

## Remplacement de l'énergie atomique sans détérioration du bilan de CO<sub>2</sub>

### Rapport complémentaire

5 avril 2002

#### 1. But et situation initiale

Le 19 février 2002, la CEATE-N a chargé l'OFEN de rédiger un bref rapport sur le remplacement des centrales nucléaires existantes par des acquisitions de courant produit en Europe à partir d'installations éoliennes (voir annexe 1). Il s'agit donc de préciser en particulier les possibilités et les coûts d'acquisition de courant éolien, et les conséquences qui en résulteraient pour les réseaux électriques et l'emploi en Suisse.

L'OFEN a fait appel aux entreprises de conseil INFRAS, à Zurich, et Prognos AG, à Bâle (voir rapports annexés), pour l'assister dans les examens requis. Un spécialiste des réseaux (M. K. Werlen, Cygnus Engineering, Brigue) a également été consulté. Enfin, M. R. Rechsteiner, conseiller national, a signalé de précieuses sources – ce dont l'OFEN le remercie vivement.

Afin de connaître la «lacune dans l'approvisionnement» qu'entraînerait la limitation de la durée d'exploitation des centrales nucléaires (voir annexe 2), il a fallu émettre diverses hypothèses. Celles-ci se basent essentiellement sur les données générales figurant dans le message du 28 février 2001 concernant les initiatives atomiques:

- La demande de courant augmente modérément jusqu'en 2020, et se stabilise par la suite.
- La durée d'exploitation des centrales nucléaires existantes est limitée, comme demandé, à 40 ans. Dès 2024 (mise hors service de la centrale de Leibstadt), les contrats de fourniture d'électricité de longue durée avec la France sont dénoncés<sup>1</sup>.
- La production de courant non-nucléaire en Suisse n'augmente que modérément, en raison des conditions générales telles que supposées.
- Par souci de clarté, on suppose que la «lacune dans l'approvisionnement» n'est comblée qu'à partir de courant éolien importé (produit dans des installations construites à terre et en mer, pour moitié à chaque fois)<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> L'initiative populaire pendante Moratoire-plus prévoit une durée d'exploitation des centrales nucléaires limitée à 40 ans. La présente étude ne prend pas en compte la possibilité, prévue par cette initiative, de prolonger la durée d'exploitation de 10 ans à chaque fois, sur la base d'un arrêté fédéral soumis au référendum. Autre différence: les scénarios présentés dans le message relatif aux initiatives atomiques considèrent, contrairement à la présente étude, que les contrats de fourniture de longue durée existants avec la France seront honorés jusqu'à leur expiration, et qu'il sera possible de conclure dès 2020 de nouveaux contrats d'une ampleur équivalente aux précédents.

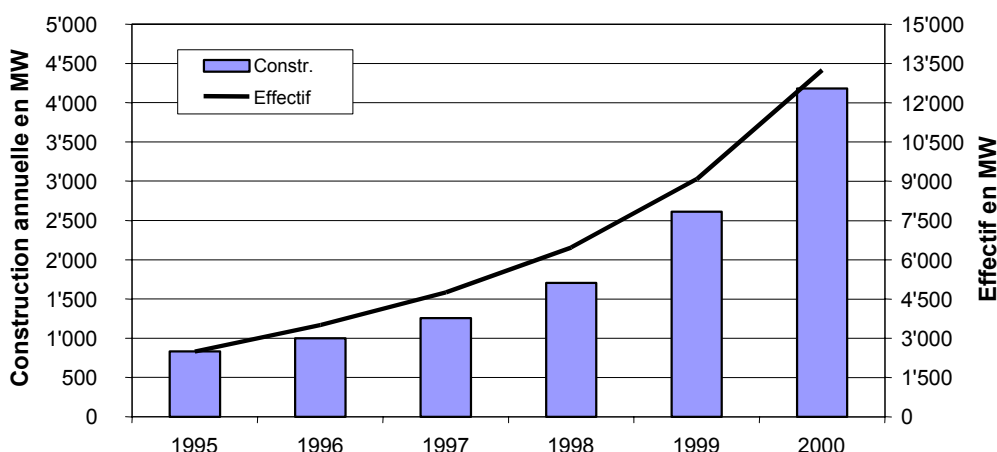
<sup>2</sup> La prise en compte d'autres possibilités d'acquisition de courant non-nucléaire obligerait à formuler des hypothèses et des calculs d'optimisation différents.

## 2. L'énergie éolienne en Europe

### 2.1 Situation actuelle

Dès le milieu des années 1990, l'énergie éolienne a connu un véritable essor, en Allemagne, au Danemark et en Espagne surtout. Ce phénomène s'explique par les mesures d'encouragement prises par l'Etat, et par la dégressivité des coûts dus aux installations éoliennes. Ces deux effets font que l'exploitation d'installations judicieusement implantées est aujourd'hui rentable – il s'agit même de la technique la plus avantageuse pour utiliser une nouvelle énergie renouvelable. Au niveau de l'UE, la capacité installée à fin 2001 était de 17 240 MW (croissance en 2001: 4470 MW).

Illustration 1: Puissance installée des installations éoliennes en Europe



Source: Bundesverband Windenergie e.V.

prognos 2002

Les recettes annuelles potentielles d'une installation éolienne dépendent de la qualité du site d'implantation et des conditions de vent. L'utilisation de l'énergie éolienne exige d'importantes surfaces. En outre, la disponibilité de l'énergie éolienne fluctue considérablement. Toutefois, une gestion et une extension adéquates du réseau, ainsi que les réserves de production conventionnelle disponibles ont permis de pallier toutes les difficultés rencontrées jusqu'ici.

## 2.2 Potentiel d'avenir

La puissance installée dans l'espace européen en 2000 devrait avoir triplé d'ici 2005, selon Prognos. Le nombre de projets réalisés augmentera tout particulièrement sous peu dans les pays pauvres en installations mais où les conditions climatiques sont propices, comme la France, la Grande-Bretagne ou les Pays-Bas.

La technique pour l'utilisation de l'énergie éolienne à terre est au point et ne pose plus de problèmes techniques majeurs. D'un point de vue technique, Prognos estime qu'il serait possible de multiplier par 30 au moins (par rapport à 2000) la performance totale de l'énergie éolienne à terre. Il deviendra toutefois toujours plus difficile de trouver de nouveaux sites dans les régions déjà riches en turbines éoliennes. En effet, leurs effets négatifs, comme le bruit, les reflets de lumière, ou des aspects de la protection du paysage peuvent entraver des projets.

Les développements les plus spectaculaires sont donc à prévoir pour les installations en mer, bien que les estimations divergent considérablement à ce sujet. En effet, ces installations bénéficient de la force accrue du vent au large et nuisent moins au paysage et à la population. Toutefois, les actuelles fermes éoliennes en mer ne sont que des versions légèrement adaptées sur le plan technique des fermes à terre. Infras prévoit donc que de nouveaux concepts réduiront fortement les coûts par rapport à aujourd'hui, tout en accroissant la fiabilité des installations.

Globalement, à terre et en mer, le potentiel technique de l'énergie éolienne permettrait de couvrir la totalité des besoins actuels de courant en Europe, et même davantage. Certaines incertitudes subsistent toutefois quant à l'utilisation de ce potentiel, comme le manque d'expérience des parcs éoliens en mer, ou les possibilités et les coûts encore peu clairs, s'agissant des capacités de réserve supplémentaires dont l'importance ira grandissant avec le recours accru à l'énergie éolienne. A ce propos, le besoin accru d'énergie de réglage par rapport aux centrales conventionnelles, en cas de forte augmentation de l'utilisation de l'énergie éolienne en Europe, revaloriserait la force hydraulique suisse. Il faudrait alors davantage axer l'exploitation des centrales à accumulation sur la couverture des charges de pointe, les centrales à turbines à gaz étant compétitives pour le moment.

Selon la directive UE relative à la promotion de l'électricité produite à partir de sources d'énergies renouvelables, la part de ce type de courant devrait passer à 22 % d'ici 2010 (14 % en 1997). On peut donc partir du principe que l'énergie éolienne formera dès ce moment une part appréciable de la production européenne de courant. Ainsi, l'ampleur des mesures publiques d'encouragement prises à l'échelon européen et la participation de la Suisse au marché intérieur européen de l'électricité, sur la base de la loi sur le marché de l'électricité (LME), comptent également beaucoup pour les importations suisses de courant éolien.

## 2.3 Prix de revient

Le prix de revient de l'énergie éolienne dépend fortement des conditions climatiques, de la qualité du site d'implantation, de la technique utilisée et du mode de financement des projets. Une étude menée actuellement pour le gouvernement britannique situe pour 2020 le prix de revient du courant éolien produit à terre entre 3,5 et 6 ct./kWh et celui du courant produit en mer entre 4,8 et 7,2 ct./kWh. Une autre étude arrive, pour les fermes éoliennes en mer et en se fondant sur des hypothèses conservatrices, à des coûts de l'ordre de 9,5 ct./kWh en 2020. Par ailleurs, Prognos estime, sur la base de sources diverses, que le prix de revient oscillera entre 6,5 et 10 ct./kWh, s'attendant à des coûts semblables pour les installations en mer et pour celles à terre. En effet, les installations en mer produisent davantage d'énergie mais présentent des coûts d'investissement et d'exploitation plus élevés. Enfin, selon Infrast, le prix de revient actuel du courant éolien, à terre aussi bien qu'en mer, est déjà compris entre 5 et 8 ct./kWh dans les sites favorables. D'où l'attente, pour 2020, de coûts de revient compris entre 6 et 7 ct./kWh. D'ici là, d'importantes améliorations techniques sont à attendre, faute de quoi il faudra impérativement équiper des sites moins favorables.

## 3. Importations d'énergie éolienne

Sur la base des données générales figurant au point 1, la quantité de courant éolien qu'il faudrait importer d'Europe se situerait dans une fourchette de 10 (2020) à 26 TWh (dès 2025). Prognos estime que les installations à terre (50 %) tournent à plein régime (kWh/kW) pendant 2000 heures, et les installations en mer (50 %) pendant 3500 heures. Selon ces hypothèses, les installations éoliennes devraient fournir en 2020 une puissance de 3900 MW (2030: 10 000 MW) pour couvrir les besoins d'importation de la Suisse. Soit 23 % (58 %) de la puissance actuellement installée en Europe, laquelle ne représente toutefois que quelques pour-cent du potentiel de production éolienne techniquement réalisable à long terme.

### 3.1 Garanties pour l'acquisition d'énergie éolienne

En principe, selon Infrast, deux options permettraient d'assurer les acquisitions de courant éolien:

**Contrats d'acquisition à long terme:** l'acheteur annonce telle ou telle puissance (capacité des centrales) et choisit les meilleures offres. En contrepartie, il obtient la garantie de conditions de livraison fixes pendant une longue période. Le modèle a l'avantage d'assurer les capacités et les conditions (notamment prix) sur le long terme. D'où l'attrait de cette option pour l'exploitant, qui court de faibles risques. De même, les marges peuvent être calculées au plus juste dans les offres. Le revers de la médaille, c'est que les forces du marché ne jouent qu'au moment de l'appel d'offres, et qu'ensuite les progrès techniques et, le cas échéant, les baisses de prix n'ont plus aucune incidence. Comme dans d'autres pays, l'Etat devrait impérativement obliger les fournisseurs à conclure des contrats d'acquisition dans ce sens.

**Certificats pour le courant éolien:** le courant provient d'installations certifiées qui remplissent les critères fixés et sont intégrées dans un système de comptes. Chaque unité d'énergie injectée dans le réseau à partir d'une centrale éolienne est comptabilisée et donne droit au producteur au nombre correspondant de certificats, qu'il peut mettre en vente. Le jeu de l'offre et de la demande détermine le prix, impossible à prévoir de manière

précise. L'industrie électrique suisse serait contrainte en vertu d'une disposition légale à acquérir, outre le courant «normal», les certificats «verts» nécessaires.

### 3.2 Coûts des importations d'énergie éolienne

Les coûts des importations d'énergie éolienne comprennent à la fois le prix de revient, les coûts de transport et de maintien de la réserve.

Comme indiqué au point 2.3, le prix de revient en 2020 pourrait se situer entre 6 et 10 ct./kWh.

Les coûts de transport dépendent des investissements à réaliser dans le réseau. Il importe de considérer que de nouvelles capacités de production nécessitent généralement de renforcer le réseau de la région de production directement concernée, quel que soit le pays producteur apparaissant dans le contrat. Les coûts correspondants sont à la charge soit des producteurs injectant ledit courant, soit des exploitants de réseaux de la région. Des discussions en cours dans l'UE visent à déterminer dans quelle mesure, dans le cadre de l'ouverture des marchés, l'introduction de rétributions pour l'injection s'impose pour le transit et les exportations, et jusqu'à quel point les parcs éoliens seraient eux aussi concernés. Car une hausse de la demande de courant et des changements d'implantation des centrales de grande puissance impliquent toujours de remédier aux congestions du réseau de transport à haute tension qui en découlent. Les importations suisses de courant éolien étudiées ici ne nécessitent toutefois pas de nouvelles lignes à haute tension sur de longues distances. Il faut dire que les pertes lors de l'acheminement en Europe sont minimes, comparées à celles au niveau des réseaux de distribution et de la production de courant<sup>3</sup>. Etant donné les incertitudes actuelles, les estimations d'Infras ou de Prognos divergent fortement. Infras évalue les coûts de l'acheminement, du renforcement du réseau et d'éventuelles limitations des injections à 1,2 - 1,4 ct./kWh (20 % du prix de revient), tandis que Prognos les estime à 2,0 ct./kWh.

Etant donné l'absence de courant éolien par vent faible ou tempétueux, il faudrait mettre à disposition des capacités de réserve supplémentaires par rapport à un parc de centrales conventionnel, afin de garantir un approvisionnement sûr en courant. Une répartition optimisée sur le plan européen des installations éoliennes atténuerait certes le problème, mais suppose une collaboration internationale. Les affirmations portant sur la capacité de réserve nécessaire sont incertaines et dépendent des hypothèses retenues. En Suisse cette puissance de réserve serait fournie en partie par des centrales à accumulation et en partie par l'aménagement ad hoc des contrats d'importation de courant éolien. Prognos estime à 0,3 MW le besoin de capacités de réserve pour la Suisse, à supposer que la capacité requise pour ses importations de courant éolien s'élève à un MW. L'AES signale par ailleurs que d'après les chiffres du VDEW (fédération allemande de l'industrie électrique),

---

<sup>3</sup> Les flux de courant et les congestions du réseau varient selon le site retenu pour créer de nouvelles grandes installations de production, comme des parcs éoliens, et selon que de grandes installations existantes, comme des centrales nucléaires, sont mises hors service sans être remplacées. S'agissant des renforcements du réseau, des calculs de simulation, basés sur certaines hypothèses de scénarios, sont indispensables pour déterminer où et dans quelle ampleur ils seraient nécessaires. Le renforcement visé présente divers avantages par rapport à de nouvelles lignes de transport point à point: rentabilité, fiabilité, stabilité des réseaux et sécurité de l'approvisionnement.

chaque MW de puissance éolienne nécessite une puissance de réserve de 0,9 MW. Prognos estime les coûts correspondants à 0,3 ct./kWh, Infras à 0,5 ct./kWh.

Globalement, on peut s'attendre pour les importations d'énergie éolienne à des coûts totaux de 8 à 9 ct./kWh (Infras) ou de 9 à 12 ct./kWh (Prognos). Prognos fonde son estimation assez élevée sur le fait qu'en Allemagne, le prix actuellement payé est 10,5 ct. par kWh, soit au moins 12 centimes avec les coûts de transport. En Suisse, compte tenu du jeu des forces de marché pour les énergies renouvelables, Prognos ne juge guère possible à l'heure actuelle d'acquérir l'énergie éolienne à meilleur prix que les clients établis dans les régions productrices.

Prognos a établi les coûts nets cumulés de 2000 à 2030 pour le remplacement des centrales nucléaires existantes par des importations de courant éolien sur la base d'une variante bon marché (coût: 8,5 ct./kWh) et d'une variante plus coûteuse (coût: 12 ct./kWh). Les calculs effectués intègrent les économies dues à l'arrêt de l'exploitation des centrales nucléaires et à la suppression des droits de prélèvement en France, d'une part, et les coûts supplémentaires dus à la baisse des recettes d'exportation et aux importations de courant éolien, d'autre part. Les coûts supplémentaires cumulés de 2004 à 2030 dus à la stratégie d'importation du courant éolien se monteraient, dans la variante bon marché, à 11,5 milliards de francs par rapport au scénario de référence prévu dans le message (durée d'exploitation des centrales nucléaires: 50 à 60 ans). Dans l'autre variante, les coûts supplémentaires seraient de 18,6 milliards de francs, toujours selon Prognos. Par ailleurs, les importations de courant éolien généreraient, dans l'hypothèse avantageuse, des surcoûts moindres que la stratégie présentée dans le message concernant les initiatives atomiques, à savoir des installations indigènes à couplage chaleur-force pour satisfaire aux exigences de la loi sur le CO<sub>2</sub> (moratoire et durée d'exploitation des centrales nucléaires limitée à 40 ans). Ces calculs ne tiennent toutefois pas compte des coûts et des avantages externes, difficiles à mesurer et teintés de subjectivité.

#### **4. Compétitivité de l'industrie éolienne suisse et conséquences pour l'emploi**

Le marché actuel des installations éoliennes se développe principalement à l'étranger. Toutefois, l'industrie éolienne européenne fait aussi appel à des fournisseurs suisses. Leur contribution concerne principalement l'électronique de puissance, les générateurs, la transmission et la distribution, les pales de rotors, la réassurance et le financement, ainsi que la planification, la gestion de projets et l'intégration des systèmes. S'agissant de l'électronique de puissance, la Suisse est même le n° 1 du marché.

L'étroitesse du marché intérieur est un handicap majeur à l'essor d'une industrie éolienne en Suisse<sup>4</sup>. En raison de cette faiblesse, il faudrait adopter des mesures pour qu'une partie au moins de cette valeur ajoutée soit créée en Suisse. Infras signale trois grandes pistes:

- Si l'électricité est acquise sur la base de contrats à long terme, l'appel d'offres pourrait prévoir que le projet comporte une part de courant d'origine suisse.

---

<sup>4</sup> Compte tenu de la protection du paysage, le potentiel éolien (1996) était estimé à 3,5 % de la demande indigène de courant. Le prix de revient actuel oscille entre 20 et 25 ct./kWh (Mont-Crosin).

page 7

- Si l'électricité est acquise sur la base de certificats, des certificats spéciaux pourraient garantir que les installations de production intègrent une part de courant d'origine suisse.
- Il serait possible de convenir de manière ciblée des affaires compensatoires, sous forme d'accords bilatéraux avec des pays à forte production éolienne.

Il faudrait encore examiner en détail dans quelle mesure ces trois solutions sont compatibles avec les accords OMC / GATT.

Les conséquences pour l'emploi dans l'industrie éolienne suisse dépendraient de la part effective de la valeur ajoutée réalisée en Suisse. A supposer que, pour l'installation d'env. 9000 MW de puissance éolienne entre 2015 et 2030:

- le chiffre d'affaires généré atteigne CHF 15 milliards,
- 20 à 40 % de la valeur ajoutée soit réalisée en Suisse,
- 30 % des intrants nécessaires soient importés,
- l'effet multiplicateur soit de 1,3
- et la valeur ajoutée spécifique par poste de travail s'élève à CHF 150 000,

quelque 1300 à 2300 postes de travail directement liés à l'industrie éolienne seraient pendant ces quinze années, selon les calculs d'Infras.

## 5. Bilan

Le remplacement des centrales nucléaires existantes, après 40 ans d'exploitation, par des importations d'énergies renouvelables semble techniquement possible et entraînerait des surcoûts acceptables pour l'économie. Des mesures étatiques s'imposeraient toutefois pour imposer une telle stratégie – par exemple, un négoce de certificats harmonisé sur le plan international, avec des quotas obligatoires de fourniture. En outre, et comme pour d'autres technologies de l'avenir, de grandes incertitudes règnent encore, s'agissant en particulier de l'évolution des prix du marché pour le courant produit à partir d'énergies renouvelables ou de la disposition à coopérer des Etats européens. A ce propos, l'énergie éolienne fait partie intégrante de la stratégie élaborée dans les pays de l'UE pour réaliser les objectifs de Kyoto – la hausse de la demande permettra à des prix avantageux pour l'instant de se rapprocher du prix moyen sur le marché de l'électricité. Enfin, l'évolution technique et les autres possibilités d'abaisser les coûts tant de l'énergie éolienne que des techniques qui la complètent et lui font concurrence constituent une source supplémentaire d'incertitude.

Il s'agira de suivre de près l'évolution du secteur éolien, afin de ne pas se laisser dépasser par une technique prometteuse. En outre, la transformation en électricité de la biomasse indigène et d'autres agents énergétiques renouvelables, ainsi que le recours aux piles à combustible continueront d'être encouragés dans le cadre de SuisseEnergie. Ajoutons que la LME crée les conditions-cadres propices à la réciprocité dans le négoce international du courant et au marquage distinctif de la provenance et du type de production de l'électricité, deux

éléments qui faciliteraient le recours à ces techniques. En cas d'acceptation de l'une des initiatives atomiques, les importations de courant éolien seraient l'une des alternatives prometteuses à l'énergie nucléaire, au même titre que l'utilisation rationnelle du courant et les autres énergies renouvelables. Mais des mesures supplémentaires seraient nécessaires pour éviter que le remplacement des centrales existantes n'oblige à mettre en service des centrales fossiles thermiques.

**Etudes menées sur mandat de l'OFEN:**

- INFRAS: CO<sub>2</sub>-neutraler Ersatz der Atomenergie – Inputs zu forcierter Windenergienutzung, 3.4.02 (all. seulement)
- Prognos AG: Ersatz der Kernenergie durch importierten Windstrom? 5.4.02 (all. seulement)