

Stockage d'énergie électrique dans le nord de la France (Lacs Emeraude)

Par François Lempérière – 12.04.2010

1) Besoins et possibilités de STEP dans le nord de la France

Le stockage d'énergie par STEP (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage) peut avoir trois objectifs :

- Stocker une partie de l'énergie intermittente pour l'adapter aux besoins.
- Stocker pendant la nuit ou le week-end du courant réutilisé en heures de pointe permettant notamment le remplacement de gaz ou de charbon par l'énergie nucléaire.
- Améliorer qualité et sécurité du réseau électrique.

Pour une production électrique française actuelle de 60 GW en moyenne et plus de 80 GW en pointe, les STEP sont actuellement limitées à 5 GW opérant entre 2 lacs de montagne dans la moitié sud. Le développement de l'éolien (surtout au nord) et le souhait de réduire l'utilisation de combustible fossile conduisent à étudier la réalisation en 10 ou 15 ans dans la moitié nord de la France de 5 à 10 GW de STEP (avec 100 à 200 GWh de stockage) et la possibilité d'un développement ultérieur plus important.

L'absence de relief important conduit à la recherche de STEP utilisant la mer. C'est possible dans différentes régions, notamment dans le Cotentin et dans le Pas-de-Calais près de centrales nucléaires mais le pays de Caux (Haute-Normandie et Picardie) est particulièrement favorisé par sa position, sa topographie et sa géologie pour en assurer la majeure partie.

Il est donc étudié ci-dessous.

On peut opérer entre la mer comme bassin bas et un bassin haut implanté à terre ou en mer. La charge de turbinage ou pompage est voisine de 100 m dans les deux cas, hauteur utilisée par une dizaine de grandes STEP mondiales, notamment au Japon et en Russie. Les stations en montagne opèrent généralement sous des charges plus élevées, ce qui réduit, à puissance égale, la section des longs tunnels coûteux nécessaires entre les 2 lacs. La topographie du pays de Caux a le grand avantage de ne pas nécessiter de tunnels ou éventuellement des tunnels très courts ; l'intérêt des hautes chutes en est réduit.

Six zones paraissent les plus favorables, pour l'option de bassin haut terrestre proche de la falaise.

- Eletot et Veulette à l'est de Fécamp
- Belleville et Biville à l'est de Dieppe.
- Ault à l'Est du Tréport.
- Monneville à l'Est de Saint-Valery en Caux.

Ces différents sites sont proches des sites nucléaires de Paluel ou Penly, ce qui a le double avantage de stockage facile d'énergie nucléaire et d'utilisation des couloirs de lignes électriques existants.

D'autres sites sont envisageables, notamment à quelques kilomètres de la mer, avec tunnels.

L'option terrestre est représentée ci-dessous et évaluée pour ces cinq sites.

Une option de bassin en mer adossé à la falaise est possible sur ces sites. Elle est représentée dans le cas d'Eletot.

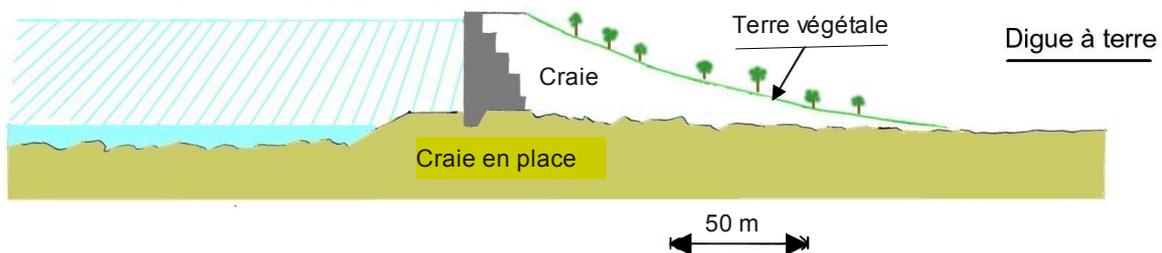
Un développement important de l'énergie éolienne offshore est également prévisible dans ces zones.

Enfin cette région n'est située qu'à 200 km de Bruxelles, 300 km de Rotterdam et 400 km d'Essen. Son potentiel est à l'échelle des besoins nord européens de stockage d'énergie et de sécurité du réseau.

2) Sites terrestres en Haute-Normandie et Picardie (surface unitaire 2 à 6 km²)

Les bassins hauts envisagés sont implantés sur des zones pratiquement sans habitations ni espaces boisés. Les paysages actuels sont constitués de zones céréalières très plates et d'éoliennes de grande hauteur aisément transférables. Il paraît donc possible d'améliorer l'aspect et l'intérêt touristique de ces zones très proches de la falaise.

Le terrain est 80 à 100 m au-dessus de la mer. Les bassins peuvent être exploités avec un marnage voisin de 40 m dont 30 m au-dessus du terrain actuel. Ils permettent de stocker environ 10 GWh/km². Les digues (coupe jointe) pourront être constituées d'un mur vertical en béton compacté côté bassin et d'un remblai extérieur en craie provenant d'un arasement partiel du bassin et de la fouille de l'usine. Une réduction de marnage et de hauteur de digue n'augmenterait pas beaucoup le coût du KWh stocké mais réduirait fortement l'utilisation.



Les talus extérieurs des digues seront en pente douce et variable. La récupération de la terre végétale du bassin permettra un mètre de terre végétale sur ces talus extérieurs de digue, facilitant des boisements importants et un aspect naturel. Une route touristique en crête de digue donnera sur plusieurs kilomètres pour chaque bassin une vue sur la mer inexistante actuellement.

L'étanchéité du fond du bassin sera assurée par la craie en place; un étanchement complémentaire par géomembrane serait d'un coût assez faible mais ne paraît pas nécessaire.

L'usine et sa sortie sur la mer, prévue dans une vauzeuse existante approfondie sur 100 m de largeur, seront très peu visibles. La sortie sur la mer pourrait même être souterraine laissant la falaise totalement intacte mais pour un surcoût non négligeable. Il y a très peu d'impacts en mer ; on peut prévoir une protection arrêtant le recul de la falaise dans cette zone.

Les bassins (plusieurs km² d'eau calme renouvelée fréquemment) pourront être utilisés pour les sports nautiques et l'aquaculture actuellement peu développés dans ces zones.

Site de Eletot

5 km à l'est de Fécamp



Site de Veulette

15 km à l'est de Fécamp



Site de Belleville

5 km à l'est de Dieppe



Site de Biville

15 km à l'est de Dieppe





Site de Ault - Picardie

5 km à l'est du Tréport



Site de Eletot
Vue actuelle



Site de Eletot
Projet proposé

EnergyThic - Notes

Les bassins envisagés (plans schématiques joints) peuvent avoir les caractéristiques suivantes :

Nom	Cote basse	Cote haute	Surface (km ²)	Longueur des Dignes (km)	Energie stockée (GWh)	Puissance installée (GW)
Eletot	105	145	2,5	6	30	1 à 3
Veulette	80	110	3	7	20	1 à 3
Belleville	95	135	6	11	65	2 à 6
Biville	95	135	4,5	8	45	2 à 4
Ault	90	135	6	14	60	2 à 5
			22	46	220	8 à 20

Le choix de la puissance installée est très large pour chaque site.

Le coût d'un aménagement comporte essentiellement deux parts :

- Les digues (environ 1 km pour 5 GWh stockés) dont le profil et le coût au m sont voisins sur les 5 sites, comportant environ 500 m³ de béton compacté et 3.000 m³ de remblais provenant de l'arasement du bassin et de la fouille de l'usine, soit :

Béton	500 m ³ x 70 =	35.000
Remblai	3.000 m ³ x 6 =	18.000
Divers (15%)	=	<u>7000</u>
	60.000 € x 46 km =	2,76 milliards € x 1,2 = 3,3

Pour 220 GWh stockés soit 15 millions / GWh (15 €/KWh).

Le coefficient 1,2 correspond aux intérêts intercalaires, études et supervision.

- Les usines dont on peut choisir la puissance et dont le prix, génie civil compris, est sensiblement proportionnel à la puissance, et de l'ordre de 600 €/KW. Ces usines sont construites à terre avec des accès terrestres et maritimes commodes.

Suivant le stockage choisi (de 10 à 30 heures), le coût total au KW varie de 750 à 1.150 €, similaire aux prix mondiaux de STEP.

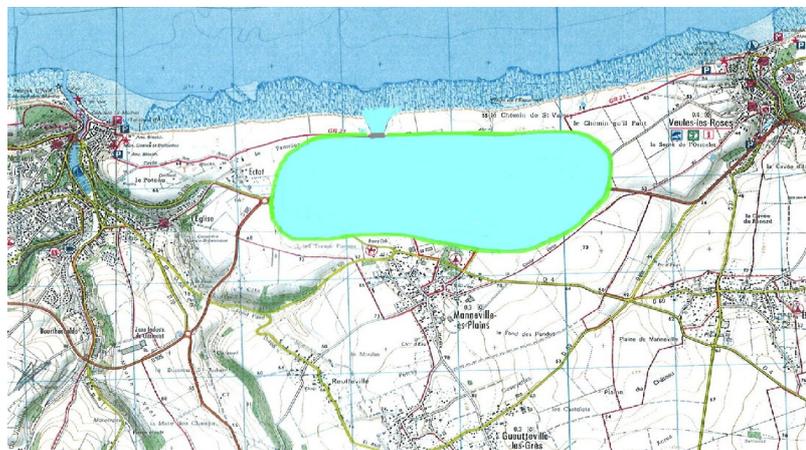
Une évaluation précise du génie civil et de l'électromécanique peut être faite facilement, quelques sondages précisant la qualité de la craie. Les aléas sont très faibles. Le délai d'exécution d'un site doit être inférieur à 5 ans. Il est donc possible d'ici 2020 ou 2025 d'équiper plus de 5 GW en 1 ou 2 sites, c'est-à-dire de créer, au nord de la France, la capacité de stockage existant au sud. L'équipement peut être progressif. Le coût d'un aménagement est de l'ordre de 2 à 3 milliards d'euros.

Site de Monneville

Autre exemple : site de Monneville à l'est de Saint-Valery en Caux

Surface : 3 km²
Energie stockée : 20 GWh

Coût au KW ou KWh proche des autres sites.



3) Sites en mer (surface unitaire de 10 à 20 km²)

Trois options sont envisageables :

- Sites totalement offshore. Leur coût au GW est certainement plus élevé dans cette région que les autres options (fondation plus profonde, protection plus longue, surcoût d'accès).
- Sites adossés à la falaise, par exemple de forme semi circulaire.
- Sites adossés à la falaise élargis par une part terrestre.

Cette dernière solution apparaît la moins chère et permet notamment d'utiliser pour la construction des digues en mer de grands volumes de craie provenant de la partie terrestre réduite du bassin qu'on peut excaver sur une grande hauteur.

La digue en mer, qui peut atteindre 150 m de hauteur peut être réalisée en partie basse par du matériau sablo-graveleux mis en place par grandes dragues marines à l'abri d'un brise lames traditionnel en enrochements (modèle Antifer) ou en caissons préfabriqués en béton armé (modèle Tanger). La partie haute peut être réalisée en tout venant ou enrochements de craie provenant de la partie terrestre du bassin. L'extérieur de la digue aura donc la couleur usuelle de la falaise ou pourra en partie être revêtu de terre végétale et arboré.

L'étanchéité du parement amont sera en paroi moulée sous l'eau et en béton armé ou géomembrane au-dessus du niveau de la mer ; vingt barrages de ce type de plus de 100 m de haut sont en service ou en construction dans le monde.

Les digues terrestres seront les mêmes que pour les solutions totalement terrestres.

Une telle solution est applicable à 4 sites envisagés. Une estimation est faite pour le site d'Eletot, la capacité et le coût au GW ou GWh étant voisins pour les autres sites.



Site de Eletot

La longueur de digue en mer est de : 7 km.

Coût au mètre linéaire d'une digue en mer de 150 m de hauteur :

Brise lame	=	50.000	
Remblais sablo-graveleux : $30.000 \text{ m}^3 \times 5$	=	150.000	
Remblais de craie : $15.000 \text{ m}^3 \times 6$	=	90.000	
Etanchéité : $250 \text{ m}^2 \times 100$	=	25.000	
+ divers		<u>35.000</u>	
		350.0000 €/ml	x 1,2 soit 420.000 €

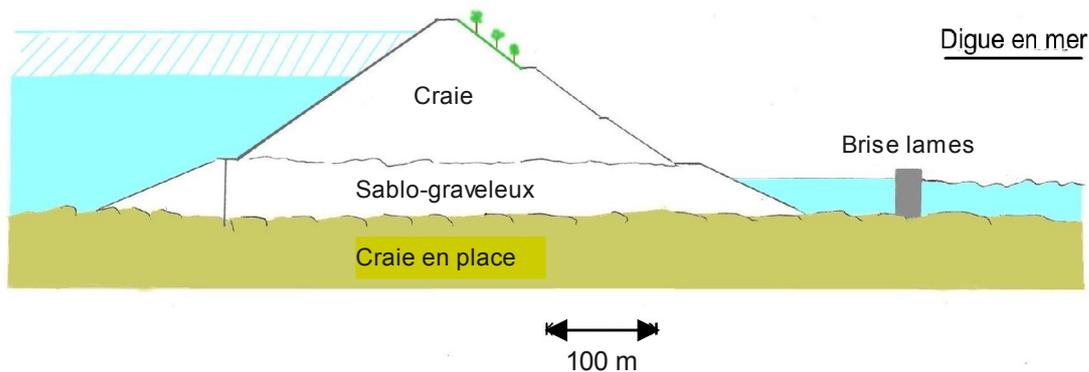
Soit un coût :

Digues en mer : $7 \text{ km} \times 420.000$	=	2.940
Digues à terre : $6 \text{ km} \times 60.000 \times 1,2$	=	<u>430</u>
		3.370 millions d'euros

pour 150 GWh de stockage (13 km^2 avec 40 m de marnage et 115 m de charge moyenne), soit 22 millions/GWh stocké au lieu de 15 millions pour un site terrestre. Le coût au KW d'usine peut être inférieur à celui du site terrestre car la puissance installée est triple. Suivant le stockage choisi, le coût total au KW peut varier de 800 à 1.200 €.

L'investissement pour un site en mer représenté est supérieur à 5 milliards d'euros. Une réduction de surface augmenterait le prix au KW.

La capacité choisie peut aussi être beaucoup plus importante et atteindre 10 GW et 300 GWh de stockage adaptés aux besoins européens.



4) Sites totalement en mer

Le bassin associé à la mer peut être plus haut ou plus bas.

- La solution avec bassin haut est semblable à la solution ci-dessus adossée à une falaise. Elle a, par rapport à cette dernière l'inconvénient d'une plus grande longueur de digue et d'un accès plus coûteux. Elle n'a d'intérêt que pour de très grands potentiels.

Elle peut être envisagée surtout si elle est réalisée à l'intérieur d'une très grande usine marémotrice, bénéficiant alors de la protection et de l'accès correspondant. Le stockage au km^2 de bassin peut dépasser 10 GWh.

- Dans les zones où le terrain naturel est de 10 à 20 m sous les basses mers, on peut créer un bassin bas, opérant par exemple entre 10 et 15 m sous les basses mers et un niveau de la mer moyen de 6 m au-dessus. Le stockage d'énergie est de l'ordre de 0,2 ou 0,3 Gwh/ km^2 . Les pompes turbines peuvent être des groupes bulbes. Cette solution peut être intéressante à l'intérieur d'un bassin d'usines marémotrices de taille moyenne, bénéficiant de la protection de ce bassin contre les

vagues et d'un accès terrestre. Elle peut notamment être intéressante à l'Ouest du Cotentin. Mais les sites terrestres du Pays de Caux sont probablement plus économiques.

Sommaire et conclusion

Le pays de Caux (Haute-Normandie) paraît très favorable et son potentiel très surabondant. La technologie nécessaire est bien maîtrisée. Les coûts sont similaires à ceux des STEP classiques, les impacts sur l'environnement probablement acceptables.

Les sites offshore ont un potentiel très important mais nécessitent des investissements unitaires de l'ordre de 5 milliards d'euros. Il est peut-être préférable de commencer par un ou deux sites opérant entre la mer et un bassin haut de quelques km² à terre avec des investissements unitaires de 2 milliards d'euros, des impacts très limités sur l'environnement, et un délai d'exécution inférieur à 5 ans. Il existe au moins 5 sites d'intérêt similaire.

Les nombreuses options terrestres ou offshore complémentaires permettront de s'adapter à l'évolution des besoins et des modes de production en France et en Europe.

Ce grand stockage économique bien situé pourrait être la meilleure solution pour permettre réellement un programme d'énergies renouvelables important et pour réduire la part d'électricité d'origine fossile en utilisant mieux l'énergie nucléaire.