

Perspectives d'électricité sans CO₂ pour la Suisse

Nouvelles technologies nucléaires

Malgré tous les appels à l'économie, les besoins en électricité de la Suisse ont continuellement augmenté depuis 1990. En 2020, on devra combler un manque dans l'approvisionnement en électricité. Les nouvelles technologies nucléaires se trouvent elles aussi au centre des réflexions visant à couvrir ces besoins de façon économique et exempte de CO₂.

Dans le cadre des perspectives énergétiques 2035/50 le PSI a sondé pour l'Office Fédéral de l'Énergie (OFEN) le potentiel et les coûts des technologies nucléaires futures¹.

Dans 15 à 20 ans au plus tard, les centrales de Beznau et Mühleberg arrêteront de produire. De grands contrats d'importation de courant expirent à partir de 2020. Les décisions concernant les solutions de remplacement – nucléaires ou pas – devront donc être prises bientôt. Elles devraient éviter des émissions de CO₂ supplémentaires ainsi que des coûts d'électricité menaçant la compétitivité de la place économique Suisse.

Les centrales nucléaires produisent aujourd'hui environ 40% du courant suisse. Avec l'hydroélectricité renouvelable elles garantissent un approvisionnement en électricité pratiquement exempt de polluants, bon marché et fiable. Une technologie nucléaire développée sur des principes de durabilité pourrait remplir cette tâche aussi dans l'avenir.

Le potentiel technique et économique du nucléaire sur des sites existants s'adapte à plusieurs niveaux – un maintien de la puissance actuelle ou une augmentation par des installations plus grandes et plus efficaces. Les coûts se situeraient au niveau des coûts actuels. Les réacteurs de demain pourraient aussi accroître l'acceptation du public: leur standard de sûreté devrait être particulièrement élevé et ils pourraient préserver les ressources sur le long terme et réduire fortement la quantité et le temps de confinement nécessaire des déchets. Les avantages du nucléaire seraient ainsi plus évidents qu'aujourd'hui.

Contenu

- 2 Le nucléaire aujourd'hui:
Une technologie en évolution
- 3 Potentiels et coûts:
Des solutions flexibles selon les besoins
- 4 Entrevue avec le directeur du PSI: **«Nous avons besoin du nucléaire aussi»**

¹ Neue Erneuerbare Energien und Neue Nuklearanlagen: Potenziale und Kosten
 Contribution aux Perspectives Énergétiques 2035/2050 de l'Office Fédéral de l'Énergie
www.energie-schweiz.ch/; <http://gabe.web.psi.ch/projects/bfe/index.html>

Une technologie en évolution

Comme toute technologie, le nucléaire n'a pas cessé de se développer depuis ses débuts. On a tiré les leçons des erreurs et on a profité de nouvelles conquêtes surtout dans le domaine des matériaux et de l'informatique. Les réacteurs de la dernière génération sont plus sûrs que leurs prédécesseurs et les systèmes nucléaires du futur s'attaquent de façon innovante à la préservation des ressources et la minimisation des déchets.

Des réacteurs prototypes pour la production civile d'électricité, la 1ère génération, apparurent dans les années 50 et 60. Il en résulta un nombre de lignes technologiques commerciales de la 2ème génération, dont seules quelques unes s'imposèrent: Les réacteurs à eau légère (LWR) dominent aujourd'hui avec 80% des centrales. L'expérience opérationnelle de plus de 10000 années-réacteurs a permis d'élever le niveau de sûreté de la Génération II à un haut standard. Les réacteurs âgés et les systèmes avec des défauts de sûreté furent amplement modernisés ou arrêtés.

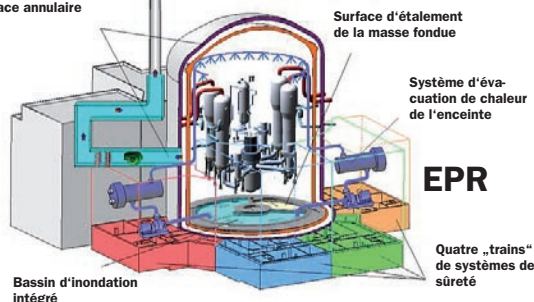
nouvelle qualité. De tels concepts excluent pratiquement qu'un accident aussi improbable que la fusion du cœur du réacteur aie des répercussions hors de l'enceinte de la centrale: des mesures d'urgence aux alentours ne seraient plus nécessaires. Ces concepts forment la 3ème génération de réacteurs; certains sont déjà en service (en Asie orientale), d'autres en construction (par exemple en Europe).

Objectifs de développement: préserver les ressources et minimiser les déchets

Les systèmes de sûreté passifs sont des dispositifs qui interviennent sans action humaine et sans apport d'énergie lors d'une déviation des valeurs d'opération normales. Ils sont déclenchés et opèrent à partir de grandeurs physiques comme la différence de température, la hauteur hydrostatique etc. La performance de tels systèmes dans des réacteurs de Génération III est testée par exemple dans l'installation PANDA du PSI.

Sûreté intrinsèque veut dire que certaines situations dangereuses comme p. ex. un échauffement excessif du réacteur sont exclues en toute circonstance, car en cas de dérangement le réacteur est ramené automatiquement en situation sûre sur la base des seules lois de la physique.

Enceinte de confinement double avec aspiration de l'espace annulaire



Graphique 1: Les nouveautés principales de l'EPR (1600 MWe) comportent une double enceinte de confinement avec un système spécial d'évacuation de chaleur et une surface d'étalement qui, en cas de fusion du cœur, retient la masse fondue et empêche un endommagement des fondations. Tous les systèmes de sûreté sont construits en redondance quadruple.

Au cours des années 90 et sur la base de l'expérience acquise des systèmes de sûreté furent développés de façon ciblée et intégrés dans de nouveaux concepts de réacteurs dont la sûreté a atteint une

Le représentant le plus connu de cette génération est le Réacteur à Eau Pressurisée Européen (EPR), actuellement en construction en Finlande (graphique 1). L'EPR est une évolution de réacteurs français et allemands standardisés et éprouvés. D'autres concepts de Génération III misent sur des systèmes de sûreté passifs ou utilisent des propriétés physiques intrinsèques du système qui rendent impossible un échauffement excessif et une fusion du cœur.

Et le développement ne s'arrête pas là. Les concepts qui pourraient entrer en service d'ici 20 à 40 ans, la 4ème génération, émergent déjà dans le cadre de coopérations internationales. Comparés à la Génération III, ils ont un niveau de sûreté encore plus élevé. Certains d'entre eux sont censés épuiser le contenu énergétique de l'uranium (les LWR actuels n'en utilisent que 1 à 1,5%), mini-

miser le volume des déchets et réduire à quelques centaines d'années le temps de stockage nécessaire pour que la radioactivité des déchets décroisse à un niveau naturel. Pour cela on a besoin de neutrons «rapides». De tels concepts ont été esquissés déjà dans les années 50, mais se sont heurtés aux limites des possibilités techniques et économiques de l'époque (p.ex. le surgénérateur rapide français Superphénix). À la lumière du niveau actuel de la technologie des matériaux, des procédés et de l'informatique leur réalisation paraît possible.

Le tableau 1 résume les caractéristiques principales des concepts de Génération IV actuellement sous étude. Avant qu'ils n'entrent en service, il s'agit de surmonter un nombre de défis technologiques au moyen d'une R&D ciblée.

Tableau 1: Systèmes de Génération IV en comparaison.

Système	Température [°C]	Cycle du combustible	Taille [MWe]	Produit	Défis technologiques
Réacteur rapide refroidi au gaz (GFR)	850	fermé, sur place	288	électricité, hydrogène	Combustibles pour le spectre de neutrons rapides; dimensionnement du cœur, sûreté, technologie du cycle de combustible; turbine de haute performance à l'hélium
Réacteur rapide refroidi au métal liquide (LFR)	550-800	fermé, régional	50-150, 300-400, 1200	électricité, hydrogène	Combustibles et matériaux; dimensionnement du système, partie non nucléaire de la centrale; fabrication télécommandée des combustibles métalliques
Réacteur à sel fondu (MSR)	700-800	fermé, sur place	1000	électricité, hydrogène	Comportement à long terme et retraitement du combustible; compatibilité des matériaux; préparation, séparation et retraitement des sels
Réacteur rapide refroidi au sodium (SFR)	550	fermé	300-1500	électricité	Preuve de maîtrise des événements extrêmes; réduction des coûts de capital; fabrication télécommandée des combustibles oxydes
Réacteur refroidi à l'eau supercritique (SCWR)	510-550	ouvert/fermé	1500	électricité	Matériaux et structures: corrosion, radiolyse, résistance; sûreté, y compris stabilité de puissance et de l'écoulement du caloporteur
Réacteur à gaz de très haute température (VHTR)	≥ 1000	ouvert	250	hydrogène, chaleur industrielle, électricité	Combustibles et matériaux nouveaux pour hautes températures; production d'hydrogène avec le procédé S-I; turbine de haute performance à l'hélium

Des solutions flexibles selon les besoins

Le nucléaire en Suisse pourrait suivre plusieurs chemins – abandon, maintien du statu quo ou expansion. Un abandon a été rejeté lors des votations du mai 2003; une expansion sur des sites nouveaux semble aujourd'hui politiquement impossible. L'étude fut donc concentrée sur le juste milieu: remplacement des centrales sur les sites existants. Même ce chemin dépend largement de l'acceptation de la technologie nucléaire.

Avec une durée de vie technique et économique de 50 (Beznau et Mühleberg) et 60 ans (Gösgen et Leibstadt) respectivement, les centrales nucléaires suisses arrêteront la production vers 2020 ou 2040 / 2045. Les concepts de Génération IV ne seront probablement pas encore mûrs pour le marché ni éprouvés pendant longtemps ailleurs. Pour un remplacement éventuel l'étude n'a donc considéré que des réacteurs de Génération III. Pour remplacer Leibstadt en 2045 on a de plus examiné l'introduction possible des systèmes de Génération IV.

Questions de fond: acceptation et longue durée de planification

Les systèmes de Génération III ont des puissances entre 1000 et 1600 MWe. On a donc la flexibilité de décider si l'on veut maintenir la puissance totale des centrales nucléaires suisses constante ou si l'on veut exploiter au maximum la capacité des sites (définie par la capacité de refroidissement des rivières). Ainsi trois scénarios de remplacement ont été examinés (graphiques 2, 3, 4).

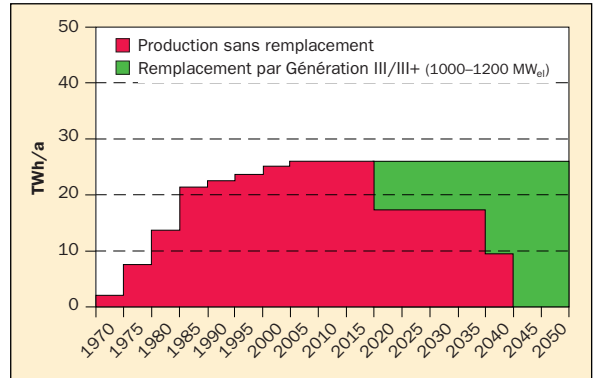
L'électricité nucléaire produite en 2050 varie selon le scénario entre 26 et 44 TWh. Si l'on maintient la production nucléaire constante à 26 TWh, même une augmentation modérée de la demande (1,5% par an jusqu'à 2010, ensuite 0,75% par an) va créer un manque à partir de 2020. Pour couvrir ce manque on devrait ajouter 5 TWh (ce qui correspond à une nouvelle centrale de 600 à 700 MWe) tous les 10 ans.

Selon l'évolution de la demande (croissance entre 0 et 2% par an), une

Graphique 2:

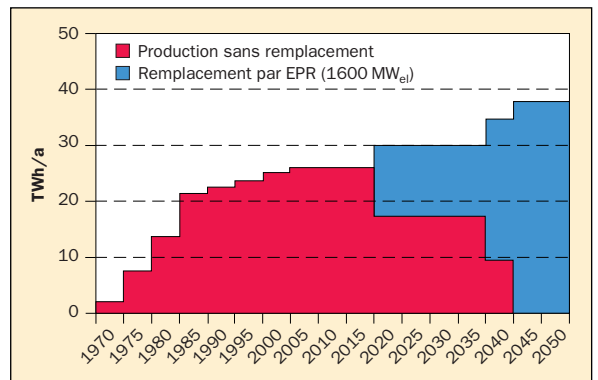
Scénario 0: ■ Les centrales existantes arrêtent la production après 50 ou 60 années de durée de vie respectivement et ne sont pas remplacées.

Scénario 1: ■+■ Les centrales de Mühleberg et Beznau sont remplacées par une seule unité d'env. 1000 MWe; en 2040 et 2045 respectivement on construit à Gösgen et Leibstadt deux centrales de 1000 MWe et de 1200 MWe respectivement.



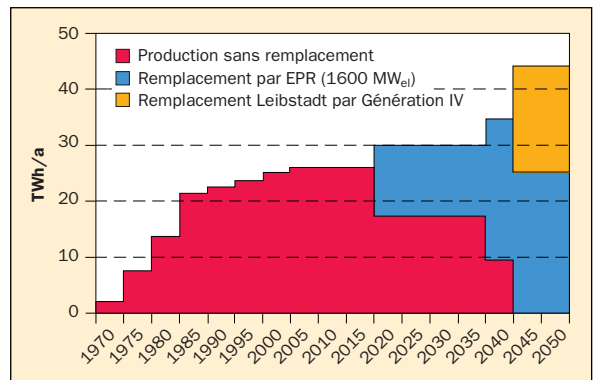
Graphique 3:

Scénario 2A: ■+■ Les centrales de Mühleberg et Beznau sont remplacées par un seul EPR de 1600 MWe; en 2040 et 2045 respectivement on remplace Gösgen et Leibstadt par deux EPR 1600.



Graphique 4:

Scénario 2B: ■+■+■ Les centrales de Mühleberg et Beznau sont remplacées par un seul EPR de 1600 MWe; en 2040 on remplace Gösgen par un EPR 1600 et en 2045 Leibstadt par des réacteurs modulaires de Génération IV avec une puissance totale pouvant atteindre 2000 MWe.



puissance nucléaire installée de 3200 à 5200 MWe pourrait couvrir entre 30 et 68% de la demande domestique en 2050.

Aspects financiers

La longue procédure de permis ancrée dans la loi fait qu'une centrale nucléaire doit être planifiée longtemps à l'avance. Elle ne produit du bénéfice que 10 à 15 ans après la décision de construire. Ceci exige du courage de la part des investisseurs. Les coûts de production sont par contre assez bas. Aujourd'hui entre 4 et 5,5 Rp/kWh (coûts de déclassement et de gestion des déchets inclus), ils doivent rester à peu près au même niveau

pour l'EPR. Pour les systèmes de Génération IV l'objectif ambitieux à atteindre est 2,5 à 3,5 Rp/kWh.

Acceptation

Ce qui influencera le plus le potentiel du nucléaire, c'est l'acceptation par le public de cette technologie hautement exigeante et pour beaucoup pas très rassurante. Si l'on veut qu'elle s'impose dans l'avenir, elle doit rester exempte d'accidents (comme ce fut le cas ces 20 dernières années) et donner des réponses convaincantes aux questions des déchets et de la prolifération – un vrai défi socio-technique.

«Nous avons besoin du nucléaire aussi»

Quelle est votre vision du futur mélange d'électricité suisse à moyen et long terme?

La consommation d'électricité va encore augmenter. Le mélange d'électricité suisse doit continuer à être produit quasiment sans CO₂. Ceci implique de favoriser l'hydroélectricité, l'énergie nucléaire et le développement de nouvelles formes d'énergie renouvelable à des prix compétitifs. Produire de l'électricité au moyen des centrales à gaz n'est pas une bonne solution pour la Suisse à long terme.

Quel serait le rôle spécifique du nucléaire dans ce mélange d'électricité?

Dans l'optique actuelle l'énergie nucléaire restera importante, car elle garantit une production d'électricité sans CO₂. Comme le combustible a une densité énergétique élevée et peut donc être stocké, elle contribue aussi à la sécurité d'approvisionnement. Les nouvelles formes d'énergie, comme p. ex. la biomasse doivent surtout être utilisées pour se substituer au pétrole et au gaz naturel d'importation.

Seules nos propres contributions nous ouvrent la porte au savoir mondial

Qu'implique ceci pour la recherche en Suisse? Pour l'industrie électrique?

Une bonne formation des ingénieurs nucléaires est une condition préalable importante pour l'opération sûre des centrales nucléaires. Et une recherche captivante peut attirer le nombre nécessaire d'étudiants et d'étudiantes. Mais un petit pays comme le nôtre doit travailler en réseau avec des partenaires étrangers, comme p. ex. la France ou le Japon.

Une tâche très importante de l'industrie électrique consiste à améliorer l'acceptation publique du nucléaire et plus spécifiquement de la gestion de ses déchets par un travail de persuasion. Sinon, le risque financier d'échouer suite à un référendum est très grand.

Comment garanzissez-vous que les développements en recherche et en formation sont compatibles avec les objectifs?

Le domaine des EPF avec l'ETHZ, l'EPFL, et le PSI va offrir prochainement un Master in Nuclear Engineering qui est organisé selon les prescriptions européennes. PSI offre ses installations de

recherche pour des maîtrises de diplôme et des thèses de doctorat. L'excellente coopération et le dialogue avec les centrales nucléaires garantissent en plus que la recherche du PSI reste pertinente et proche du marché.

Le PSI se concentre sur la sûreté des centrales existantes et la gestion des déchets – est-ce suffisant?

Les centrales nucléaires peuvent rester en service aussi longtemps que leur sûreté est garantie. Il est donc important,

Recherche et formation compatible avec l'Europe: Le "Master in Nuclear Engineering" de l'ETH

par exemple, d'en savoir suffisamment sur la fatigue des matériaux. Mais nous devons aussi être en mesure d'évaluer la technologie des centrales futures. C'est pour cela que le PSI s'engage avec une équipe internationale sur des aspects spécifiques de la quatrième génération de centrales nucléaires. Seuls ceux qui y contribuent concrètement auront accès à ce savoir généré mondialement.

Quel est le rôle du nouveau Centre de Compétence pour l'Énergie et la Mobilité (CEEM-CH) en vue des perspectives de l'électricité suisse?

Seul un ample savoir de toutes les technologies et de leurs conditions économiques permet d'établir des perspectives fiables. Cette compétence intégrale sera



Ralph A. Eichler

a obtenu son doctorat à l'ETH de Zurich après des études en physique. Après des séjours de recherche aux USA et en Allemagne, il a été élu en 1989 comme Professeur extraordinaire et en 1993 comme Professeur ordinaire de physique expérimentale à l'ETHZ. Depuis 2002 Ralph Eichler est Directeur du Paul Scherrer Institut.

disponible au CCEM-CH au moyen de sa propre recherche de haut niveau sur différentes technologies de transformation d'énergie. Le projet GaBe du PSI et CEPE à l'ETHZ utilisent les connaissances techniques ainsi obtenues et formulent des scénarios possibles en y incluant des aspects économiques et sociaux.

L'énergie nucléaire restera importante dans l'optique actuelle

La consommation d'électricité ne représente qu'environ un quart de la consommation en énergie. C'est pour cette raison que les aspects de la mobilité, du chauffage des bâtiments et de l'augmentation des rendements sont des domaines de recherche également importants, lorsqu'il s'agit de réduire la combustion des agents énergétiques fossiles.

Impressum

Le point sur l'énergie est une publication du PSI sur l'évaluation globale des systèmes énergétiques (projet GaBE). Il paraît trois fois par an. Ont contribué à cette édition: Konstantin Foskopos et Peter Hardegger.

ISSN-Nr.: 1661-5131

Tirage: 15 000 ex. en allemand, 5000 ex. en français, 500 ex. en anglais. Anciens numéros disponibles en Pdf (D, F, E): <http://gabe.web.psi.ch/>

Responsable du contenu:

Paul Scherrer Institut
Dr. Stefan Hirschberg
5232 Villigen PSI
Tel. 056 310 29 56, Fax 056 310 44 11
stefan.hirschberg@psi.ch
www.psi.ch/GaBE

Rédaction: Ruth Schmid

Distribution et souscriptions:
renate.zimmermann@psi.ch

Traduction française: Konstantin Foskopos

Analyses des systèmes énergétiques au PSI:

L'objectif des analyses des systèmes énergétiques au Paul Scherrer Institut à Villigen est l'appréciation globale et détaillée des systèmes énergétiques d'aujourd'hui et de demain. On considère en particulier des critères de santé publique, d'écologie et d'économie. Sur la base des Analyses de Cycle de Vie (LCA), des modèles d'économie énergétique, des analyses des risques, des modèles de dispersion des substances nocives et, enfin, d'une analyse multi-critères il est possible de comparer différents scénarios énergétiques, afin d'offrir une base pour des décisions politiques.

Collaborations avec:

ETH Zürich; EPF Lausanne; EMPA; Massachusetts Institute of Technology, (MIT); University of Tokyo; Union Européenne, (EU); Agence Internationale pour l'Énergie, (IEA); Organisation pour la Coopération et le Développement Economique, (OCDE); Organisation des Nations-Unies, (ONU)