

Note relative à la valorisation d'anciennes mines et carrières en Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) dans le contexte de la Transition Énergétique

1. CONTEXTE

La transition énergétique engage vers un approvisionnement en énergies renouvelables qui devrait s'intensifier dans les décennies à venir. Certaines énergies renouvelables ont une production intermittente et fluctuante. Le stockage de l'énergie constitue l'une des solutions pour accompagner leur développement.

Parmi les technologies de stockage de l'énergie, les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) représentent près de 99% des capacités de stockage massif actuelle d'énergie installées dans le monde avec près de 400 STEP pour une capacité totale d'environ 125 GW (« Le groupe EDF dans la transition énergétique ». Dossier de Presse du 18 avril 2013). A l'horizon 2050, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) prévoit une multiplication par 3 à 5 de ces capacités mondiales.

Les STEP constituent donc une technologie de stockage de l'énergie déjà opérationnelle et maîtrisée mais requièrent des conditions de site très spécifiques. De nouvelles perspectives d'installation de STEP émergent grâce à des concepts nouveaux capables de s'affranchir de cette contrainte.

2. STEP CONVENTIONNELLE

2.1 PRINCIPE

Une STEP conventionnelle est constituée de deux réservoirs d'eau situés à des altitudes différentes. En cas d'excès de production d'électricité, l'eau du réservoir inférieur est pompée vers le réservoir supérieur. En cas de besoin de production d'électricité, on procède à la vidange de tout ou partie du réservoir supérieur. L'écoulement gravitaire de l'eau à travers une turbine permet de produire l'électricité.

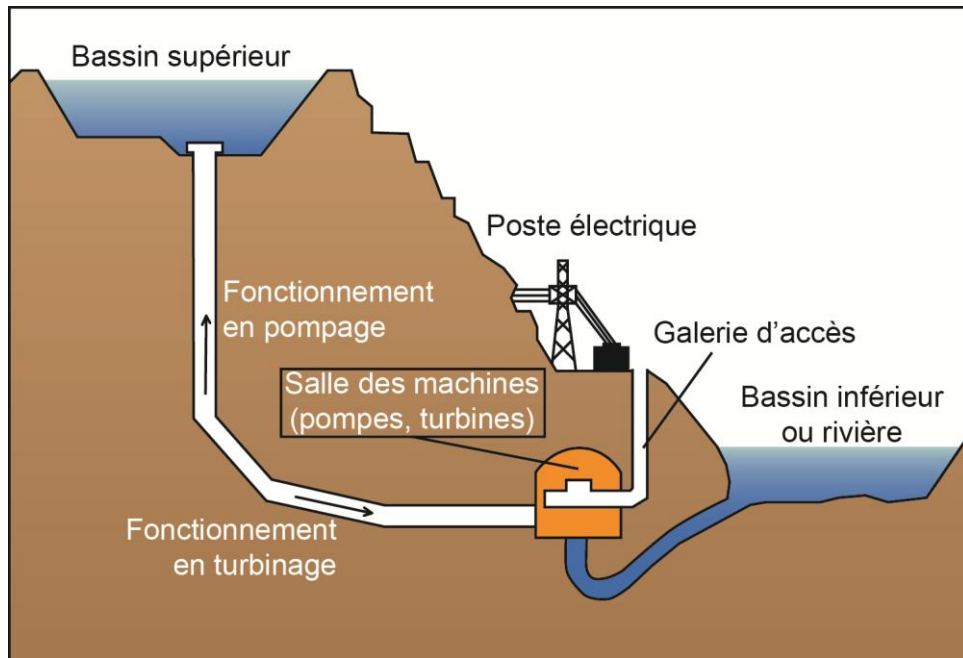


Figure 1 : Schéma de fonctionnement d'une STEP

On distingue :

- les STEP pures : STEP fonctionnant en mode fermé, avec un apport d'eau extérieur négligeable ;
- des STEP mixtes : STEP fonctionnant avec un apport d'eau extérieur supplémentaire que peut constituer un cours d'eau par exemple.

La production d'électricité d'une STEP dépend en particulier de l'écart d'altitude entre les deux réservoirs. C'est la raison pour laquelle les STEP requièrent une topographie particulière (environnement montagneux) : les sites envisageables pour l'installation de nouvelles STEP sont donc rares et les équipements à construire peuvent avoir un impact sur le paysage ce qui a son importance pour tout nouveau projet de STEP conventionnelle.

2.2 CARACTERISTIQUES DES STEP CONVENTIONNELLES

En France, 6 STEP sont en fonctionnement avec un potentiel de production de 6 à 7 TWh par an (la production nette d'électricité a atteint 541,9 TWh dont 50,3 TWh hydrauliques, en 2011, année sèche, selon les données de RTE).

	Montézic (MSI 1982)	Revin (MSI 1976)	G. Maison (MSI 1985)	S.Bissorte (MSI 1987)	La Coche (MSI 1977)	Le Cheylas (MSI 1979)	Total
Puissance en turbine	910 MW	720 MW	1790 MW	730 MW	330 MW	460 MW	4940 MW
Puissance en pompe	870 MW	720 MW	1160 MW	630 MW	310 MW	480 MW	4170 MW
Nombre de pompes	4	4	8	4	2	2	
Constante de temps	40 h	5 h	30 h	5 h	3 h	6 h	
Productible gravitaire	STEP pure	STEP pure	216 GWh	250 GWh	426 GWh	670 GWh	

Tableau 1 : Caractéristiques générales des STEP EDF en France (X. URSAT et al., 2011) (MSI : Mise en Service Industrielle)

La puissance d'un aménagement est directement donnée par sa hauteur de chute et son débit : $P = H \times Q \times \rho \times g \times r$

- avec P puissance produite (en kW) ;
- H hauteur de chute (m) ;
- Q débit de l'installation (m^3/s) ;
- ρ la masse volumique de l'eau ($1000 \text{ kg}/m^3$) ;
- g constante d'accélération de la gravité ($9,81 \text{ m}/s^2$) ;
- et r rendement de l'installation (aux alentours de 0,8 pour les centrales hydroélectriques)

On retient généralement qu'1 m^3 d'eau porté à une altitude de 100 m possède une énergie potentielle de 0,272 kWh.

La constante de temps est le rapport de l'énergie stockable à la puissance.

Le rendement d'une STEP (rapport de l'électricité produite à celle utilisée pour pomper l'eau) est compris entre 75% et 80% pour les installations récentes, faisant de cette technologie de stockage d'énergie l'une de celles présentant le meilleur rendement (X. URSAT et al., 2011).

En outre, d'après EDF, chaque heure de fonctionnement à pleine charge de la centrale EDF de Grand'Maison (Isère) permet d'économiser 142 tonnes d'équivalent pétrole, évitant ainsi l'émission dans l'atmosphère de 990 tonnes de CO_2 .

2.3 LES STEP DANS LE PAYSAGE DES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE DE L'ENERGIE

Les informations et graphiques de ce paragraphe sont issues de l' « Étude sur le potentiel du stockage d'énergies », réalisée en octobre 2013 par ARTELYS, ENEA et le G2Elab pour l'ADEME¹, l'ATEE² et la DGCIS³.

Les systèmes de stockage d'électricité sont souvent cartographiés selon leur temps de décharge et leur dimensionnement en puissance (figure 2). Dans leur usage actuel, les STEP conventionnelles sont employées pour déplacer de grandes quantités d'énergie sur une période de plusieurs heures (STEP journalières) à plusieurs jours (STEP hebdomadaires). La puissance ciblée est de l'ordre de 100 MW à 1 GW pour les STEP de surface.

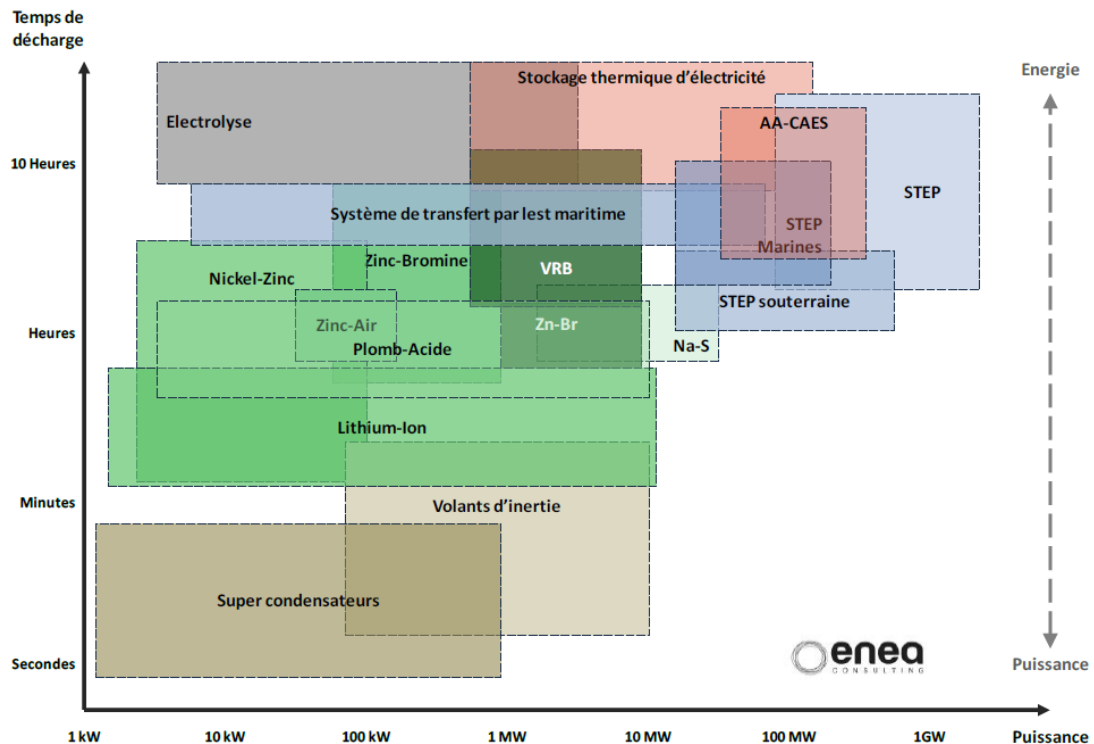


Figure 2 : Positionnement des technologies de stockage d'électricité selon leur temps de décharge et gamme de puissance « typiques » (Source : ARTELY, ENEA, G2Elab, 2013)

Pour une analyse financière, il est pertinent d'évaluer le coût du MWh délivré sur toute la durée de vie du système de stockage d'énergies, tel qu'illustré sur la Figure 3.

¹ Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'Energie

² Association Technique Energie Environnement

³ Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services, devenue Direction Générale des Entreprises, du Ministère de l'Economie, de l'Industrie et du Numérique

L' « Étude sur le potentiel du stockage d'énergies » s'appuie sur la méthodologie du « Levelized Cost Of Storage » (LCOS) qui permet de comparer des technologies de nature différentes.

Les STEP conventionnelles terrestres présentent le plus bas LCOS (< 100 €/MWh). Bien qu'aucune STEP souterraine ne soit opérationnelle à ce jour, cette technologie est estimée avec un LCOS inférieur à 200 €/MWh (Source : ARTELY, ENEA, G2Elab, 2013). Le manque de retour d'expérience de cette technologie doit amener à la prudence mais ce coût intègre probablement le coût (important) de réalisation du réservoir souterrain inférieur.

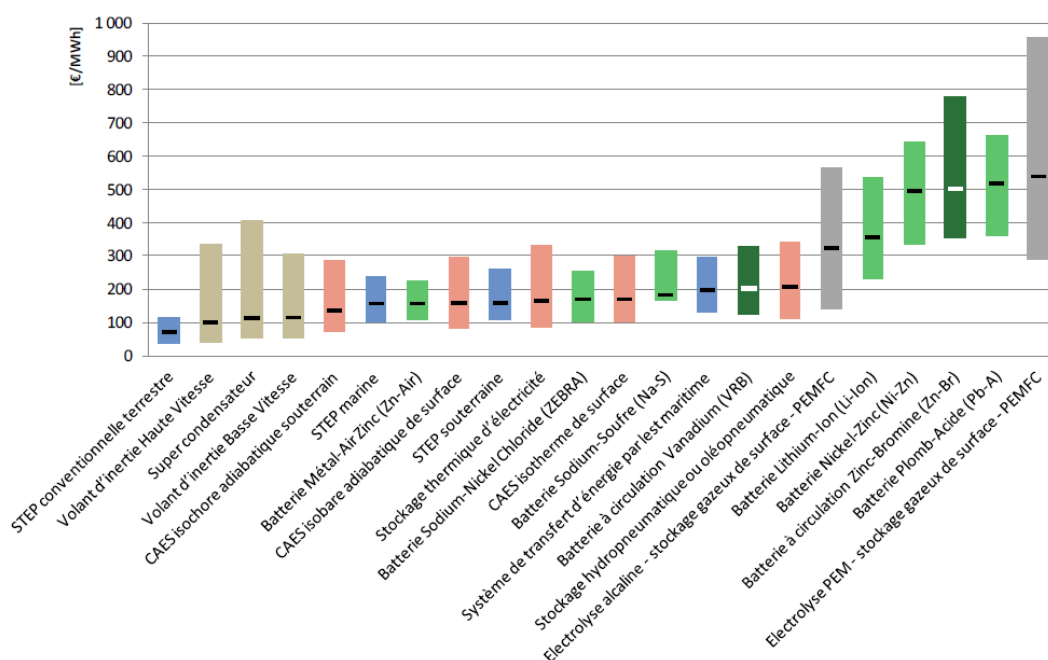


Figure 3 : Comparaison des LCOS (€/MWh délivré) pour les principales technologies de stockage d'électricité en 2013 (Source : ARTELY, ENEA, G2Elab, 2013)

3. STEP ET OPPORTUNITES DES MINES ET CARRIERES

3.1 STEP DE SURFACE

L'exploitation de mines et de carrières à ciel ouvert a laissé en surface des fosses qui peuvent être de grandes dimensions (plusieurs hectares de superficie par quelques dizaines à, plus rarement, centaines de mètres de profondeur). L'usage de ces fosses comme réservoir constitutif de STEP est une perspective envisageable (Figure 4). En France, aucun site de cette nature n'est en fonctionnement.

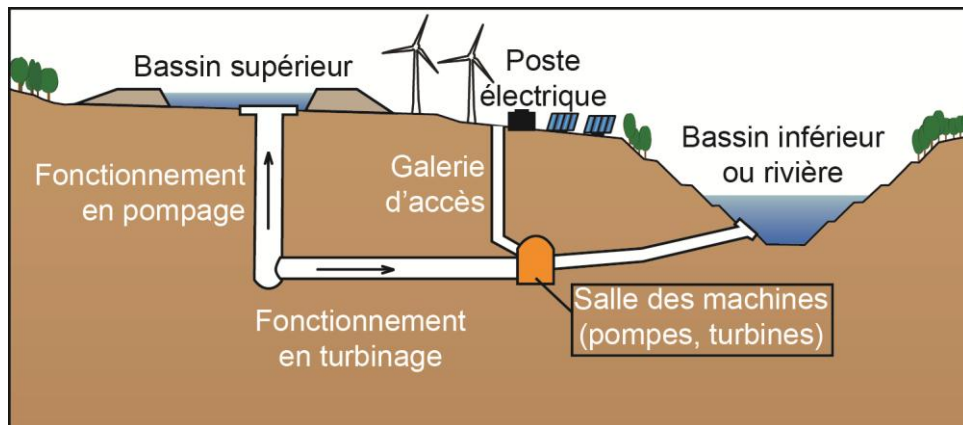


Figure 4 : Schéma d'un exemple d'utilisation d'une fosse à ciel ouvert en STEP

Un projet de micro STEP à Berrien (29) a été lancé en 2015 afin de convertir une carrière de kaolin. Elle occupe une surface de 116 hectares et est exploitée depuis 1967. Au rythme actuel de production la fin d'exploitation serait prévue en 2016/2017. Ce projet de conversion regroupe la société UNITE, la SAS EILAN, ARMINES, IMERYS et la Région Bretagne. Couplée à un parc photovoltaïque et éolien, la STEP aura une puissance de 1,5 MW pour une hauteur de chute assez modeste (40 m). Sa date de mise en service prévue fin 2019.

Le site a vocation à fournir la consommation électrique hors chauffage et eau chaude de 2230 foyers.

La France dispose d'un nombre conséquent de fosses à ciel ouvert. Leur conversion à des fins de stockage de l'énergie par pompage n'est probablement à envisager que dans la perspective de micro-STEP (de l'ordre du MW, les dénivelées étant moins importantes qu'en mines souterraines), c'est-à-dire, associées à une production locale d'énergie. Cette conversion est dépendante de nombreuses conditions (voir paragraphe « verrous »).

3.2 STEP SOUTERRAINES ET SEMI-SOUTERRAINES

Afin de palier l'absence de sites à topographie très marquée et de limiter les impacts sur le paysage, une solution envisagée consiste à utiliser au moins un réservoir souterrain. On obtient alors une STEP semi-souterraine. De nombreux projets de STEP souterraines ont été étudiés. L'augmentation sensible du coût par kilowatt des projets incluant la réalisation (creusement) du réservoir souterrain n'a pas permis de les mener jusqu'à l'étape de réalisation.

A ce jour, il n'existe aucune STEP souterraine mais les possibilités de réalisation pourraient s'élargir si les cavités souterraines creusées dans le cadre d'exploitations minières s'avéraient appropriées (Figure 5). De nombreux exemples de projets illustrent l'intérêt grandissant induit par l'opportunité que constituent les exploitations minières. Aux Etats-Unis, les exemples récents incluent le projet Summit proposé à Norton, Ohio (New Summit Hydro, LLC Project No. 14612-000, 2014), le projet Maysville proposé dans le Kentucky (carrières souterraines de calcaire) (Marla TONCRAY, 2012), et le projet Mount Hope dans le New Jersey, prévoit d'utiliser une ancienne mine de fer comme réservoir inférieur.

Certaines exploitations de carrières ont été menées en surface et en souterrain, laissant disponibles deux réservoirs. C'est la perspective que dessine le projet de la carrière de calcaire de Elmhurst, Chicago, Etats-Unis (bassin de surface et cavité souterraine à 150 m de profondeur, production annuelle estimée à 700 GWh) (Anthony CHARLTON, Thomas HAAG, 2012).

En Europe, deux projets nationaux de recherche (allemand⁴ et belge⁵) sont actuellement à l'étude afin d'évaluer la faisabilité de conversion de sites miniers souterrains en STEP.

Par ailleurs une étude allemande de 2003 (Reinhard MADLENER, Jan Martin SPECHT, 2003) a réalisé une analyse exploratoire de la conversion des mines de charbon abandonnées en STEP souterraine. Elle conclut que l'utilisation de sites miniers présente un réel avantage pour le développement des STEP pour plusieurs raisons :

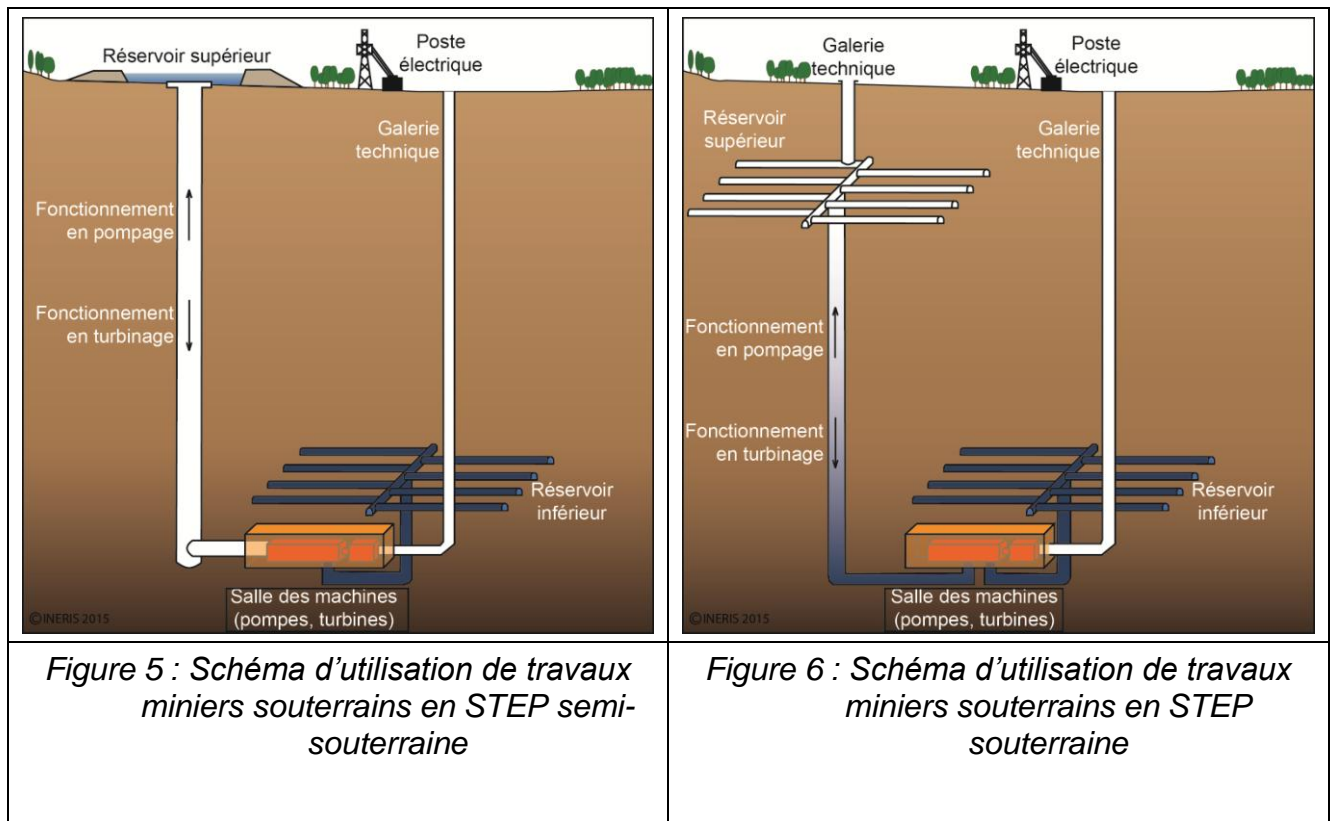
- l'emprise foncière des sites miniers est maîtrisée ;
- l'impact visuel, comparativement aux STEP traditionnelles, est fortement réduit ;
- l'utilisation des infrastructures minières souterraines permet de réduire les coûts d'investissement ; toutefois, cela nécessite d'être étudié au cas par cas afin d'évaluer la part en investissements requis ;
- la grande profondeur du réservoir inférieur est susceptible de générer une puissance importante ;
- dans des secteurs où l'activité minière diminue, l'usage des mines en STEP peut créer de l'emploi (NDLR : il convient de rester prudent car tant en nature qu'en nombre d'emplois générés, la comparaison est délicate).

Certains projets envisagent l'usage des mines pour la constitution de STEP intégralement souterraines, c'est-à-dire pour lesquelles les deux réservoirs (supérieurs et inférieurs) tireraient parti des infrastructures minières souterraines à des niveaux différents (Figure 6).

Enfin, l'un des défis des systèmes de stockage d'énergie n'est pas tant dans la délivrance d'électricité quand la production ne correspond pas à la demande mais dans le lissage des énergies fluctuantes (force du vent pour l'éolien, intensité lumineuse pour le photovoltaïque). Outre les progrès réalisés ces dernières années sur les turbines, certains projets très amont avancent l'argument de l'usage de plusieurs niveaux souterrains des mines afin de moduler les hauteurs de chute et produire une électricité « à la carte ». Il s'agit là d'une solution conceptuelle dans la mesure où l'on ne dispose pas encore, à ce jour, de retour d'expérience sur les STEP souterraines.

⁴ Underground pumped storage power stations - use of mining facilities for the storage of renewable energy (2011-2015); Client: Stiftung Mercator/RAG AG, MKUNLV (The Ministry for Climate Protection, Environment, Agriculture, Conservation and Consumer Protection of the State of North Rhine-Westphalia)

⁵ SMARTWATER (RW), hydrogeological study linked to UPSHE (Underground Pumped-Storage HydroElectricity) : Belgium project



Ordres de grandeur

En retenant que généralement 1 m^3 d'eau a une altitude de 100 m a une énergie potentielle de 0,272 kWh, un rendement de 0,8 porte l'énergie récupérable (cycle complet) à 0,22 kWh.

Si l'on considère une mine profonde (environ 1000 m de profondeur) et un volume de réservoir de $10\,000 \text{ m}^3$ (correspondant à un réservoir situé dans une ou plusieurs recette(s) de section 50 m^2 sur 100 m équivalent de longueur), l'énergie récupérable par stockage est donc de 22 000 kWh, soit 22 MWh pour un cycle.

L'un des objectifs de la loi sur la Transition Energétique est d'augmenter à 23 % la part des énergies renouvelables à horizon 2020 les portant à 36,25 Mtep⁶ en tonne équivalent pétrole (COMOP n°10, 2008), soit 350 TWh.

En conséquence, le développement des STEP ne peut constituer qu'une partie de la solution du stockage de l'énergie globale.

⁶ La tep (tonne d'équivalent pétrole) mesure l'énergie calorifique d'une tonne de pétrole « moyen », soit 42 gigajoules (GJ). Le mégawattheure (MWh) mesure l'énergie fournie par une source d'énergie d'une puissance d'un mégawatt fonctionnant pendant une heure, soit 3 600 mégajoules (3,6 GJ).

4. CADRE REGLEMENTAIRE

Les STEP utilisant les infrastructures de carrières ou de mines sont soumis principalement :

- au code de l'environnement : articles L. 214-1 à L.214-11 et aux articles R. 211-1 à R.214-117. En particulier, L'Etat retient un régime de **concession** pour les entreprises exploitant des ouvrages hydroélectriques dont la puissance excède 4500 kilowatts et un régime **d'autorisation** pour les autres exploitants d'ouvrages hydroélectriques de puissance de moins de 4500 kilowatts.
- en régime de concession : l'application de la loi du 16 octobre 1919 a donné lieu à la signature du décret n° 94-894 du 13/10/94⁷ qui aborde la déclaration d'utilité publique (DUP) et les modalités d'instruction des demandes de concession ;
- en régime d'autorisation : l'ouvrage est systématiquement soumis à étude ou notice d'impact dès le premier kilowatt produit ;
- au code l'énergie : le décret n°2000-877 du 7 septembre 2000⁸ précise que toute installation de production d'électricité utilisant l'un des types d'énergie, (listée dans le décret), est réputée autorisée dès lors que sa puissance installée est inférieure ou égale au seuil fixé pour ce type d'énergie. Il s'agit notamment des installations utilisant l'énergie des nappes aquifères ou des roches souterraines pour une puissance de 12 mégawatts. Dans le cas où des STEP souterraines seraient en projet, il faudrait pour l'autorisation ou la déclaration réaliser un dossier pour obtenir l'autorisation d'exploitation ;
- en cas d'utilisation de carrières, au titre des ICPE, l'exploitation d'une carrière est couverte par la rubrique n°2510 (régime déclaratif ou autorisation selon le type de granulats extraits) ;
- en cas d'usage d'infrastructures minières, la codification des lois (partie législative) dans un nouveau code minier a été réalisée. Pour la partie réglementaire, le code originel reste en vigueur. L'article L221-2 du nouveau minier stipule qu'il faut pour pouvoir exploiter être titulaire d'une **concession de stockage souterrain**. Il faut donc obtenir une autorisation d'exploiter.

5. VEROUS, RISQUES ET IMPACTS

Les coûts et la rentabilité de l'installation de STEP en environnement de carrière ou de mine constituent les principaux verrous.

Les mines et carrières n'ont pas été conçues pour une conversion ultérieure en STEP. Or une telle installation nécessite des aménagements et la mise en place de turbines/pompes dans des environnements **exigus**. Des développements technologiques sur ces installations sont donc requis.

⁷ Décret n°94-894 du 13 octobre 1994 relatif à la concession et à la déclaration d'utilité publique des ouvrages utilisant l'énergie hydraulique

⁸ Décret n° 2000-877 du 07/09/00 relatif à l'autorisation d'exploiter les installations de production d'électricité

L'utilisation de réservoirs miniers pour un usage en STEP suppose une gestion précise des flux d'eau. Par exemple, un réservoir inférieur vide qui subirait une arrivée massive d'eau par infiltration depuis l'encaissant générerait une perte de production lors du prochain usage de la STEP en mode turbine. Des développements pour la caractérisation de la **perméabilité des réservoirs** (et des puits) sont requis ainsi que l'identification de solutions.

Réciproquement, la problématique de la qualité des eaux (eau de process, aquifères du recouvrement, eau de mine...) constitue probablement l'enjeu principal en terme d'impact sur l'environnement mais également sur les dispositifs (canalisations, turbines et pompes). En effet, le retour d'expérience d'ennoyage des mines arrêtées indique que la composition chimique des eaux en contact avec le massif rocheux est modifiée après l'ennoyage et le retour à l'équilibre géochimique peut nécessiter des temps parfois longs pouvant atteindre plusieurs décennies.

Par ailleurs, la modification des conditions d'ennoyage, notamment de façon **dynamique et cyclique, peut avoir un impact sur l'état de contraintes dans le massif et les caractéristiques géomécaniques des terrains** qui contiennent la STEP. Ces effets résultent d'une part des variations de pression interstitielles et d'autre part de la dégradation des propriétés mécaniques liée à la saturation et à l'altération de certains minéraux (argiles, gypse, etc.). Ces effets doivent être évalués selon le site et le projet. En particulier, s'agissant d'anciennes exploitations souterraines, l'éventuel **impact d'un fort marnage sur la stabilité des terrains** doit être analysé.

Le déplacement de grandes masses d'eau, de manière dynamique, implique également le déplacement de grandes masses d'air provenant tantôt de l'atmosphère interne de la mine, tantôt de l'atmosphère externe. Qu'il s'agisse de la gestion de ces masses en volume et effet dynamique (**effets de souffle...**) ou en nature (certaines exploitations souterraines s'accompagnent de **l'émission de gaz** spécifiques comme le grisou), ces aspects et les solutions associées doivent être abordés.

La problématique du **raccord au réseau** est enfin un élément dimensionnant fondamental pour le choix d'un site : ces conditions définissent en particulier le mode d'usage (type de cycle) à prévoir pour une STEP. L'accroissement des sites de micro production d'énergie et leur stockage permet d'envisager le développement du concept de **micro-STEP**.

6. BESOINS EN R&D

Plusieurs pistes de recherche et développement peuvent être identifiées au vu de l'état actuel de notre connaissance :

1. Développement des techniques d'auscultation : auscultation fine des ouvrages en termes de corrosion de casing/tubing qui impactent l'étanchéité du stockage. La localisation précise des défauts et leur incidence sur l'étanchéité restent des questions ouvertes exigeant des travaux de R&D complémentaires. Ces travaux seront de grand intérêt dans la mesure où ils sont bénéfiques également à d'autres types de stockages souterrains mais aussi dans d'autres domaines tels que la géothermie, l'exploitation d'hydrocarbures, etc.

2. Evaluation de l'impact d'une STEP souterraine sur la qualité des eaux souterraines à partir d'une modélisation hydrodynamique-transport géochimique ;
3. Etude de l'impact dynamique et hydraulique de la STEP souterraine sur le comportement et les propriétés mécaniques des terrains (influence de la pression de pores, effet de fatigue cyclique, altération des propriétés mécaniques (saturation, retrait-gonflement des argiles et du gypse...)) ;
4. Etude comparative de la STEP par rapport à d'autres procédés utilisés dans le contexte de la transition énergétique (en s'appuyant sur des techniques telles que l'Analyse du Cycle de Vie (ACV)) ;
5. Développement des techniques de surveillance de fuites et de l'état du stockage, dans le temps, dans le contexte spécifique des STEP (surveillance hydraulique, géochimique et mécanique) ;
6. Etudes des facteurs socio-économiques, technologiques, réglementaires...

7. CONCLUSION

Les STEP conventionnelles (en surface du sol) constituent la technologie la plus employée jusqu'à présent au monde pour le stockage de l'énergie. Elles requièrent des conditions de site spécifiques, assez rares, et peuvent avoir des impacts forts en surface.

Le recours au stockage souterrain (STEP souterraines ou semi-souterraines) est étudié dans plusieurs pays dans le contexte des énergies renouvelables intermittentes. Le coût de réalisation du réservoir inférieur a pour l'heure rendu les projets non viables économiquement.

A ce titre, l'utilisation des infrastructures liées à l'exploitation des mines et des carrières, tant en surface qu'en souterrain, peut constituer une perspective intéressante.

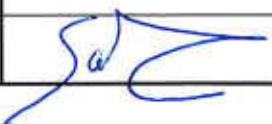


La grande profondeur de certains réservoirs miniers permet d'envisager des systèmes comparables en puissance aux STEP conventionnelles (~100 MW, voire 1 GW pour certains projets).

Le développement des sites de production d'énergies renouvelables intermittentes et fluctuantes suggère également le développement de micro STEP (~1 MW).

Si un certain nombre de projets sont en cours d'étude de faisabilité dans le monde (en Allemagne et aux Etats Unis en particulier), il n'existe pas à l'heure actuelle de stockage souterrain de l'eau pour le besoin énergétique.

Le nouveau paysage que constitue le déploiement massif des sites de production d'énergies renouvelables et, en conséquence, la nécessité de développer des systèmes de stockage de l'énergie se conjugue à la diminution de certaines activités minières.

C'est pourquoi des travaux de recherche et développement sur la maîtrise des risques et la surveillance du stockage de l'eau sont indispensables et doivent accompagner le développement de cette filière.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Romuald SALMON	Philippe GOMBERT	Mehdi GHOREYCHI
Qualité	Ingénieur à l'Unité Risques Géotechniques liés à l'Exploitation du Sous-sol	Ingénieur à l'Unité Eaux Souterraines et Emissions de Gaz	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa			

Références

« Le groupe EDF dans la transition énergétique ». Dossier de Presse du 18 avril 2013. https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/espaces-dedies/espace-medias/dp/dp_edf_groupe_transition_energetique.pdf

Xavier URSAT, Henri JACQUET-FRANCILLON, Isabelle RAFAÏ, « Expérience d'EDF dans l'exploitation des STEP ». SHF : «Pumped storage Powerplants», Lyon, 23-24 novembre 2011

« Étude sur le potentiel du stockage d'énergies », étude réalisée par ARTELYS, ENEA et le G2Elab pour l'ADEME, l'ATEE et la DGCIS. Octobre 2013.

ORDER ISSUING PRELIMINARY PERMIT AND GRANTING PRIORITY TO FILE LICENSE APPLICATION. New Summit Hydro, LLC Project No. 14612-000. 16 octobre 2014.

Marla TONCRAY, « Mason County considered for hydropower project », Ledger Independent. 4 Mai 2012. http://www.maysville-online.com/news/mason-county-considered-for-hydropower-project/article_df00a8b8-be64-5323-901e-f1a2d4b7a142.html

Anthony CHARLTON, Thomas HAAG, « Pumped Storage: Investigating Development of the Elmhurst Quarry Project». In hydroworld.com. 12 Janvier 2012. <http://www.hydroworld.com/articles/hr/print/volume-31/issue-08/articles/pumped-storage-investigating-development-of-the-elmhurst-quarry-project.html>

Reinhard MADLENER, Jan Martin SPECHT, « An Exploratory Economic Analysis of Underground Pumped-Storage Hydro Power Plants in Abandoned Coal Mines». FCN Working Paper No. 2/2013. February 2013 Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN). School of Business and Economics / E.ON ERC.

Comité Opérationnel (COMOP) n°10. Grenelle de l'Environnement. « Plan de développement des énergies renouvelables à haute qualité environnementale. 2008 – 2012 – 2020). ». 26 décembre 2008.