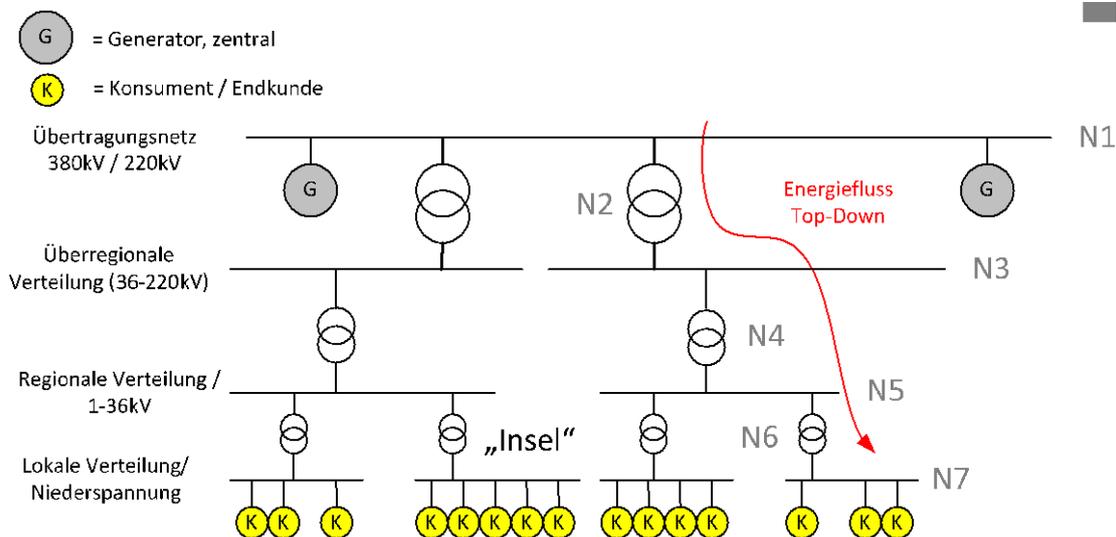


Illustration 5, architecture du réseau actuel, Source: Super Computing Systems 2013 [18]

**Aucun autre pays n'a un réseau électrique aussi dense que la Suisse.** Nous disposons de plus de 6'700 kilomètres de lignes à haute tension sur 12'000 pylônes, 245'000 kilomètres de réseau de distribution et plus de 40 interconnexions transfrontalières à l'étranger [20]. Nos capacités transfrontalières sont si importantes que nous pourrions théoriquement couvrir la totalité de la consommation du pays par l'importation en cas d'une hypothétique défaillance de toutes nos centrales [20].

La Suisse est le deuxième pays de transit en Europe après l'Allemagne [2] et joue un rôle déterminant pour le maintien de la stabilité du réseau. Des défaillances imprévues d'une partie du réseau ou de centrales, des chutes de la tension ou de la fréquence du réseau peuvent avoir pour conséquence



que des régions entières soient déconnectées du réseau pour éviter un blackout total. Mais la Suisse dispose, en hiver aussi, de capacités de production nettement plus importantes que la demande. Elle est de surcroît reliée à tous ses pays voisins par de nombreuses lignes. Il est donc peu probable que la Suisse soit déconnectée suite à une défaillance, car la situation des autres régions serait encore pire.

## Le système électrique suisse de demain

Pour pouvoir garantir à l'avenir une sécurité de l'approvisionnement à 100% avec des énergies renouvelables, les anciennes structures doivent être adaptées et le système électrique doit être plus flexible. L'objectif doit être de pouvoir compenser, comme aujourd'hui, à court, moyen et long terme, les différences entre la production et la demande, en tout temps. Trois défis doivent être relevés dans la perspective d'un avenir 100% POUR:

1. Garantir la sécurité de l'approvisionnement en hiver.
2. Faire face aux variations à court terme, en particulier faire face aux pointes de production en été qui dépassent largement la demande.
3. Adapter le réseau pour une intégration optimale des énergies renouvelables et une meilleure efficacité énergétique.

## Sécurité de l'approvisionnement en hiver

### Le rôle des énergies renouvelables fluctuantes

Les installations photovoltaïques et les centrales hydrauliques au fil de l'eau ont leur pic de production en été, lorsque la demande en courant est plutôt faible. Par contre, la production des centrales hydrauliques et solaires est plutôt faible en hiver en raison des faibles débits des cours d'eau et du faible ensoleillement alors que la consommation est traditionnellement plus élevée. (cf. Illustration 6).

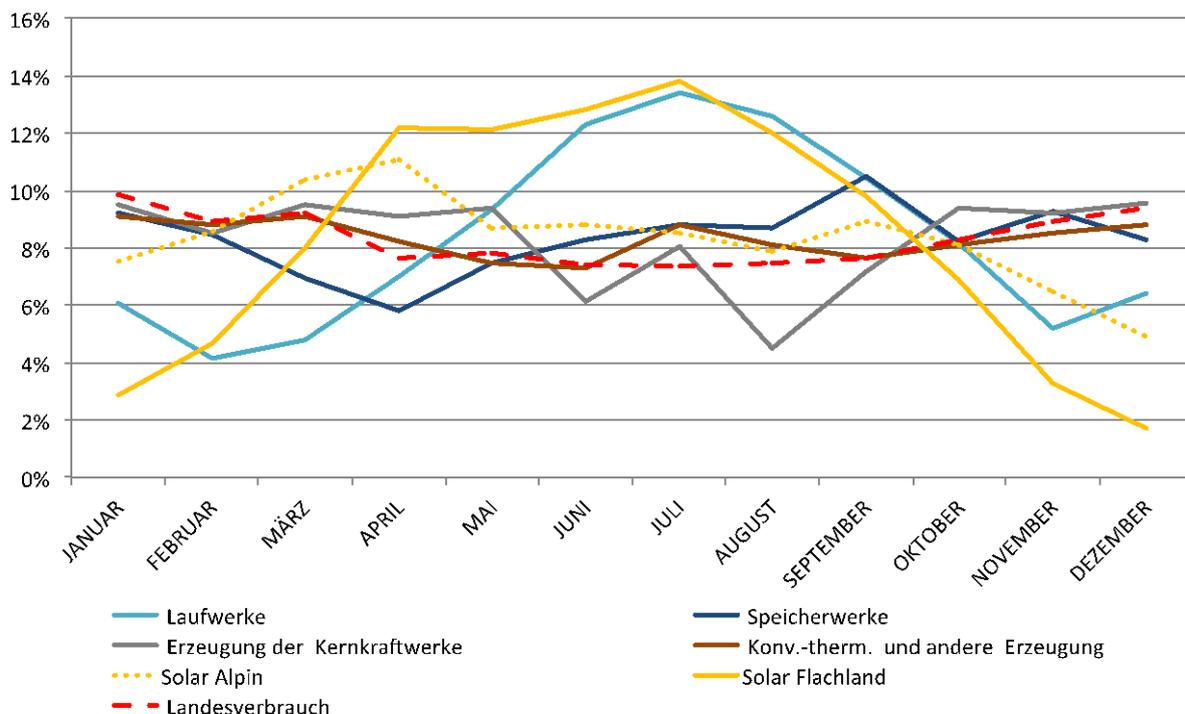


Illustration 6: part de production mensuelle (par rapport à la production annuelle) des différentes technologies et part de consommation mensuelle par rapport à la consommation annuelle en 2011 (Source: [6]; valeurs de production solaire: [16]; illustration Greenpeace)



**Les modélisations heure par heure des différents scénarios futurs d'approvisionnement électrique, figurant dans toutes les études disponibles, montrent que la Suisse est dans une très bonne position.** Les experts de Pöyry Management Consulting AG écrivent dans leur analyse réalisée pour le compte de l'Association des entreprises électriques suisses (AES) que la Suisse, grâce à la part importante de la force hydraulique dans la production de courant, est en bonne position pour faire face à une plus large échelle à l'injection toujours plus fluctuante de courant éolien et solaire. Ils relèvent également, qu'en comparaison aux autres pays, la nécessité de transformer le système de production est modérée [14, page 11 et 36].

Les conclusions de 6 études actuelles sont résumées ci-dessous:

Etude	Types de calculs	Résultats pour évaluer la sécurité de l'approvisionnement saisonnière
[13] Nordmann et Remund (2012): L'évolution des besoins de stockage au fur et à mesure de la sortie du nucléaire, dans l'hypothèse où l'on remplace 70 % du nucléaire par du photovoltaïque.	Modélisation sur toute l'année, heure par heure, pour trois scénarios avec respectivement 6, 12 et 18 TWh/a de courant solaire et 1.2, 2.4, 3.9 TWh/a de courant éolien pour remplacer l'énergie nucléaire. Les données de consommation et météorologiques sont basées sur les valeurs de 2008 à 2011.	→ <b>6 TWh/a</b> de courant PV et 1.2 TWh/a de courant éolien peuvent être intégrés dans le système électrique actuel sans stockage supplémentaire, sans modification du bilan import-export 2008-2011. → Un doublement de l'injection du courant PV à <b>12 TWh/a</b> (et 2.4 TWh/a éolien) implique 15% de capacités supplémentaires de stockage (1.3 TWh) pour un transfert de l'été à l'hiver, sans augmentation de l'importation. → Une augmentation supplémentaire de l'injection du courant PV à <b>18 TWh/a</b> (et 3.9 TWh/a éolien) demanderait un accroissement de 30% de nos capacités de stockage existantes (2.6TWh), sans modifier les soldes d'exportation et d'importation actuels.
[15] PROGNOSES (2012): „Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050“ (annexe II.3 fluktuierende Stromerzeugung; page 790 ff)	Modélisation sur toute l'année, heure par heure, de la demande et de l'offre en électricité sur la base des données météorologiques réelles des années précédentes et hypothèses détaillées pour les développements futurs.	→ Avec <b>11,12 TWh/a</b> de courant PV (scénario nouvelle politique énergétique, variantes d'offre d'électricité C+E), il n'y a jamais de pénurie dans le système. Cependant, dans ce scénario, les pointes estivales de production PV sont réglementées et une à deux centrales à gaz sont utilisées en hiver. Si l'ensemble de la production PV est stockée en été et utilisée en hiver à la place de centrales à gaz, il faudrait 0.97 TWh/a de capacité de stockage supplémentaire. Des options pour optimiser le système telles que Demand-Side-Management, Peak-Shaving ou meilleure orientation des installations PV, utilisation de batteries et l'option déjà utilisée aujourd'hui d'import et d'export ont été exclues.
[7] EPF Zurich (2011): Energie-zukunft Schweiz	Approche exemplaire de la sécurité de l'approvisionnement pour une année entière à l'aide de simulations heure par heure sur plusieurs jours.	→ Les auteurs écrivent: „D'ici 2040, des capacités supplémentaires de stockage ne sont pas nécessaires pour le pompage-turbinage“ (page 30). D'ici là, selon ce scénario de l'EPF, <b>10 TWh/a</b> de courant solaire sont couplés au réseau. → Pour une part plus importante de solaire, des capacités supplémentaires de stockage sont nécessaires qui, selon les auteurs, devraient d'ici là être disponibles à des prix abordables.
[14] Pöyry (2012): Angebot und Nachfrage nach flexiblen Erzeugungskapazitäten in der Schweiz (Etude sur mandat de l'AES)	Modélisation sur toute l'année, heure par heure, de la demande et de l'offre en électricité sur la base des données météorologiques réelles de 2005 à 2010 et illustration détaillée de la Suisse dans le marché européen de l'électricité.	→ Dans ce modèle, les importations et les exportations sont comptabilisées et optimisées en fonction du système européen dans son ensemble et de la Suisse. L'analyse détaillée montre pour tous les scénarios que l'échange flexible avec les autres pays peut augmenter et peut devenir un véritable pilier de la sécurité de l'approvisionnement. → „Dans le scénario 3 (15 GW / <b>14 TWh/a</b> solaire et 2 GW / 2 TWh/a éolien en 2050), en raison de la faible croissance de la demande et du fort développement des énergies renouvelables, il n'y aura plus besoin de centrales à gaz supplémentaire après 2035“ (page 41). La Suisse est même un exportateur net jusqu'en 2050 „en raison de la production importante à partir des énergies renouvelables“ (page 41).
[10] Les Verts	Modélisation sur toute	→ La nécessité de stockage saisonnier augmente avec l'hypothèse que



Etude	Types de calculs	Résultats pour évaluer la sécurité de l'approvisionnement saisonnière
suisses (2012): Energiestrategie 2050 der Grünen, Version 1.7	l'année, heure par heure, de la demande et de l'offre en électricité pour différentes variantes d'approvisionnement en électricité sur la base des données météorologiques réelles de 2009.	l'import-export reste dans le cadre actuel. Dans le scénario réforme énergétique, avec une forte demande et des énergies renouvelables fluctuantes ( <b>17.7 TWh/a</b> PV et 4.8 TWh/a éolien), la nécessité de stockage s'élève à 1 TWh/a environ. Pour transférer cette quantité d'énergie, les stockages actuels pourraient être augmentés de 1 à 1.5 TWh (12-17%) mais le réchauffement climatique va à l'encontre de cette nécessité d'expansion car la fonte des neiges débute plus tôt.  D'autres options sont l'augmentation de l'importation de courant, la construction de davantage d'installations PV à la montagne, un développement plus important de l'éolien, une augmentation de l'efficacité électrique ou nouvelles centrales à énergie fossile (cf. page 29 pour la quantification).
[19] Swisscleantech (2012): Cleantech Energiestrategie, V 3.0	Approche exemplaire du solde mensuel en tenant compte des analyses heure par heure.	→ Le scénario de Swisscleantech prévoit pour 2050 une production PV de <b>22.5 TWh/a</b> et une production de courant éolien de <b>7.1 TWh/a</b> . Pour garantir la sécurité saisonnière de l'approvisionnement, l'option d'importer davantage d'énergie éolienne en automne et au printemps est proposée. L'utilisation des lacs d'accumulation durant les mois critiques de novembre à mars est optimisée et la sécurité de l'approvisionnement est garantie en tout temps. L'importation nette annuelle s'élève à 2.7 TWh environ.
<p><b>RESUME:</b></p> <p>Dans le scénario 100%POUR des organisations environnemenales, la sécurité de l'approvisionnement peut être garantie en tout temps:</p> <p>→ <b>6 à 10 TWh de courant PV par an (10% à 17% des besoins actuels en courant)</b> peuvent être intégrés sans adaptations supplémentaires du réseau électrique.</p> <p>→ <b>12 TWh de courant PV par an (20% des besoins actuels en courant – objectif 2025 de 100%POUR)</b> peuvent être intégrés sans augmentation de la capacité saisonnière de stockage avec une légère augmentation à long terme du solde import-export de la Suisse.</p> <p>→ <b>Plus que 12 TWh de courant PV par an</b> peuvent être intégrés avec des adaptations. Il faudra augmenter l'efficacité électrique en hiver, augmenter la part des énergies renouvelables avec des pics hivernaux indigènes ou étrangers ou des capacités supplémentaires de stockage afin que la sécurité de l'approvisionnement électrique puisse être garantie en tout temps. <b>Mais cela n'implique pas un développement massif des capacités de stockage ou des pénuries hivernales menaçantes.</b></p>		

Les options stratégiques décrites ci-dessous permettent de compenser les éventuels déficits de production durant l'hiver.

### Contributions possibles de l'efficacité électrique

**Les mesures pour augmenter l'efficacité électrique** sont centrales car elles permettent d'augmenter la sécurité de l'approvisionnement et d'éviter d'éventuelles carences ou une trop grande dépendance envers l'importation, en particulier en hiver. Le remplacement des chauffages électriques à lui seul permet de réduire la consommation hivernale d'environ 3 TWh [12, 17]. Si l'efficacité électrique était mise en œuvre de manière conséquente (remplacement des boilers électriques, pompes de circulation des chauffages plus efficaces, éclairages et appareils électriques), la baisse estimée de consommation hivernale d'électricité serait de 6 TWh (10% de la consommation totale ou 17.5% de la consommation électrique hivernale en 2011) [12, 17].

### Contributions possibles du renouvelable avec pointes hivernales indigène ou étranger

**Le courant d'origine renouvelable avec pointes hivernales est développé ou l'importation de courant est augmentée.** Le courant d'origine renouvelable avec pointes hivernales compte:

- L'énergie éolienne (environ deux tiers de la production s'effectue en hiver) peut être optimisée en Suisse ou être importée des pays du nord. Aujourd'hui déjà, des compagnies d'électricité suisses investissent dans des installations éoliennes à l'étranger (par exemple ewz, EKZ et IWB). Les conditions pour importer du courant provenant de contrées éloignées



sont des lignes électriques de courant continu qui permettent de transporter du courant, sur de grandes distances, avec peu de pertes.

- La biomasse (y compris valorisation des déchets) dont l'utilisation durant l'hiver peut être optimisée de sorte que deux tiers de la production annuelle ait lieu en hiver (production de courant et de chaleur dans des centrales de cogénération de biomasse PCCE).
- La géothermie qui permettra à l'avenir de livrer du courant sûr et contrôlable en hiver.

### Contributions possibles des technologies de stockage supplémentaires

En principe, **des capacités supplémentaires de stockage à long terme** peuvent contribuer à la sécurité de l'approvisionnement en hiver. Il peut s'agir d'une élévation des murs des barrages ou d'autres concepts de stockage tels que l'hydrogène ou le méthane de synthèse (power-to-gas), les batteries redox-flow, les réservoirs d'air comprimé ou le stockage d'énergie électrothermique. La brève description faite ci-dessous des technologies de stockage supplémentaires montre que plusieurs options sont possibles, si les besoins augmentent à l'avenir.

- **Power-to-gas:** Lorsque du courant d'origine renouvelable est produit en surplus, de l'hydrogène et/ou du méthane (gaz naturel) peuvent être synthétisés. Le gaz peut ensuite être stocké dans le réseau puis être transformé, en hiver, en courant et en chaleur dans une centrale de couplage chaleur-force. Ce procédé est utilisé aujourd'hui déjà par le distributeur d'énergie allemand greenpeace energy en combinaison avec des éoliennes. Le gaz synthétique peut aussi être utilisé pour remplacer des énergies fossiles dans d'autres secteurs: transports et procédés visant à produire de la chaleur à haute température. Le degré d'efficacité de transformation de courant en gaz est d'environ 70% et celui de transformation de courant, en gaz puis en en courant est de 40% seulement. Le procédé a encore de plus grands potentiels mais il n'a pas encore été confirmé dans de grands systèmes.
- **Les batteries redox-flow:** Comme dans ce type de batteries l'énergie est stockée dans des réservoirs d'électrolytes placés à l'extérieur de la batterie, le système peut être utilisé pour un stockage à long terme. La densité d'énergie est relativement haute avec 90Wh/litre ce qui permet le stockage de grosses quantités d'énergies. L'efficacité énergétique peut atteindre 90% ou plus.
- **Réservoirs d'air comprimé:** Lorsque du courant est produit en surplus, il peut être utilisé pour comprimer de l'air qui est ensuite stocké à haute pression en sous-sol. Lorsque l'air est détendu, un générateur peut être actionné. La densité d'énergie est de 2-5Wh/litre, elle est donc nettement inférieure à celle des batteries redox-flow. L'efficacité énergétique se situe entre 40% et 70% si la chaleur libérée lors de la compression de l'air est récupérée, stockée, puis réutilisée pour la détente de l'air (stockage adiabatique).
- **Stockage d'énergie électrothermique:** Cette catégorie fait partie des concepts de stockage à l'étude. ABB développe un système novateur nommé «TEES». Le courant en surplus est stocké sous forme de chaleur qui peut à nouveau être transformée en courant. Aucune substance toxique n'est utilisée (le support de stockage est l'eau), l'efficacité énergétique est de 60-70% par cycle de stockage et les ordres de grandeur réalisables se situent entre 5MW / 20 MWh, voire même 50MW / 400 MWh. Il n'y a pas encore d'installation pilote.

## La sécurité de l'approvisionnement avec des carences ou des surplus de production

### Faire face aux carences de production

La Suisse est en très bonne position pour compenser les **carences de production** de courtes et moyennes durées. Aujourd'hui déjà, avec les centrales hydrauliques d'une puissance maximale de



13.7 GW et d'un volume maximal de stockage de 8.8 TWh (15% de la consommation annuelle d'électricité), la consommation maximum de courant peut être couverte, à court et moyen terme, et le maintien de la tension peut être garanti [6]. Ceci même si tous les autres modes de production sont défaillants. Le calcul hypothétique suivant illustre cette position confortable: la demande en 2011 s'élevait à 10.4 GW [3] au maximum et la consommation quotidienne moyenne d'électricité, en fonction du jour de la semaine et de la saison, de 0.154 (en juillet) à 0.209 (en janvier) TWh [6]. La Suisse peut ainsi théoriquement couvrir durant au moins 42 jours sa consommation la plus élevée de courant, si ses lacs de retenue sont remplis (le niveau le plus haut est normalement atteint à la fin de l'automne). Avec le niveau de stockage le plus bas de 2011 (il s'élevait début avril à 16% seulement du potentiel maximal de stockage) l'énergie disponible peut théoriquement couvrir durant 7 jours la consommation la plus élevée.

Le calcul est hypothétique car les lacs de retenue ne peuvent pas être complètement vidés et il est très peu probable que, sur une longue période, l'ensemble des autres modes de production soient défaillants et que les affluents soient asséchés. Mais le calcul montre clairement que la Suisse est très bien armée pour faire face, durant de courtes ou de moyennes durées, à des quantités de soleil ou de vent insuffisantes grâce au potentiel disponible des ses centrales hydrauliques.

Si maintenant l'ensoleillement est très important, la question de la gestion **des pics de production de courte durée**, dépassant largement la demande, se pose.

#### Faire face aux surplus de production

Avec le bouquet électrique 100%POUR de l'Alliance-Environnement, les installations solaires produisent en 2025 au moins 12 TWh par an et en 2035 au moins 15 TWh par an. Cela signifie qu'à long terme, il faut compter sur une production PV de 15 GW. On estime que maximum deux tiers de la puissance nominale de toutes les installations sont disponibles en même temps sur le réseau [13] (environ 15% sont perdus lors de la transformation, et le reste s'explique par la variabilité des emplacements, des orientations et des inclinaisons des installations). Pour une puissance installée de 15 GW, une puissance maximale d'injection dans le réseau de 10 GW peut ainsi être atteinte. Si on ajoute les centrales au fil de l'eau qui sont peu modulables, la charge de production, sans mesures particulières, s'élève à maximum 13 GW. Un GW supplémentaire peut être ajouté avec les éoliennes et les centrales à biomasse qui ne sont pas totalement modulables.

**Ainsi, sans mesures particulières et lors d'un beau week-end venteux d'été, on disposerait d'une puissance de 14 GW pour une demande de 6 GW environ.** Les mesures suivantes permettent de réduire ce déséquilibre:

- **Peak-shaving et orientation optimale:** les pics rapides des installations solaires peuvent être réduits par certaines mesures. Une limitation à par exemple 70% de la puissance nominale lors de quelques heures bien ciblées (= peak-shaving)<sup>2</sup> et une orientation des installations pour déplacer la production vers les heures matinales et du soir ainsi qu'une production hivernale<sup>3</sup> permettent de réduire les pics de production de 2 GW environ.
- **Demand Side Management (DSM):** grâce à la régulation de la demande (DSM), environ 1 GW de puissance consommée peut être déplacée aux heures de forte production [13].
- **Utilisation des installations de pompage-turbinage:** la différence entre la production et la consommation de 5 GW qui subsiste, malgré les mesures évoquées ci-dessus, peut être utili-

<sup>2</sup> Cette mesure peut être mise en œuvre aujourd'hui déjà avec des onduleurs intelligents mais les incitations font encore défaut. Une telle limitation de la puissance [11] permet de réduire les pertes de production de 3-5% sur une année.

<sup>3</sup> Orientation Est et Ouest et installations verticales dans les régions de montagnes.



sée par des installations d'accumulation par pompage ou stockée dans des batteries. Actuellement, plusieurs centrales d'accumulation par pompage sont en construction et permettront de valoriser 4 GW<sup>4</sup> en 2025. Nous sommes ainsi bien équipés pour utiliser les excédents de production dans un avenir proche. Les batteries de stockage offrent d'autres possibilités.

- **Autres technologies de stockage (voir aussi page 9):** les batteries et autres systèmes de stockage permettent de lisser les pointes de production rapide sur le lieu de production et permettent de décharger le réseau. En Allemagne, toujours plus de systèmes solaires sont commercialisés avec un système de stockage intégré (cf. par exemple [8]). Les auteurs de l'étude de l'ETH de Zurich sur l'avenir énergétique [7] écrivent, au sujet des batteries de stockage, qu'avec une puissance PV de 14 GW, plus 4 GW d'éolien et d'hydraulique, avec une demande de 10 GW et une accumulation par pompage de 5 GW, il ne reste finalement que durant quelques heures 3 GW qui doivent être stockés. Il faudrait donc des batteries d'une capacité de stockage de 12 GWh (environ 1.33 kWh par habitant) ce qui ne devrait pas causer des problèmes de coûts à l'heure actuelle ([7] page 27).

**Avec la technologie actuelle et tant que nous disposons de capacités de DSM et d'accumulation par pompage, l'utilisation de batteries doit être considérée de manière critique pour des raisons écologiques.** Pour des raisons économiques également, le développement du réseau de distribution et de transport doit être privilégié par rapport à l'utilisation de batteries décentralisées (cf. [3], [1]). Si les batteries doivent être utilisées à l'avenir pour décharger le réseau, elles devraient être régulées de manière centralisée ou le prix devrait être ajusté aux variations de la demande (dynamic pricing). L'objectif étant d'utiliser le courant produit le plus possible directement et de le stocker uniquement dans une batterie quand les surplus de production ne peuvent pas être utilisés par un consommateur. Le stockage power-to-gas devrait dans un proche avenir aussi permettre de stocker les surplus de courant.

### Le réseau électrique de demain

Le réseau électrique de demain est diversifié, décentralisé, intelligent et son contrôle est plus exigeant qu'actuellement. Le réseau électrique existant, conçu pour répondre aux besoins des usines électriques centralisées, du commerce international et des consommateurs d'électricité surtout statiques, sera optimisé pour le tournant énergétique avec des petites et micro-centrales électriques décentralisées et des consommateurs flexibles. Un des avantages du réseau de demain est le fait que les installations de production sont proches des consommateurs, ce qui réduit les besoins d'expansion du réseau.

### Les réseaux top-down deviennent des réseaux bidirectionnels et intelligents

Les flux de courant qui allaient toujours de haut en bas (top-down) iront à l'avenir aussi de bas en haut (bottom-up). Cela nécessite des exigences plus élevées en matière de gestion du réseau, en premier lieu dans le domaine du contrôle de charge. Le réseau électrique de demain intègre tous les acteurs du marché de l'électricité dans un seul système. En plus des systèmes de stockage et de pompage-turbinage déjà utilisés avec souplesse aujourd'hui, à l'avenir, les consommateurs et toutes les installations de production décentralisées seront également intégrés. A cet effet, les informations sur l'état et les flux de charge des différents éléments du réseau, comme par exemple les installa-

<sup>4</sup> En sus des 1.75 GW disponibles aujourd'hui, les installations suivantes sont en construction: Linthal 2015 avec 1 GW, Nante der Drance avec 0.9 GW et Hongrin avec 0.24 GW (total: 3.89 GW). Installations planifiées: Lago Bianco avec 1 GW, Grimsel 3 avec 0.66 GW, Val d'Ambra avec 0.07 GW, Verzasca II avec 0.3 GW et ArgessIMO avec 0.12 GW (total général = 6.04 GW).



tions de production, les consommateurs (ménages ou industries) ou les stations de transformation, doivent pouvoir être récupérées et traitées en temps réels.

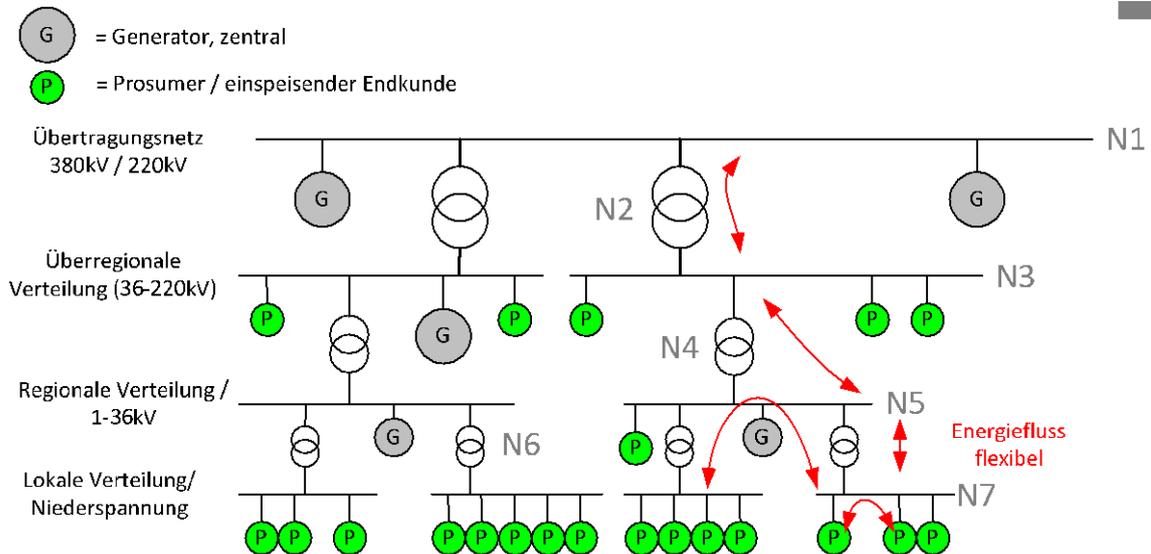


Illustration 7, architecture du réseau de demain. Source: Super Computing Systems 2013 [18]

Les groupes de gros consommateurs comme les pompes à chaleur, les chauffe-eau, les congélateurs ou les batteries de voitures sont intégrées à la gestion du réseau. Cela peut devoir nécessiter certaines adaptations du réseau électrique. Les efforts et les coûts nécessaires sont présentés dans le paragraphe suivant.

**Quel développement du réseau est nécessaire au tournant énergétique suisse?**

Comme le réseau électrique suisse a en moyenne 40 ans, une grande partie du réseau devra être rénovée prochainement. Ces investissements devront être faits dans tous les cas et ne doivent pas être confondus avec les développements liés au tournant énergétique. Nous avons regroupé ci-dessous des citations relatives aux coûts liés au développement du réseau de transport et de distribution tirées des études les plus récentes:

Etude	Résultats de l'évaluation des coûts et de l'étendue des besoins de développement du réseau électrique
<b>Réseau de transport</b>	
[4] Consentec 2012, Einfluss verschiedener Stromangebotsvarianten auf das Übertragungsnetz der Schweiz, Untersuchung im Auftrag des BfE	<p>→ <b>Le scénario avec une part importante d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique nécessite peu de développement du réseau de transport:</b></p> <p>Pour le scénario NPE „Nouvelle politique énergétique“, les coûts liés au développement supplémentaire du réseau se situent dans une fourchette de 185-280 mio. CHF d'ici 2035 et de 330-500 mio. CHF d'ici 2050.</p> <p>Pour le scénario PPA „Poursuite de la politique actuelle“ les coûts se situent entre 360-540 mio. CHF d'ici 2035 et environ 475-710 Mio. CHF d'ici 2050.</p>
<b>Réseau de distribution</b>	
[5] Consentec 2012: Auswirkungen eines verstärkten Ausbaus der dezentralen Erzeugung auf die Schweizer Verteilnetze. Etude mandatée par l'OFEN.	<p>→ <b>Les réseaux actuels de moyenne et basse tension disposent de réserves car la demande est faible pour l'instant:</b> pour une injection de courant de 5 GW environ provenant des nouvelles énergies renouvelables décentralisées, seules des mesures ponctuelles sont nécessaires.</p> <p>→ D'après les calculs, il faut s'attendre à des coûts plus élevés pour le développement à long terme du réseau de distribution que pour celui du réseau de transport: d'ici 2050, pour le scénario PPA „Poursuite de la politique actuelle“ le développement du réseau coûtera entre 3.85 et 10.1 mrd. CHF en fonction des variantes. Pour le scénario NPE „Nouvelle politique énergétique“, les coûts sont chiffrés entre 4.5 et 12.6 mrd. CHF (page</p>



Etude	Résultats de l'évaluation des coûts et de l'étendue des besoins de développement du réseau électrique
	<p>38). Les valeurs inférieures (respectivement 3.85 et 4.5) représentent les coûts avec des mesures innovantes. <b>Les différences de coûts pour les variantes avec une part importante d'énergies renouvelables NPE se situent entre 0.65 et 2 mrd. CHF d'ici 2050.</b></p> <p>→ Les mesures innovantes réduisent de 50% et plus les investissements nécessaires par rapport au développement classique du réseau. Plus le niveau du réseau sur lequel les mesures d'optimisation sont faites est bas, moins les coûts sont importants.</p>
<p><b>RESUME:</b></p> <p>Le réseau électrique doit dans tous les cas être rénové. Même avec la variante „Poursuite de la politique actuelle“, les investissements qui doivent être faits dans les réseaux de transport et de distribution sont importants. <b>Avec un développement plus important des énergies renouvelables (variante „Nouvelle politique énergétique“) les coûts liés au réseau de transport sont moins élevés (environ 0.2 milliards d'économies). Au niveau du réseau de distribution, environ 0.65 milliards de francs devront être investis d'ici 2050 pour des mesures innovantes.</b></p> <p>Les surcoûts calculés pour le réseau de distribution représenteront en 2050 environ 50 à 70 CHF par année pour un ménage moyen. Les coûts annuels s'élèveront donc à 600-620 CHF ([5], page 45) plutôt qu'à 550 CHF (scénario „ Poursuite de la politique actuelle “). Le même ménage paie aujourd'hui environ 450 CHF par an pour l'utilisation du réseau</p>	

## Résumé et recommandations

Toutes les analyses montrent que les centrales hydrauliques en Suisse et le développement programmé des centrales de pompage-turbinage créent les conditions idéales pour une intégration parfaite de grandes quantités d'énergies renouvelables: le photovoltaïque peut couvrir jusqu'à 20% des besoins en électricité sans devoir investir dans des capacités d'équilibrage supplémentaires.

L'approvisionnement électrique 100% renouvelable avec l'hydraulique, le photovoltaïque, la biomasse, l'éolien et la géothermie, dispose de quatre approches garantissant la sécurité de l'approvisionnement qui peuvent être complémentaires:

1. Optimisation de la consommation d'électricité (essentiellement efficacité électrique hivernale et lissage à court terme des pics de consommation) et/ou
2. Optimisation de la production d'électricité (essentiellement installations solaires avec une orientation optimale et limitations des pics de puissance ainsi qu'installations à biogaz et usines d'incinération avec des pointes hivernales) et/ou
3. Echanges stratégiques avec le marché électrique européen (essentiellement importation de courant éolien - plusieurs compagnies d'électricité suisses investissent dans de grands parcs éoliens et des installations solaires à l'étranger) et/ou
4. Développement de solutions de stockage supplémentaires (power to gas, batterie de stockage et autres).

Pour un approvisionnement sûr, basé à 100% sur les énergies renouvelables, à l'avenir il n'y aura pas besoin de centrales à gaz, grâce aux centrales hydrauliques existantes.

**Une politique conséquente en faveur d'un approvisionnement électrique sûr, 100% renouvelable et sans émissions supplémentaires de CO<sub>2</sub>, augmente la sécurité de l'approvisionnement notamment parce qu'elle diminue notre dépendance envers les pays exportateurs de gaz comme la Russie.**



.....

**La bonne position de la Suisse doit être exploitée de manière optimale pour le développement et l'intégration, sans pénurie, des énergies renouvelables. A long terme, une combinaison, respectueuse de l'environnement et peu coûteuse, des quatre éléments ci-dessus doit être réalisée.**



## Sources et liens

- [1] Agora Energiewende (2012): 12 Thesen zur Energiewende. Une contribution au débat sur les principaux défis du marché de l'électricité. Révision et réimpression février 2013, Berlin. Consultable sous: <http://www.agora-energiewende.de/themen/die-energiewende/detailansicht/article/12-thesen-zur-energiewende/> (16.6.2013)
- [2] Avenir Suisse: Poster „Dans le réseau“ [http://www.avenir-suisse.ch/wp-content/uploads/2012/08/120973\\_avenir\\_pl\\_fr\\_internet2.pdf](http://www.avenir-suisse.ch/wp-content/uploads/2012/08/120973_avenir_pl_fr_internet2.pdf) (11.6.2013)
- [3] Baumgartner 2012: Fluktuierende erneuerbare Stromerzeugung und Speicher – Fallstudie Leitungsbau versus Speicher. Présentation du 3.8.2012, Consultable sous: [http://www.engineering.zhaw.ch/fileadmin/user\\_upload/engineering/veranstaltungen/EuU-A/2012/120308\\_Franz\\_Baumgartner\\_Fluktuierende\\_Erneuerbare.pdf](http://www.engineering.zhaw.ch/fileadmin/user_upload/engineering/veranstaltungen/EuU-A/2012/120308_Franz_Baumgartner_Fluktuierende_Erneuerbare.pdf) (16.6.2013)
- [4] Consentec 2012: Einfluss verschiedener Stromangebotsvarianten auf das Übertragungsnetz der Schweiz. Untersuchung im Auftrag des BfE. Consultable sous: [http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00527/?lang=de&dossier\\_id=05024](http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00527/?lang=de&dossier_id=05024) (13.6.2013)
- [5] Consentec 2012: Auswirkungen eines verstärkten Ausbaus der dezentralen Erzeugung auf die Schweizer Verteilnetze. Recherche sur mandat de l'OFEN. Consultable sous: [http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00527/?lang=de&dossier\\_id=05024](http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00527/?lang=de&dossier_id=05024) (13.6.2013)
- [6] Statistique suisse de l'électricité 2011: [http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00630/index.html?lang=fr&dossier\\_id=00765](http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00630/index.html?lang=fr&dossier_id=00765) (16.6.2013)
- [7] ETH (2011): Energiezukunft Schweiz, Göran Andersson, Konstantinos Boulouchos und Lucas Bretschger, Novembre 2011. Consultable sous: [http://www.ces.ethz.ch/energiegesprach/Energiezukunft\\_Schweiz\\_20111115.pdf](http://www.ces.ethz.ch/energiegesprach/Energiezukunft_Schweiz_20111115.pdf) (13.6.2013)
- [8] Fraunhofer-Institut ISE (2013): Speicherstudie 2013, Kurzgutachten zur Abschätzung und Einordnung energiewirtschaftlicher, ökonomischer und anderer Effekte bei Förderung von objektgebundenen elektrochemischen Speichern; Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Janvier 2013. Consultable sous: <http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien-und-positionspapiere/speicherstudie-2013> (16.6.2013)
- [9] Greenpeace (2007): Renoncer au chauffage électrique: un bon calcul pour l'environnement, l'économie et la société. Consultable sous: [http://www.greenpeace.org/switzerland/Global/switzerland/fr/publications/energie/2009\\_Energie\\_Brochure\\_ChauffageElectrique.pdf](http://www.greenpeace.org/switzerland/Global/switzerland/fr/publications/energie/2009_Energie_Brochure_ChauffageElectrique.pdf) (13.6.2013)
- [10] Les Verts suisses (2012): Hintergrundbericht zur Energiestrategie 2050 der Grünen, Version 1.7. Consultable sous: <http://www.gruene.ch/energiestrategien> (13.6.2013)
- [11] Häberlin 2011: Wie viel Solarstrom erträgt das Netz? Article tiré de la revue Elektrotechnik Nr. 8 2011.
- [12] Nipkow 2009: Forschungsbericht Elektroheizungen: [http://www.energieeffizienz.ch/files/EH\\_Forschungsbericht\\_d.pdf](http://www.energieeffizienz.ch/files/EH_Forschungsbericht_d.pdf) (30.5.2013)
- [13] Nordmann et Remund (2012): L'évolution des besoins de stockage au fur et à mesure de la sortie du nucléaire, dans l'hypothèse où l'on remplace 70 % du nucléaire par du photovoltaïque. Consultable sous: [http://www.roger-nordmann.ch/articles/2012.10.21\\_Swissolar\\_Rapport\\_Remund-Nordmann\\_PV.pdf](http://www.roger-nordmann.ch/articles/2012.10.21_Swissolar_Rapport_Remund-Nordmann_PV.pdf) (13.6.2013)
- [14] Pöyry 2012: Angebot und Nachfrage nach flexiblen Erzeugungskapazitäten in der Schweiz (Etude mandatée par l'AES)
- [15] PROGNOSE (2012): „Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050“ (Annexe II.3 Fluktuierende Stromerzeugung; page 790 ff)
- [16] Rechsteiner (2012): 100% Erneuerbar. So gelingt der Umstieg auf saubere, erschwingliche Energien, Orell Füssli Verlag 2012.
- [17] SAFE 2011: Factsheet Strom-Sparpotenziale – Version 04/2011: [http://www.energieeffizienz.ch/files/SAFE\\_FS\\_Stromeffizienz\\_Tabelle\\_d.pdf](http://www.energieeffizienz.ch/files/SAFE_FS_Stromeffizienz_Tabelle_d.pdf) (30.5.2013)



[18] Super Computing Systems (2013): Graphiques tirés de la conférence du Prof. Anton Gunzinger lors des Energie-Cluster-Tagung du 23.05.2013. Consultable sous: <http://www.energie-cluster.ch/ecweb5/de/veranstaltungen/energie-aperos/int-netz-solothurn-2013-05-14.pdf>

[19] Swisscleantech (2012): Cleantech Energiestrategie (Version 3.0). Consultable sous: <http://www.swisscleantech.ch/?id=130> (14.6.2013)

[20] Swissgrid: Infos sur [www.swissgrid.ch](http://www.swissgrid.ch)

[21] Umweltallianz (2012): 100%POUR indigène, renouvelable, efficient. Consultable sous: <http://www.umweltallianz.ch/index.php?id=199&L=2> (14.6.2013)

## Contact

### ALLIANCE-ENVIRONNEMENT

Postgasse 15 | Postfach 817 | 3000 Berne 8  
 T (+41) 031 313 34 33 | 031 313 34 31 (dir.)  
[www.umweltallianz.ch](http://www.umweltallianz.ch); [info@umweltallianz.ch](mailto:info@umweltallianz.ch)

Georg Klingler

Expert pour les énergies renouvelables, Greenpeace Suisse  
 Tél +41 44 447 41 88  
 Courriel: [georg.klingler@greenpeace.org](mailto:georg.klingler@greenpeace.org)

<p><b>ÉNERGIE 2035</b>  <b>100%</b>  <b>POUR</b>  <b>INDIGÈNE</b>  <b>RENOUVELABLE</b>  <b>EFFICIENT</b></p>	<p><b>L'énergie c'est „NOUS“</b></p> <p>Concrétiser la mission 100%POUR (indigène, renouvelable, efficient) nous concerne tous. La route est longue et difficile. Nous pouvons nous approvisionner totalement en courant provenant de sources indigènes et renouvelables. Nous pouvons créer ce nouveau «NOUS» suisse: sûr, abordable et efficient. La voie vers une souveraineté électrique, sans nucléaire et sans centrales à gaz, apporte des avantages importants à l'industrie, au savoir-faire et à l'emploi en Suisse. Les ingénieurs, les chercheurs, les artisans, les politiciens, les autorités et les protecteurs de la nature sont concernés; mais «NOUS» aussi, particuliers avec nos habitudes de consommation, nous pouvons participer à un avenir électrique sûr, un avenir 100%POUR.</p> <p><a href="http://www.umweltallianz.ch/index.php?id=199&amp;L=2">http://www.umweltallianz.ch/index.php?id=199&amp;L=2</a></p>
--	--

