

22 mars 2012 / MR

Énergies intermittentes: une alternative pour sortir du nucléaire et réduire les émissions de CO₂ ?

Une quadrature d'un cercle inutile!

« Je ne sais pas l'art d'être clair pour qui ne veut pas être attentif. »

Jean-Jacques Rousseau
Du contrat social

Apparemment il faut réduire les émissions de CO₂. Cet impératif semble être devenu une vérité supérieure immuable, un dogme.

En parallèle, suite aux frayeurs ressenties après Tchernobyl et Fukushima, certains pays tels que l'Allemagne et la Suisse s'engagent maintenant vers la sortie du nucléaire. C'est aussi devenu un impératif quasiment moral.

Pourtant je m'attèle ici à l'incommensurable tâche de remettre ces questions sur la table, quelle hérésie !

C'est dans un tel contexte que les énergies alternatives sont l'objet de beaucoup d'attention, de subventions, et d'espoir pour la salvation de la planète. Étant bonnes par définition on pourrait croire qu'elles n'entraînent que des externalités positives. Cela restera à voir.

Ces énergies alternatives utiliseront deux sources connues et, à vues humaines, infinies : la géothermie et l'irradiation solaire.

Géothermie.

Un flux de chaleur constant vient du noyau de la terre ; il n'est pas bien réparti, il y a des zones d'isolation et d'autres d'hyperactivité, voire d'éruptions. Là où le flux est suffisant il peut être rentable d'investir pour récolter cette chaleur et la transformer en électricité ; ces emplacements ne sont cependant pas très nombreux et ils sont souvent éloignés des zones de consommation. On peut cependant approcher des productions goulues en énergie, l'aluminium par exemple, vers des zones géothermiques actives, telle que l'Islande.

À un niveau local il est aussi possible d'assurer le chauffage des immeubles à bon compte ; il faut alors bien noter que des pompes à chaleur sont souvent utilisées à cet effet impliquant une consommation électrique non négligeable. Aussi, des projets intéressants ont été initiés pour extraire la chaleur accumulée dans la roche par l'injection d'eau sous pression (Deep Heat Mining). Malheureusement cette mise sous pression a entraîné des effets sismiques secondaires indésirables, ce qui a provoqué l'arrêt de tels projets (Bâle 2007).

On s'accordera que le potentiel de la géothermie est limité et ne pourra couvrir qu'une portion mineure des besoins énergétiques d'un pays comme la Suisse.

Solaire

Le soleil nous baigne de ses rayons, distille de l'eau et joue avec l'atmosphère pour nous dispenser vents et tempêtes.

L'agriculture est la première forme d'emploi direct de l'énergie solaire, mais l'utilisation de l'irradiation solaire par les plantes est loin d'être efficace :

	Production par hectare [kg/ha/an]	Capacité calorifique [kWh/kg]	Énergie brute produite [kWh//ha/an]	Ratio	Rendement à l'utilisation mécanique	Énergie nette utile [kWh//ha/an]	Ratio
Biodiesel (colza)	1 100	10.3	11 330	1.0%	30%	3 400	0.3%
Biomasse (bois de chauffe)	20 000	6.0	120 000	10.9%	30%	36 000	3.6%
Bioéthanol (canne à sucre)	5 000	7.5	37 500	3.4%	30%	11 250	1.1%
Photovoltaïque Suisse	8 000 m2 de panneaux, puissance 1,1 MW		1 100 000	100%	90%	1 012 500	100%
Photovoltaïque Sahara			2 420 000	220%		2 227 500	220%

La photosynthèse est d'une extrême efficacité pour produire des tissus végétaux complexes, structure de vie pour les plantes et aliments équilibrés pour les animaux, mais les rendements énergétiques sont très faibles. Il semble donc qu'il vaut mieux se contenter d'utiliser la biomasse excédentaire pour le chauffage direct plutôt que de dédier des cultures à la seule production de carburants ou d'électricité.

Pour la production de bio-carburants, diesel ou alcool, des surfaces cultivables sont maintenant mobilisées qui pourraient être utilisées pour la production alimentaire. La malnutrition, avec toutes ses conséquences sur le développement intellectuel et social de l'individu, pourrait-elle être péjorée par l'extension de la production de tels carburants ? Existe-t-il une arithmétique pour quantifier cela ? Autre thème, autre débat.

Miser sur les biocarburants, même hypothétiquement issus de la fermentation cellulosique, est une fausse bonne idée, tellement biaisé par les régimes de subvention que le bon sens a été oublié.

L'exploitation du soleil comme source directe d'énergie photovoltaïque ou indirecte par le vent faisant tourner les éoliennes semble être la voie à suivre, d'autant plus que, par le phénomène d'économie d'échelle et par la délocalisation de la production des panneaux solaire dans des pays à main d'œuvre bon marché, les coûts d'investissement ont baissé au cours des dernières années.

Mais ces formes de production sont-elles dénuées d'externalités négatives ? On sait que leur production d'électricité sera intermittente, parce qu'il y a la nuit, les nuages et les saisons dans un cas, parce que les vents sont changeants dans l'autre cas. Construire isolément une installation ne pose pas de problème tant que cela reste anecdotique et tant que le réseau avec son extension et son inertie peut s'en accommoder. Mais si la pratique se généralise, et tenant compte du fait que le facteur de capacité du photovoltaïque n'est en Suisse que d'environ 12% et celle de l'éolien de 20%¹, il faudra installer des capacités de production supplémentaires ou des systèmes de stockage intermédiaire pour pallier aux manques d'énergie pendant la nuit ou en période de calme. Une surcapacité de production et d'interconnexion sera donc nécessaire pour bien pouvoir exploiter ces énergies intermittentes.

Alors qu'un réseau est aujourd'hui capable d'absorber certaines variations à court terme qui sont actuelle-

1 Une installation ayant une puissance nominale de de 1kW devrait produire au cours d'une année 8766 kWh si elle était en service sans arrêt. En Suisse environ 8 m2 de panneaux photoélectriques donnent une puissance installée de 1 kW ; à la fin de l'année ils auront produit 11-12% de 8766 soit 1000 kWh. Une éolienne de 82 m de diamètre a une puissance nominale de 2.5 MW. Selon Alpiq SA la production du parc de Peuchapatte dans le Jura a un facteur de charge de 20%. Ce facteur peut s'élever à 40% pour des installations en mer, là où les vents sont plus forts et plus réguliers.

ment de l'ordre de $\pm 15\%$ ², le passage en masse à des sources intermittentes requerra une importante adaptation pour faire face à des variations journalières de 100% du photovoltaïque. Pour l'éolien il s'agira d'être capable de compenser l'absence de production pendant plusieurs jours (p. ex durant 54 jours au Danemark en 2002) et des variations de 100% au cours d'une même journée. Or aucune étude et aucune solution ne sont à disposition qui montrent comment intégrer et gérer une part de plus de 25-30% d'énergies intermittentes dans un réseau³.

Les surcapacités demandées devront être réactives à court terme, on ne peut donc penser qu'à l'hydroélectrique avec lac de retenue ou aux centrales à gaz naturel. Pour chaque MW installé en production intermittentes il faudra prévoir 1 MW de capacité complémentaire qui sera utilisée jusqu'à 88% du temps pour pallier aux manques du photovoltaïque et 80% du temps pour compléter la production éolienne. On se demandera alors qui est le complément de qui ! Il faudra attribuer le coût de la part improductive du capital à l'énergie alternative qui est la cause du surinvestissement. En pratique on s'arrangera pour faire mieux fonctionner une telle centrale, par exemple en offrant sa capacité sur des marchés d'exportation. Mais si les énergies intermittentes devaient s'implanter partout, y compris chez nos voisins, et si l'on inclut en plus une croissance de la demande pour permettre le développement de la mobilité électrique et l'usage des pompes à chaleur, alors on ne pourra pas échapper à la logique de la réserve de capacité inutilisée. Les vallées pouvant retenir l'eau de pluie et de fonte des neiges étant déjà bien exploitées en Suisse il ne reste donc que les centrales à gaz ; or, à part quelques petites installations de cogénération vapeur/courant il n'en existe encore aucune en Suisse.

Les investissements à réaliser pour chaque type de production sont approximativement ceux de la table ci-dessous:

	Investissement pour une capacité nominale de 1 kW [CHF/ kW]	Facteur de capacité	Investissement pour la production annuelle de 1000 kWh [CHF/ 1000 kWh/yr]	Investissement en capacité complémentaire de compensation [CHF/ 1000 kWh/yr]	Total Investissement [CHF/ 1000 kWh/yr]
Éolien sur terre	2200	20% (Jura suisse)	1250	320	1570
Éolien sur mer	2800	40%	800	100	900
Photovoltaïque	3500	11% (Suisse)	3500	650	4150
		25% (Sahara)	1600	230	1830
Gaz naturel	1100	80%	160		160
Nucléaire	5000				
	90%	600	140	740	

Table des investissements:

- Investissements selon «Program on Technology Innovation: Integrated Generation Technology Options», Electric Power Research Institute, 2011, www.epri.com.
Investissement "overnight", c'est à dire comme si tout était dépensé en un seul coup.
- Un foyer en Suisse consomme entre 3000 et 4000 kWh chaque année.
- Hypothèse : pour toute installation ayant un facteur de capacité inférieur à 30% une capacité complémentaire doit être installée. Le chiffre de 30% est retenu car il correspond à l'adaptabilité actuelle du réseau.
Exemple : photovoltaïque en Suisse avec CF de 11%. Une capacité complémentaire de $100 \cdot 30 \cdot 11 = 59\%$ est nécessaire. Le coût le plus faible est choisi, celui d'une centrale à gaz.
- Investissement complémentaire pour le nucléaire: centre de stockage de déchets. Planifié mais pas encore réalisé, les déchets attendent dans des piscines.

Pour calculer le coût ex-usine de l'électricité produite les frais fixes sont divisés par la capacité réellement utilisée. Ils se composent des frais d'entretien, des amortissements et des intérêts financiers. Le cas échéant s'ajoutent les coûts variables pour acheter le gaz et les certificats de CO₂ (0,06 Fr/kWh) ou la matière fissile (0,0022 Fr/kWh). Dans le cas du nucléaire il faut ajouter la formation d'une réserve pour pouvoir payer le

2 La statistique de consommation de l'EDF en France en 2011 montre que le pic de consommation dépasse de 21% la consommation journalière moyenne, avec un maximum de 29% et un minimum de 16%.

3 Amory B. Lovins, Reinventing Fire: Bold Business Solutions for the New Energy Era, Chelsea Green 2011, ISBN 9781603583718, cité par http://en.wikipedia.org/wiki/Intermittent_energy_source

démantèlement de l'usine lorsqu'elle sera devenue obsolète⁴ ainsi que les frais de stockage à long terme des déchets⁵. Les coûts externes sont liés aux seuls frais financiers associés à l'inutilisation de capacités complémentaires. Les coûts unitaires approximatifs incorporant tous ces facteurs sont les suivants (« leveled cost », sortie usine, le transport et la distribution ne sont pas comptés) :

[CHF / MWh]	Coût fixe	Coût variable	Coût direct	Coût externe	Coût total
Éolien sur terre	128	0	128	19	147
Éolien sur mer	78	0	78	6	84
Photovoltaïque Suisse	340	0	340	40	380
Photovoltaïque Sahara	140	0	155	15	170
Gaz naturel	14	60	74		74
Nucléaire	65	2	67	10 9	77

Quant au stockage intermédiaire de l'énergie afin d'écarter les pics de production il faut bien reconnaître qu'à part le pompage-turbinage de l'eau aucune technologie n'est raisonnablement au point à ce jour. Il faut transformer de l'électricité en autre chose puis, après quelques heures ou quelques jours de stockage, transformer en retour cet autre chose en électricité. De plus, pour tenir comptes des pertes lors de chacune de ces transformations il faut disposer de sur-sur-capacités pour que le bilan boucle.

Quelles technologies pourraient donc entrer en ligne de compte ?

- Les batteries, très utiles pour de petites installations, n'ont que des capacités faibles à un coût exorbitant.
- Le moteur à inertie par la mise en rotation d'une grande masse : de capacité limitée.
- Le pompage-turbinage de l'eau requière des lacs de retenue à remplir et vider. Exemples :
 - un lac avec une surface de 40 hectares et une hauteur variant entre 5 et 15 m offre une réserve d'environ 100 MWh, soit la production journalière de deux éoliennes de 82 m de diamètre ;
 - en une heure l'installation Hongrin-Léman en Suisse peut stocker 200 MWh en refoulant de l'eau avec un débit de 24 m³/s sur une différence d'altitude de 878 m.

Mais il faut noter que la justification des installations existantes réside dans la différence de prix que le producteur réalise entre le bas coût de l'énergie de bande en suroffre durant la nuit et les week-ends et la vente à prix élevé du courant fourni durant les quelques heures par jour de pic de demande. Dans le cas qui concerne l'écarterage des intermittences des sources alternatives cet avantage économique disparaîtra : une source chère sera stockée pour être revendue, après une perte de 15-30%, à un prix banalisé.

- La compression et détente de l'air : le rendement énergétique est faible, de grandes capacités d'échange de chaleur sont requises.
- Le stockage thermique par chauffage d'une masse de sels en fusion suivi de la production de vapeur qui entrainera une turbine. Cette technologie paraît mieux appropriée pour des centrales solaires thermiques dans des pays du sud car l'énergie primaire récoltée est d'ores et déjà la cha-

4 Pour constituer en 40 ans une réserve de 1000 franc avec un rendement financier net de 2% il faut déboursier 16,55 franc chaque année. Pour le calcul on suppose que le démantèlement d'une centrale nucléaire coutera autant que sa construction.

5 En Suisse un prélèvement de 0,01 franc par kWh issu du nucléaire est perçu à cet effet, soit une contribution de plus de 250 millions de francs chaque année. Après 40 ans et avec un taux d'intérêt net de 2% on pourrait avoir capitalisé ainsi plus de 15 milliards de francs (moins les dépenses de recherche et d'exploration en cours durant ces années).

leur. Les rendements énergétiques sont thermiques, donc faibles.

- L'électrolyse de l'eau et le stockage d'hydrogène sous pression qui peut être utilisé dans une pile à combustible ou dans une turbine à gaz pour refaire de l'électricité (avec rendement de ~30% pouvant monter à 60% en combinant force et chaleur, si l'on a besoin de chaleur).

La technologie des piles à combustible est encore limitée à des dimensions modestes (jusqu'à 3 MW) avec des rendements de seulement 50-60%.

L'hydrogène ainsi généré peut aussi servir à produire des carburants liquides, méthanol ou hydrocarbures, par réaction catalytique avec du charbon ou même du CO₂. Cette technologie a été démontrée au niveau industriel, bien qu'économiquement peu rentable au prix actuel des carburants ; mais cela peut changer au gré des soucis géopolitiques autour des pays producteurs de pétrole et de l'évolution de la demande mondiale.

Les investissements nécessaires et les coûts opératoires de ces procédés de stockage sont encore à évaluer. En sus du pompage-turbinage déjà prouvé à grande échelle, il semble que seuls le stockage de sels chauffés et l'électrolyse de l'eau soient faisables.

Par ailleurs une des caractéristiques du photovoltaïque est d'être décentralisé. La production se fait sur les toits des maisons et autres immeubles industriels répartis sur tout le territoire. Chaque installation doit être pourvue d'un dispositif permettant d'injecter l'énergie produite dans le réseau, et le réseau doit être conforme pour pouvoir absorber et redistribuer cette énergie à tout moment et aussi à fournir au même consommateur/producteur local toute la puissance qu'il requière indépendamment de celle qu'il produit. Ces interconnexions complexes vont exiger des investissements (non encore chiffrés) dans des réseaux de distribution encore plus sophistiqués et ayant de capacités de transport plus élevées qu'aujourd'hui (smartgrid).

Stratégie d'approvisionnement.

Le choix d'une stratégie d'approvisionnement en énergie électrique ne peut se faire sans considérer l'état de la technique et les limitations théoriques et pratiques de chaque technologie. Même si beaucoup de nos concitoyens, y compris une grande portion des décideurs politiques, sont arithmétiquement analphabètes on ne peut pas non plus se permettre d'ignorer les chiffres et les ordres de grandeurs. Les faits sont opiniâtres, les pierres dans le jardin font mal au pied.

Ainsi, miser sur les résultats de recherches et développements de demain pour sélectionner une option aujourd'hui relève de l'illusion malhonnête. Si, bien sûr, il faut investir en R&D ce ne doit pas l'être pour confirmer ce que l'on sait, ni pour contraindre une découverte à être ce que l'on souhaite⁶, mais pour satisfaire la curiosité et laisser court à la capacité créative et innovatrice : nous devons savoir aujourd'hui que nous ne savons pas ce qui sera découvert demain.

Des questions prioritaires doivent encore être posées, et des réponses circonstanciées doivent y être apportées avant de s'engager dans une aventure qui sera de toute manière couteuse.

Tout d'abord : est-il raisonnable de renoncer au nucléaire ?

Répetons ici les arguments⁷. Si le risque est considéré comme trop important il est déraisonnable de continuer la production et il faut l'arrêter immédiatement en acceptant toutes les conséquences sociales et économiques que cela entraînerait dès le premier jour. Un attermoiement peut se justifier par une mise en balance des risques et des conséquences de certains choix, c'est ce que font le Conseil fédéral et le parlement helvétique en décidant une sortie à terme. Mais si le risque est encore acceptable pour vingt ans, pourquoi pas quarante, soixante, ou plus ? À cette question aucun expert ne peut répondre, pas un seul. Les centrales existantes sont constamment remises à jour ; dans des conditions de sécurité toujours améliorées leur durée de vie est certainement beaucoup plus longue que les quarante ans initialement prévus. Au moment de réin-

6 Le meilleur exemple d'une recherche contrainte au résultat est la fusion nucléaire. Depuis cinquante ans d'immenses moyens ont été mis à disposition. Un centre énorme est en construction en France (projet ITER, 16 milliards d'euros). Mais au-delà de quelques fractions de secondes les réacteurs expérimentaux n'ont jamais produit plus d'énergie qu'il n'en n'ont reçus.

7 Télécharger un document depuis blog.mr-int.ch

vestir dans une ou plusieurs nouvelles centrales il faudra bien choisir une version technologique selon des critères de sûreté, de nature de la matière fissile à utiliser et de gestion des déchets. Faudrait-il y renoncer ? Les pays émergents continuent de miser sur la filière nucléaire : sont-ils des imbéciles irresponsables ? La peur de l'accident est naturelle et compréhensible, doit-elle seule dicter les choix ? Ce n'est pas non plus parce que le traitement des déchets pose encore problème que se justifie l'arrêt du nucléaire : ces déchets existent, il s'en produit régulièrement dans les centrales et aussi des quantités non négligeables dans les hôpitaux. Qu'on le veuille ou non il faudra se mettre d'accord sur une méthode de stabilisation et de stockage ; qu'il s'agisse des cent mille mètres cube accumulés jusqu'à maintenant (l'équivalent d'un cube de 46 m de côté, soit une grosse maison de 15 étages) ou d'un multiple de cette quantité, cela n'y changera strictement rien.

Ensuite : faut-il absolument réduire les émissions de CO₂ ?

Le dogme de l'ampleur, de la vitesse et de l'impact néfaste d'un changement climatique est en train de se craqueler, surtout quant à l'incrimination des activités humaines comme la cause principale de cet hypothétique changement. Ironiquement il est exigé de ce même Satan qu'il mette en œuvre des remèdes efficaces. Il faut impérativement changer le changement. Pourtant personne ne sait vraiment quel est un bon climat : celui de hier ? Ou d'avant-hier ? Peu importe, le débat est loin d'être clôt quoiqu'en disent les gardiens de la congrégation de la foi.

Et tant que les évidences sont si ténues il est urgent d'attendre avant d'engager une croisade anti-carbonique.

Si l'on continue d'avoir peur du nucléaire et que le CO₂ n'a pas d'importance alors nous pouvons passer au gaz naturel ou aux centrales thermiques au charbon comme en Allemagne, ce sera la solution la moins chère, bien que présentant une grande dépendance vis-à-vis des pays qui détiennent les réserves de combustibles fossiles. Mais peut-être qu'avec les gaz de schiste chaque pays pourrait disposer d'un haut niveau d'autonomie énergétique ? Cela reste à voir.

Et enfin : est-il raisonnable de pousser les énergies intermittentes au-delà de la capacité actuelle d'absorption du réseau ?

Non ! Comme nous avons pu le voir les énergies intermittentes ne sont pas de vraies alternatives. Elles sont au mieux un intéressant complément aux énergies classiques, au pire un gâchis financier. Les systèmes complexes de subventionnement par compensation directe, garantie du prix de rachat ou allègements fiscaux sont à supprimer immédiatement. Ces mécanismes étatiques font saliver les parasites professionnels, incitent à la création de structures et de corps constitués qui déjà s'attachent à défendre leur pré carré. Si de nouvelles technologies sont vraiment clean, alors elles s'imposeront comme une vraie alternative, économique et durable, donc écologique. Si elles n'ont que le mérite de faire du brouhaha alors elles disparaîtront aux oubliettes.

Face à tout changement du mix énergétique une réponse trop habituelle est que les prix devraient augmenter. Si cela devait être le cas lorsque de nouvelles technologies sont introduites alors cela serait un grand constat d'échec pour lesdites technologies. Il serait trop facile pour les sociétés productrices et distributrices d'électricité d'adopter n'importe quel procédé inefficace et d'en reporter les surcoûts sur leurs clients captifs ; ce sont des pratiques déjà très [trop] bien mises au point par ces acteurs semi-étatiques, grands mangeurs de grands fromages. Alors que les foyers familiaux sont peu délocalisables, ce n'est pas le cas pour beaucoup d'industries. Une péjoration des conditions cadre, par exemple une augmentation incommensurée du prix de l'électricité, peut être un frein à l'investissement dans notre pays. Il faudra donc bien veiller à la justification économique d'un quelconque changement de tarifs et aussi continuer d'ouvrir le marché à une saine concurrence.

Il faut savoir choisir les batailles à mener. Pour la question de l'approvisionnement électrique il s'agira plus de décider de ce qui ne doit pas être fait – quitter le nucléaire, subventionner les énergies alternatives – que d'engager des moyens démesurés sur des pistes au mieux triviales, au pire nous menant au précipice.