

Michel BIGNON (X34)
18, rue Mirabeau2
75016 PARIS
Tél : 06 7008 6232

Le 16/12/2017

La Jaune et la Rouge Rédaction
5, rue Descaartes
75005 Paris

Chers camarades

Vous avez mis sur le "mail" un article consacré au dernier N° de la revue (N° 730). Il m'a incité à le regarder de plus près, en particulier ce qui concerne la transition énergétique.

Je dois préciser que toute ma carrière industrielle a été consacrée à l'énergie, notamment lorsque je dirigeais le service Procédés de USSI (Georges Besse), puis du projet Themis et enfin le secrétariat général de l'AFEDES (Développement de l'énergie solaire).

Avec étonnement, je constate que le ton général est entièrement conforme à la position politique et médiatique où le réchauffement climatique dû à l'homme, et la peur de tout ce qui touche à l'atome, sont des vérités révélées qui ne souffrent pas discussion.

Vous ne pouvez pas ignorer que le recours massif à des sources d'énergie électrique intermittentes et aléatoires exigerait de des moyens de stockage de cette énergie, et que ces moyens n'existent pas à l'échelle indispensable. J'ai fait sur ce sujet un exposé dont vous trouverez le texte ci-joint. De ce fait, la Loi de 2015 sur la transition énergétique m'a paru d'emblée inapplicable, et M. Hulot commence à s'en apercevoir.

J'aurais attendu de notre revue qu'elle traite le sujet de façon plus équilibrée, en n'ignorant pas ce qui se passe en Allemagne et surtout en Australie du Sud, et en marquant quelque distance avec un organisme comme IADEME où la technique est occultée par l'idéologie.

Je sais que notre Ecole doit ménager le pouvoir politique, c'est souligné par la récente visite du Président de la République, mais elle doit aussi rester une référence objective et crédible. Notre revue N° 730 ne me semble pas répondre à cette nécessité.

Très amicalement, cependant

M. BIGNON



Résidence Les Hespérides

02 mai 2017

LE STOCKAGE de L'ELECTRICITÉ

Un Graal ou un leurre ?

Plan

Introduction

- § 1 Le sens des mots : kW, kWh, K, M, G, T.
- § 2 On sait stocker, à échelle modeste
- § 3 Les réseaux de distribution et leurs sources
 - 3 / 1 : Essor des sources aléatoires
- § 4 Ce qu'on demande au stockage :
 - 4 / 1 : Combler les manques
 - 4 / 2 : Accepter (Puissance, capacité)
 - 4 / 3 : Restituer (Puissance, rendement)
 - 4 / 4 : Un coût acceptable
- § 5 Ce qui existe à grande échelle
 - 5 / 1 : Batteries
 - 5 / 2 : STEP
- § 6 / Conclusions,
 - 6 / 1 La technique connue est inadaptée aux grands réseaux
 - 6 / 2 Que faire ?

Introduction

Il vous est peut-être difficile d'imaginer que, lorsque j'étais enfant, notre maison n'avait pas l'électricité. Impensable, aujourd'hui, tant elle est omniprésente pour nous éclairer, nous chauffer, laver linge et vaisselle, alimenter tous nos accessoires, ordinateurs télévision etc.

Or cet auxiliaire indispensable a un défaut : il ne se laisse pas stocker tel quel. L'énergie électrique doit être consommée à l'instant même où elle est produite.

Alors ?? Pas de stockage, pas de conférence ??

Mais, direz-vous, on sait qu'un nuage d'orage peut stocker de l'électricité ! Certes, mais nous ne savons pas l'utiliser sous cette forme.

Par contre, on sait transformer l'énergie électrique en d'autres énergies, mécanique, chimique, thermique &c, que l'on sait stocker. A condition de maîtriser cette transformation et son inverse, on a réalisé ce qui semblait impossible.

§ 1 / Le sens des mots

Il ne peut être question que je vous fasse ici un cours de physique, mais je suis obligé d'employer quelques termes techniques dont il est indispensable que vous connaissiez le sens exact.

kW et kWh

Vous avez sans doute un fer électrique dont la plaque indique la puissance : environ 1 kilowatt. (kW). C'est la puissance électrique qu'il est capable de recevoir et de transformer en chaleur. Mais s'il reste dans l'armoire, débranché, il ne vous coûte rien.

Par contre, si vous le branchez et le faites fonctionner pendant une heure, vous aurez employé un kilowattheure. (kWh) .C'est l'énergie électrique qu'il a consommée et que vous paierez au réseau qui l'a fournie. (Environ 10 centimes, plus 10 de taxes et contributions.)

(Quiz : Au lieu de transformer cette énergie en chaleur, on l'emploie à soulever verticalement mes 70 kg. A quelle hauteur vais-je arriver ? 100 mètres ? Plus ? Moins ? Réponse en fin de texte.

Grands nombres

Nous allons explorer une très large gamme de puissances et d'énergies. Voici les repères qui vous permettront de ne pas vous égarer dans la forêt des zéros.

Vous savez sans doute que mille se dit (Kilo)
Mille fois plus, c'est un million (Méga)
Encore une fois mille, c'est un milliard (Giga)
Et encore une fois mille, pas de nom (Tera)

(Kilo)	Batterie auto	kWh	K= 1 000
(Méga)	Eolienne	MW	M = 1 000 000
(Giga)	Centrale nucléaire	GW	G = 1 000 000 000
(Tera)	1 jour en France	TWh	T = 1 000 000 000 000

(Quiz : environ 5 000 m)

§ 2 / On sait stocker l'énergie électrique, à une échelle modeste.

Notre vie quotidienne est meublée d'objets tels que téléphones mobiles, tablettes, photographie numérique etc. qui, toutes, exigent d'être alimentées en électricité. Tous ces appareils sont donc munis de batteries où, par une réaction chimique aidée par l'électricité, on accumule de l'énergie. Elles reçoivent ainsi une charge qui peut être restituée à la demande sous forme de courant continu.

Ces batteries, ou accumulateurs, ont fait de grands progrès depuis leur invention par Planté, il y a un siècle et demi, et c'est ce qui a permis leurs applications légères et mobiles. Pourtant celles qui utilisent le principe originel au plomb sont encore d'un usage presque universel dans l'automobile où elles assurent le démarrage du moteur et les diverses fonctions du bord. Une berline familiale est ainsi pourvue d'une batterie dont la capacité est d'environ Un kWh, le prix voisin de 100 euros et le poids de près de 10 kg.

Ceci nous servira de repère pour des projets plus ambitieux.

Fondées sur ce même principe, mais non rechargeables, il existe par milliards des piles qui animent des télécommandes, des jouets (Le Père Noël est suivi au bout de quelques jours par le Père Pile, bien connu des parents) mais aussi les prothèses auditives. Ici la commodité d'emploi fait accepter un prix très élevé pour l'électricité. Une pile contenant 0.5 wattheure coûte un euro, soit 2 000 euros le kWh (v/s 20 centimes à la prise)

§ 3 / Les réseaux de distribution et leurs sources

Les usages domestiques et industriels exigent cependant des puissances d'un tout autre ordre de grandeur. Les pays développés se sont dotés de réseaux de câbles capables d'acheminer l'énergie électrique vers chacun des usagers avec la puissance et la sécurité dont ils ont besoin et que nous connaissons tous. Un Français, lorsqu'il branche une prise, ne se demande jamais s'il y aura du courant ni s'il fera ce qu'il lui demande, encore moins comment c'est possible.

C'est que le réseau est doté de puissants moyens de production groupés en "centrales" qui maintiennent l'équilibre entre leur production et la demande. En France, ce parc de centrales a une composition singulière. Pour retrouver son autonomie après le choc pétrolier de 1972, un vaste programme a doté le pays d'un ensemble de centrales nucléaires qui constituent son ossature principale. Complétées par des unités hydroélectriques, elles couvrent 85 % de la consommation électrique du pays, qui s'élève à environ 450 TWh par an (soit 1.4 TWh par jour), et émettent très peu d'effluents gazeux à effet de serre, comme le CO₂.

3/1 Essor des sources aléatoires

Mais deux accidents majeurs (Tchernobyl et Fukushima) ont soulevé des craintes sur la sécurité de ce type de centrales et, de plus, des préoccupations écologiques ont amené l'ONU, puis l'U E à sa suite, à préconiser leur remplacement par des sources d'énergie dites renouvelables.

Au cours des conférences internationales sur le climat, l'accent a été mis sur ces sources qui ne rejettent pas de gaz carbonique dans l'atmosphère.

Les principales utilisent le vent et le soleil, mais tous deux souffrent du fait qu'ils sont intermittents (pas toujours présents), et aléatoires (leur présence n'est pas prévisible).

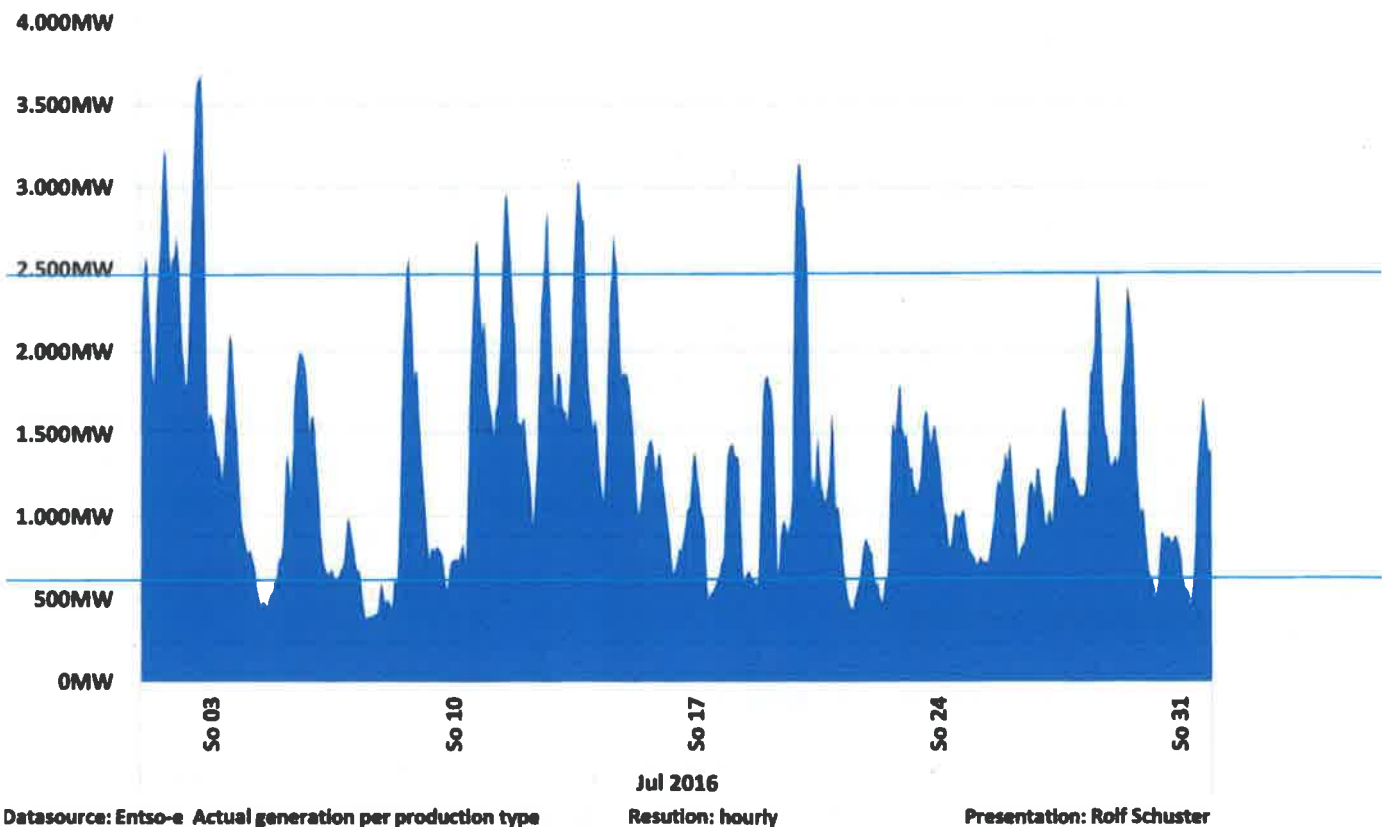
Comment pallier ces défauts, surtout si on veut ne recourir qu'à elles, comme le souhaitent les écologistes les plus exigeants. Pour couvrir les périodes où ces sources font défaut, il faut disposer d'une réserve. Cela pourrait être un moyen auxiliaire de production, Sinon on peut constituer celle-ci par un stockage que l'on chargerait pendant que la puissance des appareils producteurs, éoliennes ou panneaux, dépasse la demande des consommateurs.

Un usager isolé, ne demandant que quelques kWh par jour, dispose de moyens pour le faire, mais ceux qui permettent actuellement de le réaliser ne répondent pas, à grande échelle, aux exigences de fonctionnement des réseaux de distribution étendus.

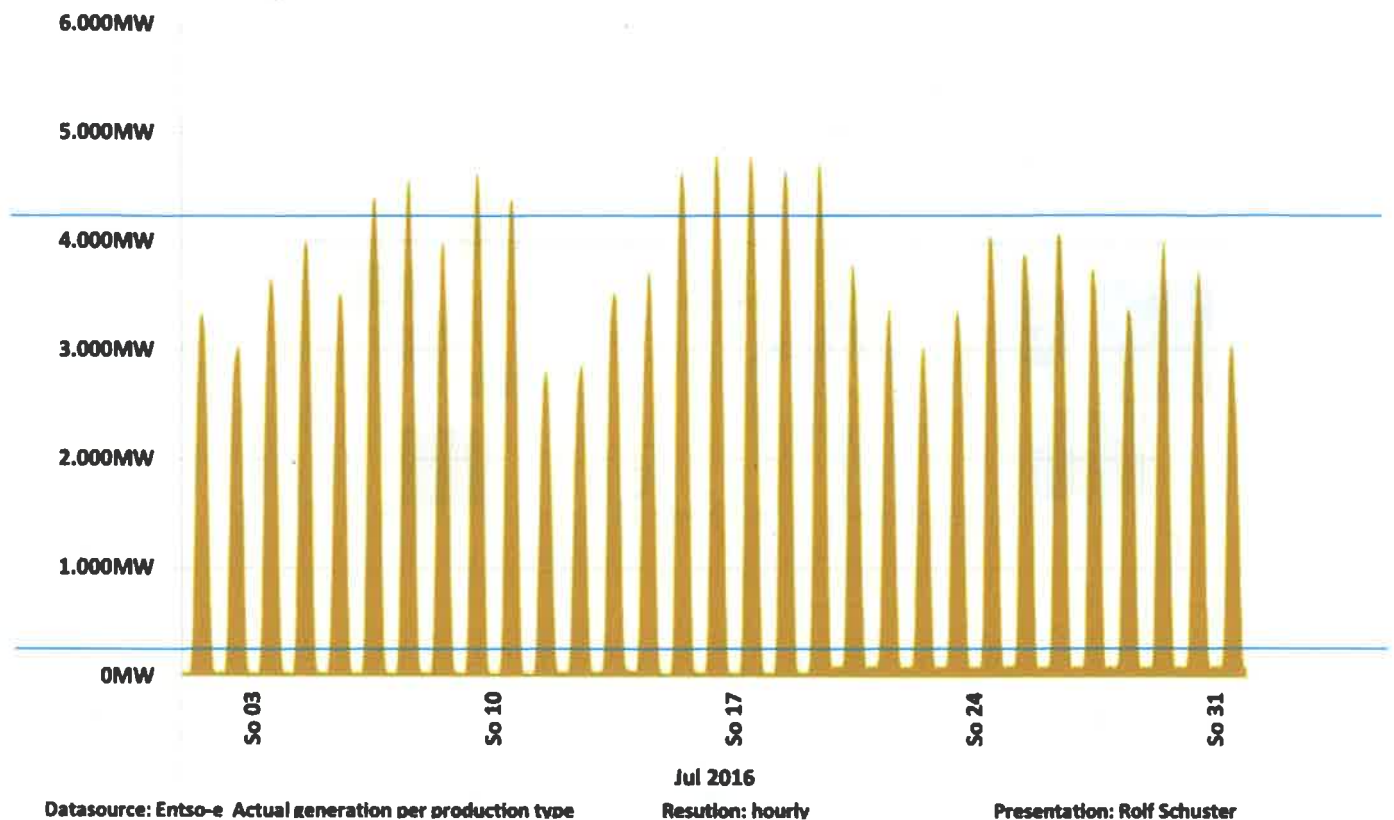
Je vous propose d'examiner les conditions sous lesquelles ceux-ci pourraient cependant fonctionner, et plus spécialement le stockage sans lequel aucune continuité de service ne serait possible.

Plusieurs années d'exploitation de parcs d'éoliennes et d'ensembles photovoltaïques permettent de connaître les résultats de leur fonctionnement :

Variation de la puissance disponible (MW) des éoliennes pour la production d'électricité France – Juillet 2016



Variation de la puissance disponible (MW) du photovoltaïque pour la production d'électricité France – Juillet 2016

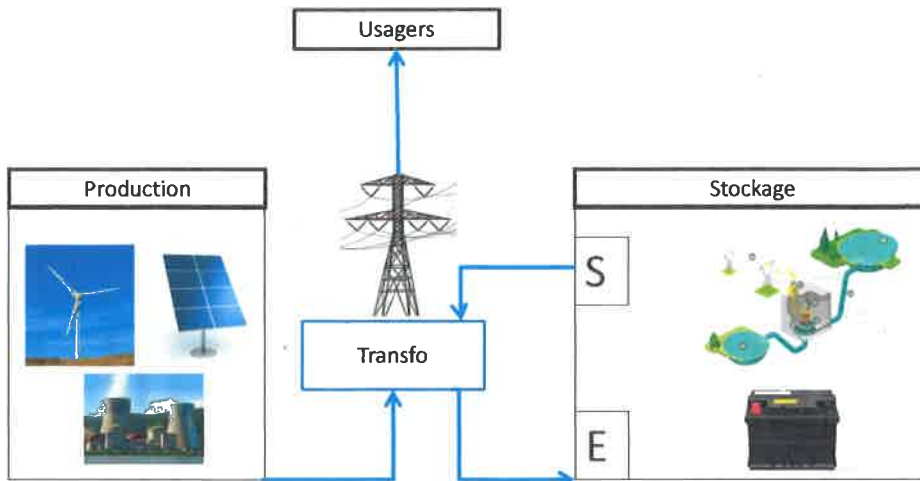


Le calcul suivant est fait sur une année afin de couvrir le cycle des saisons

Un parc d'éoliennes produit environ 25 % de ce que fournirait sa puissance nominale.
Un parc photovoltaïque produit environ 15 % de ce que fournirait sa puissance-crête.
Ces chiffres se nomment "facteurs de charge".

Mais ces facteurs de charge n'ont été atteints que parce que ces parcs sont prioritaires pour livrer leur production. Pas un kWh n'a été perdu, car un autre producteur a dû s'effacer. Si ce n'est pas possible, lorsque tout le parc est aléatoire, seul un stockage peut jouer ce rôle.

§ 4 Ce qu'on demande au stockage



4 / 1 Assurer la continuité du service

En l'absence de vent et de soleil, et si on ne veut pas (ou ne peut pas) recourir à d'autres sources, il faut une réserve de secours pour alimenter le réseau.

De quelle capacité a-t-on besoin pour la continuité du service ?

Pour la France:

La consommation journalière est de l'ordre de 1.4 TWh Un très grand chiffre.

Stocker un TWh avec des batteries genre voiture exigerait, en effet, d'installer un milliard de batteries (=100 milliard d'euros, à renouveler tous les trois ans environ).

De plus, un épisode anticyclonique (sans vent) peut durer quelques jours.

On voit bien que ce mode stockage ne conviendrait pas à notre pays.

Toutefois d'autres pays peuvent se contenter d'objectifs moins ambitieux:

Un pays peu développé qui ne dispose pas de réseau mais où le vent ou le soleil sont favorables peut amorcer son développement par une judicieuse combinaison de ces sources avec des batteries, ouvrant localement l'accès à l'électricité de faible puissance, éclairage et électronique. Des succès sont déjà enregistrés dans cette voie lorsque son coût n'est pas un obstacle.

4 / 2 Accepter toute la puissance disponible.

Pour ne rien perdre des kWh que le stockage doit recevoir, il faut que sa capacité soit suffisante pour que, en plus de couvrir les périodes sans sources, il ne soit jamais plein à l'instant où arrive l'énergie.

Mais il faut aussi que le système d'entrée, qui met cette énergie sous la forme où elle va être stockée, accepte la pleine puissance qui se présente.

Celle-ci peut être très élevée lorsqu'il s'agit d'éoliennes car elles peuvent développer, en pointe, le double de leur puissance nominale. Par contre un parc photovoltaïque ne peut pas dépasser sa puissance-crête.

La régulation des entrées et sortie d'énergie au stockage nécessite une gestion adéquate du cycle.

4 / 3 : Restituer l'énergie stockée

Cette exigence est double :

D'une part il faut que le système de sortie puisse fournir au réseau la puissance que lui demandent les usagers. Cela conditionne ce système qui reconvertit l'énergie stockée en courant. Il doit être suffisamment puissant mais, de plus, réglable pour s'adapter à la puissance demandée.

Plus important encore il ne doit, en aucun cas, pouvoir émettre cette énergie sur un rythme incontrôlé. Une énergie hautement concentrée est, en effet, un réel danger. Des incidents récents sur des téléphones mobiles l'ont montré à petite échelle. Mais nous verrons qu'un barrage, même modeste, pourrait libérer, en cas de rupture, une énergie comparable à celle de la bombe qui a rasé Hiroshima (environ 40 GWh)

D'autre part, il faut que le stockage ne laisse pas se perdre l'énergie qu'on lui a confiée. Tout kWh perdu vient, en effet, s'ajouter à la production demandée aux sources et se traduit par l'obligation d'augmenter le parc de production. Cela disqualifie toute méthode de stockage dont le rendement, trop bas, conduirait à un investissement excessif.

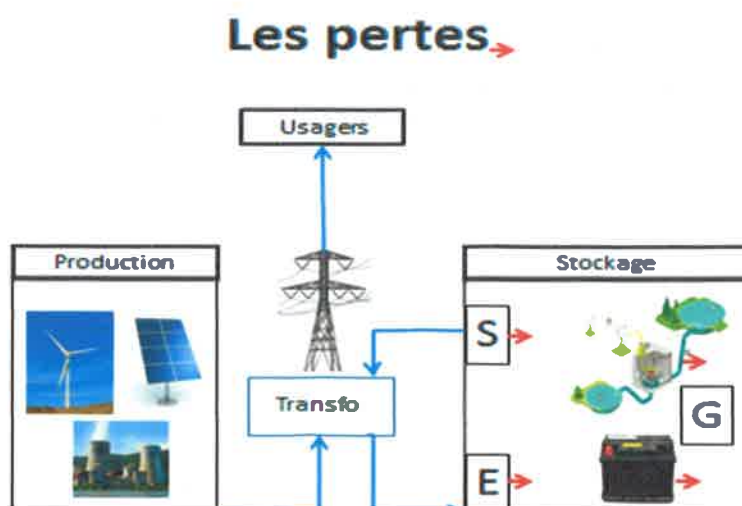
4 / 4 : Un coût acceptable

Le fait de recourir au stockage ne doit évidemment pas grever le prix du courant de manière inacceptable pour les usagers.

Ce supplément de prix provient de plusieurs causes :

Il faut couvrir l'amortissement et le renouvellement éventuel de l'installation de stockage. Et il faut aussi couvrir ses frais de fonctionnement.

Mais il faut, en outre, payer les kWh dont il a entraîné la perte, ce qui souligne l'importance de limiter ces pertes.



Insert

Commentaires sur les pertes

(Non explicité en séance)

La figure de la page 7 montre, par des flèches rouges, les points où l'énergie passant par le stockage subit des pertes.

Le mécanisme de ces pertes est différent pour les trois parties que comporte la fonction "stockage" : Entrée, garde, sortie.

Leurs rendements seront notés r_E , r_G et r_S .

Chaque kWh distribué à l'utilisateur, **s'il est passé par le stockage**, a donc nécessité qu'à l'entrée on ait fourni à celui-ci $1 / (r_E \times r_G \times r_S)$ kWh.

Le supplément de coût et de matériel dû aux pertes du stockage dépend de quatre facteurs de la fraction de l'énergie distribuée qui transite par lui et des rendements de ses trois composants.

1 / Le premier facteur ne dépend pas du type de stockage choisi, mais seulement des caractéristiques du réseau (production et consommation) Il définit le poids global qu'auront les pertes sur le coût final de l'énergie distribuée.

2 / Pertes à l'entrée :

Elles sont dues au rendement du système qui transforme l'énergie électrique en une autre forme, prête à être stockée. Mais si ce système ne peut pas recevoir tout ce qui se présente (parce qu'il est trop lent ou pas assez puissant, ou qu'il trouve le stockage déjà plein), le supplément non accepté s'ajoute aux pertes de rendement dans le calcul de r_E .

3 / Pertes en garde :

Elles dépendent de la durée du cycle (maintien en stock) et de la forme sous laquelle l'énergie est stockée.

En général faibles, ce sont pourtant elles qui rendent quasi-impossible un stockage inter-saisonnier.

4 / Pertes en sortie

Ce sont elles qui rendent très médiocre le rendement d'un système où le stockage est sous forme d'énergie thermique, en raison du rendement de Carnot dans le cycle de reconversion.

Tout projet de stockage doit être ainsi examiné pour évaluer les quatre facteurs de perte et s'assurer que le surcoût final est économiquement et techniquement supportable.

§ 5 : Ce qui existe à grande échelle

5 / 1 : Les batteries

Comme on l'a dit, elles ont fait depuis peu de grands progrès techniques permettant entre autre l'essor des automobiles tout-électriques. Mais elles restent chères, au-delà de ce qui permettrait une application à très grande échelle.

Une publicité d'un pionnier en la matière présente en effet une batterie de 100 kWh pour un prix de 25 000 \$. Il en faudrait 10 millions pour accepter 1 TWh, pour un prix de 250 milliards de \$. (Ce prix élevé comprend sans doute celui des appareillages de conditionnement du courant entrant et sortant). Le fournisseur devrait, de plus, se poser la question de la pérennité de ses sources de lithium.

Un tel système connaît cependant un certain succès dans des pays ensoleillés pour amorcer leur développement.

5 / 2 : Les STEP

Un lac placé en altitude constitue une accumulation d'énergie gravitaire et l'on peut le remplir ou le vider pour utiliser cette énergie.

On a construit, sur ce principe, des installations connues sous le nom de S T E P (Système de Transfert d'Energie par Pompage) : De l'eau, puisée dans un réservoir bas, est élevée par des pompes vers un réservoir haut puis retournée vers le bas en utilisant les pompes comme turbines.

Un STEP typique, celui de Montézic (Aveyron), sur la Truyère, a une puissance de 910 MW, proche de celle d'un réacteur nucléaire. Ses pompes débitent 240 m³ d'eau par seconde avec une dénivelée de 450 mètres. Le volume utile des réservoirs, haut et bas, est de 30 millions de m³ et permet une autonomie de 40 heures environ. Ce STEP peut stocker ainsi près de 40 GWh d'énergie gravitaire et constitue une aide précieuse pour la stabilité du réseau.

Mais un tel site est exceptionnel et il en faudrait 25 pour accepter un seul TWh.

§ : Conclusions

6 / 1 : Techniques actuelles inadaptées aux grands réseaux

Que ce soit par manque de capacité ou par un coût excessif, je vous ai montré que les techniques de stockage envisagées ci-dessus ne répondent pas aux besoins d'un réseau électrique important si celui-ci est alimenté majoritairement par des sources intermittentes et / ou aléatoires.

Les projets qui prévoient de ne recourir qu'à ces sources ne manquent pas pourtant de noter "avec un stockage adéquat", feignant d'ignorer que celui-ci n'existe pas.

Des recherches se poursuivent activement pour trouver d'autres moyens de stockage. L'enjeu est énorme, tant technique que financier. Certains projets sont parvenus à des réalisations expérimentales. Entre autres :

Utiliser l'électricité disponible pour produire, par électrolyse, de l'hydrogène que l'on stocke, liquide ou sous haute pression. Celui-ci restitue cette énergie dans des piles à combustible. (Expérience "Myrte"). Cette méthode souffre d'un rendement très médiocre dont j'ai souligné les inconvénients, et des questions techniques (fuites, sécurité) que pose l'hydrogène stocké.

Utiliser l'énergie disponible pour faire tourner un volant où elle s'accumule sous forme de moment inertiel que ce volant restitue en actionnant un générateur. Je ne pense pas qu'un tel dispositif puisse être transposé aux dimensions requises pour un réseau. A une échelle plus modeste, la présence de masses en mouvement le rend difficilement compétitif avec une batterie moderne de capacité comparable.

6 / 2 : Que faire ?

L'industrie de la production et de la distribution de l'énergie électrique est aujourd'hui confrontée à un problème quasi-insoluble :

Dans les pays développés, la distribution est assurée par des réseaux alimentés par des sources centralisées.

Pour des raisons diverses, les sources qui existent sont mises en cause.

-La plus ancienne, le charbon, provoque l'émission massive de CO₂ accusé d'être la cause du réchauffement climatique.

-Les hydrocarbures, qu'ils soient liquides ou gazeux, ont le même défaut et, de plus, leurs ressources sont limitées.

-Les centrales nucléaires font l'objet de craintes après les accidents de Tchernobyl et Fukushima. Elles posent en outre le problème du devenir des déchets radioactifs issus de leur fonctionnement et de leur démantèlement.

-Les barrages hydroélectriques sont accusés de dénaturer le cours des fleuves et de constituer un danger en cas de rupture, comme on l'a vu à Malpasset.

-Seules les énergies dites "renouvelables", éolienne ou solaire, resteraient écologiquement acceptables. Mais nous avons vu qu'elles nécessitent un stockage dont les techniques actuelles ne fournissent pas les moyens.

Devant ces critiques, pour la plupart justifiées, les centrales qui utilisent ces sources d'énergie devraient disparaître et, avec elles, les réseaux tels que nous les connaissons.

C'est alors à une profonde mutation dans le système que nous sommes invités : Il faudrait se tourner vers une structure décentralisée où de nombreux producteurs, plus ou moins autonomes, utiliseraient tous des sources renouvelables.

Un vrai changement de société !

Serait-il alors possible que chacun jouisse de la sécurité et de la disponibilité qu'il connaît présentement ?

Pour cela, c'est à lui qu'incomberait alors la tâche de stocker les excédents de sa production pour en assurer la continuité, avec les impératifs que nous avons énoncés à propos des réseaux. L'investissement, pour être réparti, n'en serait aucunement diminué et le prix de revient du courant deviendrait sans doute insupportable.

C'est pourquoi les usagers qui ont choisi une telle formule ne comptent pas sur leur stockage personnel mais restent connectés aux réseaux existants, estimant que ceux-ci seront toujours disponibles. Lorsque ces usagers sont très nombreux, comme en Californie, l'économie et la stabilité du réseau deviennent pourtant très précaires.

Même en Europe, les producteurs existants, tels EdF ou Eon, sont déjà en déficit chronique.

Tel est pourtant l'objectif que proposent, à terme, les tenants les plus exigeants d'une transition énergétique. Si on en croit les programmes politiques annoncés, personne ne semble le remettre en cause.

C'est pour moi une source majeure de préoccupation pour l'avenir de notre pays.