

Potentiel de valorisation de sites miniers et carriers en step en France et en Belgique

Philippe Gombert, Angelique Poulain, Pascal Goderniaux, Philippe Orban, Estanislao Pujades, Alain Dassargues

▶ **To cite this version:**

Philippe Gombert, Angelique Poulain, Pascal Goderniaux, Philippe Orban, Estanislao Pujades, et al.. Potentiel de valorisation de sites miniers et carriers en step en France et en Belgique. La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 2020, 4, pp.33-42. 10.1051/lhb/2020035 . ineris-03318330

HAL Id: ineris-03318330
https://ineris.hal.science/ineris-03318330

Submitted on 9 Aug 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La Houille Blanche 2020, 4, 33–42
© SHF, 2020
https://doi.org/10.1051/lhb/2020035

Disponible en ligne :
www.shf-lhb.org

ARTICLE DE RECHERCHE / RESEARCH ARTICLE

Potentiel de valorisation de sites miniers et carriers en step en France et en Belgique

Philippe Gombert[1,*], Angélique Poulain[2], Pascal Goderniaux[3], Philippe Orban[4], Estanislao Pujades[5] et Alain Dassargues[4]

[1] Ineris, Parc Technologique Alata, 60550 Verneuil-en-Halatte, France
[2] Université d'Avignon, 84000 Avignon, France
[3] Université de Mons, Geology and Applied Geology, 7000 Mons, Belgique
[4] Hydrogéologie & Géologie de l'Environnement, Université de Liège, 4000 Liège, Belgique
[5] Department of Computational Hydrosystems, UFZ– Helmholtz Centre for Environmental Research, Permoserstr. 15, 04318 Leipzig, Germany

Reçu le 29 avril 2020 / Accepté le 10 juillet 2020

Résumé – Les Stations de Transfert d'Energie par Pompage (STEP) représentent plus de 97 % des stockages d'énergie électrique dans le monde et totalisent environ 170 GW de puissance installée. La France et la Belgique disposent actuellement de 9 STEP d'une puissance totale de 6,3 GW mais il n'existe plus de nouveaux sites acceptables pour des STEP conventionnelles car ces dernières nécessitent le creusement de deux bassins en surface et ne peuvent être installées que dans des zones au relief marqué. Suite à la demande de stockage d'énergie engendrée par le développement des énergies renouvelables intermittentes, on aborde la possibilité de créer de nouvelles STEP non conventionnelles en utilisant les bassins existants dans des mines ou des carrières abandonnées ou en voie d'abandon. Il peut s'agir de bassins en surface ou en souterrain, ces derniers donnant accès à la technologie des STEP souterraines ou semi-souterraine (STEP-3S). On décrit ici le potentiel de ces nouvelles technologies de STEP ainsi que les risques et impacts qu'elles sont susceptibles d'engendrer : interactions hydromécaniques et hydrochimiques avec les aquifères adjacents, mouvements de terrain, émissions de gaz. Il s'agit de risques déjà identifiés et maîtrisés dans le cadre d'autres activités du sous-sol.

Mots clés : Station de transfert d'énergie par pompage / stockage d'énergie / risques / mines / carrières

Abstract – Potential for the development of mining and quarrying sites in pumping hydro-storage in France and Belgium. Pumped Hydro-Energy Storage (PHES) account for more than 97% of the world's electrical energy storage and cumulate approximately 170 GW of installed capacity. France and Belgium currently have 9 PHES with a total capacity of 6.3 GW, but there are no longer any new sites acceptable for conventional PHES as they require the excavation of two basins on the surface, and can only be installed in areas with a marked relief. Following the foreseeable demand for energy storage generated by the development of intermittent renewable energies, it is proposed to study the possibility of creating new non-conventional PHES using existing basins in abandoned mines or quarries. These may be surface or underground basins, the latter providing access to subterranean or semi-subterranean PHES technology (3S-PHES). This paper describes the potential of these new PHES technologies and the risks and impacts they are likely to generate. These risks concern first of all adjacent aquifers: hydromechanical disturbances (propagation of water level variations in the aquifer) and hydrochemical interactions (precipitation of carbonates and iron oxides). They also concern the ground surface with the possibility of ground movements or surface gas emissions. However, these are risks that have already been identified and controlled in the context of other underground activities.

Keywords: Pumping Hydro-Energy Storage / energy storage / risks / mines / quarries

*Correspondance : philippe.gombert@Ineris.fr

1 Introduction

Apparu en Suisse en 1890, le concept de Station de Transfert d'Energie par Pompage (STEP) vise (i) à stocker de l'énergie potentielle en période de surproduction électrique ou de basse consommation, en pompant de l'eau depuis un réservoir inférieur vers un réservoir supérieur, puis (ii) à produire de l'électricité par turbinage en période de forte demande ou pour des besoins de régulation du réseau électrique. À ce jour, il existe plus de 40 STEP dans le monde qui totalisent une puissance installée de 169 GW et représentent environ 97 % des capacités de stockage d'électricité (IRENA, 2017). Dans l'Union Européenne, l'énergie électrique produite par turbinage des STEP correspond actuellement à 323 TWh/an pour un potentiel estimé à plus de 1000 TWh/an. Compte-tenu du développement attendu des énergies renouvelables, dont une partie est intermittente (éolien, solaire), les STEP seraient un excellent moyen pour intégrer cette production dans les réseaux électriques en tamponnant leur productivité aléatoire (Pérez-Díaz *et al.*, 2014).

Sur le plan technique, l'énergie potentielle renfermée dans 1 m^3 d'eau chutant de 100 m est de 0,273 kWh, soit environ 1 MJ. En considérant le même dénivelé mais pour un volume d'un million de m^3 d'eau et un rendement de 90 %, on obtient une capacité de stockage d'énergie de 245 MWh. Une telle capacité permettrait, lors de chaque cycle de pompage-turbinage, de stocker la production maximale d'électricité d'un champ de 10 éoliennes terrestres pendant 12 h, ou de fournir l'énergie excédentaire demandée lors des pointes de consommation d'électricité journalières qui surviennent pendant quelques heures. La gestion de ces pointes nécessite la plupart du temps le démarrage de moyens de production rapide et massive d'électricité comme les centrales à fioul, les turbines à gaz, les centrales hydrauliques ou les STEP (Higounenc et Sécher, 2016).

Cependant, plusieurs éléments de contexte n'encouragent pas le développement des STEP dans l'Union Européenne (SIA Partners, 2018) : faibles écarts du prix de l'électricité entre heures pleines et creuses, faible prix du gaz, risques de conflit d'usage, éloignement des réseaux de transport d'électricité ou des sites de consommation, législation peu adaptée sur le plan fiscal et environnemental, acceptabilité socioenvironnementale. De plus l'aménagement de telles STEP engendre un coût conséquent concernant la réalisation des bassins de grande envergure et la nécessité d'un dénivelé suffisant pour assurer une bonne production.

Néanmoins, en France, le récent projet de Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE) a fixé pour objectif une augmentation des capacités de production des STEP de 1,5 à 2 GW d'ici 2035 (MTES, 2019). En outre, la Loi de transition énergétique pour la croissance verte, promulguée en 2015, a décidé de porter la part des énergies renouvelables à 23 % de la consommation d'énergie en 2020, soit environ 352 TWh par an, ce qui nécessitera une importante capacité de stockage (Ineris, 2016).

La Belgique ne possède pas de grands dénivelés comme dans les pays montagneux, néanmoins un potentiel de l'ordre de 4,9 GWh a été identifié en Wallonie concernant les STEP non conventionnelles impliquant d'anciens sites carriers ou miniers (Archambeau *et al.*, 2016 ; Cluster TWEED, 2018). Ce potentiel constitue une borne maximum calculée sans tenir compte de l'inaccessibilité éventuelle des sites. Il montre cependant le potentiel de cette technologie pour les services complémentaires (« ancillary services ») tels que les activités de régulation du réseau électrique.

2 Présentation de la technologie

2.1 STEP conventionnelles

Une STEP conventionnelle est constituée de deux réservoirs d'eau situés en surface à des altitudes différentes (Salmon, 2015). Il s'agit généralement de bassins construits mais le réservoir inférieur peut être la mer, un cours d'eau, un lac ou un bassin déjà existant (ancienne carrière ou mine ennoyée).

La France dispose de 6 STEP conventionnelles construites dans les années 1970–1980 avec une puissance de 4,9 GW en turbinage et exploitées sur des cycles journaliers à hebdomadaires (Ursat *et al.*, 2011). Bien que le potentiel d'implantation soit estimé à 6 GW supplémentaires (Barbaux, 2017) et que la Programmation Pluriannuelle des Investissements ait initialement prévu l'installation de 0,5 GW supplémentaires de STEP pour 2010 et de 2 GW pour 2015 (Billout *et al.*, 2007), rien n'a encore été réalisé mis à part la modernisation de certaines STEP : il existe en effet des obstacles limitant les possibilités de développement des nouveaux ouvrages, qu'ils soient de nature technico-économiques (les meilleurs sites ont déjà été équipés, l'ouverture des concessions hydroélectriques à la concurrence freine l'énergéticien historique) ou socio-environnementaux (acceptabilité sociétale et impact sur l'environnement).

En Belgique, il existe actuellement deux STEP. La plus puissante, la station hydroélectrique de Coo-Trois-Ponts (Gaumier et Seydel, 1977) en service depuis 1979 peut atteindre 1,2 GW pendant 5 h (6 GWh). Elle permet de réguler et soutenir la production électrique belge. Cette STEP est par ailleurs en phase d'extension (augmentation des volumes stockés) afin de pouvoir augmenter l'énergie stockée de 425 MWh. La seconde, en service depuis 1981 est localisée sur le site de la Plate-Taille situé sur les Lacs de l'Eau d'Heure. Elle ne peut atteindre qu'une puissance de 140 MW car le dénivelé exploité est ici relativement faible.

Dans ces deux pays, l'état du marché de l'énergie serait donc très favorable à la multiplication des STEP mais les conditions topographiques, d'aménagement du territoire ou d'acceptabilité socio-environnementale laissent peu de possibilités pour de nouvelles STEP conventionnelles.

2.2 STEP non conventionnelles

L'énergie produite étant directement proportionnelle à la hauteur de chute et au volume d'eau stocké, la création d'une STEP de puissance importante nécessite un fort dénivelé (plusieurs centaines de mètres) ou un important potentiel de stockage (plusieurs millions de m^3 d'eau pour chaque réservoir). Ce sont principalement le coût de construction et l'impact socio-environnemental de ces grands réservoirs qui restreignent les possibilités d'implantations de nouvelles STEP. Cependant, il est possible d'économiser la construction du

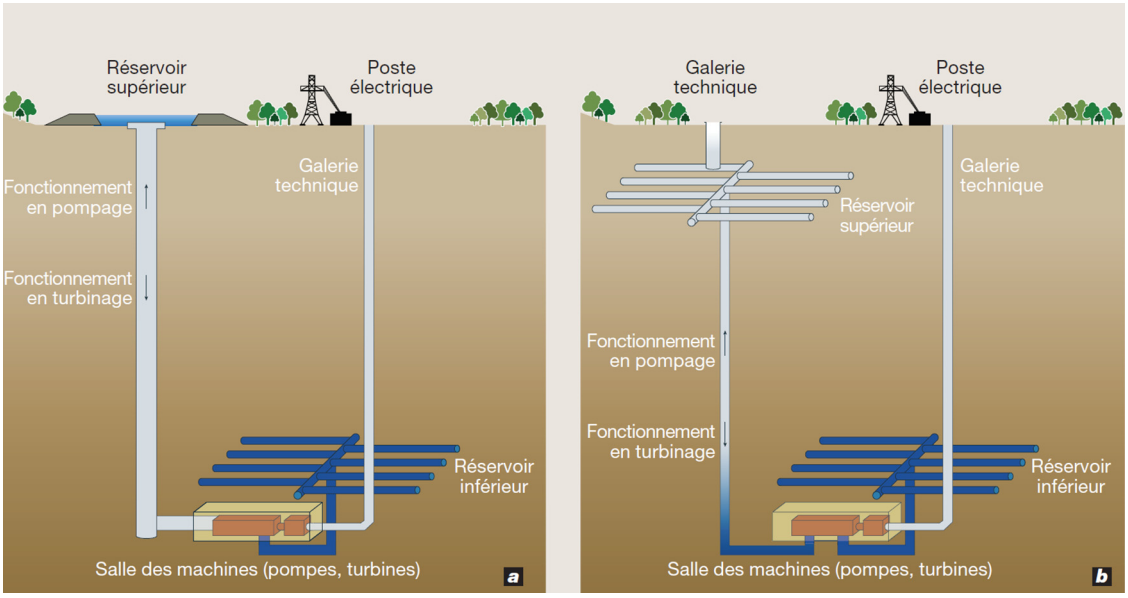


Fig. 1. Schéma simplifié de l'utilisation d'anciennes mines comme STEP semi-souterraine (a) et souterraine (b) (Salmon, 2015).

réservoir inférieur (Pérez-Díaz *et al.*, 2014) dans le cas des STEP marines (mer), des STEP de carrières[1] (ancienne carrière ou mine de surface ennoyée) ou des STEP semi-souterraines (ancienne mine ou carrière souterraine ennoyée). Il existe également la possibilité de créer des STEP entièrement souterraines où les deux réservoirs seraient situés à deux niveaux différents du sous-sol (Salmon, 2015). Une STEP non conventionnelle est donc constituée de deux réservoirs d'eau situés à des altitudes différentes mais dont l'un, au moins, existe déjà : si l'un de ces réservoirs est souterrain, on peut en outre parler de STEP-3S, c'est-à-dire de « STEP Souterraine ou Semi-Souterraine » (Fig. 1).

Il est intéressant de réaliser un calcul prospectif de ce que pourrait apporter cette technologie de stockage d'énergie à l'échelle d'un pays. Cela a été réalisé par l'Ineris (2016) pour la France dans le cas de STEP-3S, sur la base d'une hauteur de chute de 500 m et d'un volume de réservoirs de 100 000 m^3 chacun. Considérant qu'il existe déjà une centaine de stockages souterrains en France (principalement d'hydrocarbures) et que leur remplacement par le même nombre de STEP-3S serait sociétalement acceptable, cela permettrait de stocker environ 4 TWh par an sur la base d'un cycle de pompage-turbinage par jour ou 8 TWh sur la base de deux cycles journaliers. Cela ne correspond toutefois qu'à 1 ou 2 % de la production d'énergies renouvelables attendue dans un futur proche. Les STEP-3S ne sont donc pas des solutions de stockage massif de l'énergie à l'échelle nationale mais elles peuvent toutefois présenter un intérêt local ou régional pour réguler la production électrique d'un champ d'éolienne ou de panneaux photovoltaïques. C'est ainsi que Scott (1976) prévoit des STEP-3S de 2000 MW basées sur les dénivelés de l'ordre de 500 m. Il existe même des projets de STEP-3S de plus modeste puissance, destinés à lisser les pics horaires de demande électrique, en creusant des puits rejoignant l'aquifère près de certaine retenues d'eau ou STEP de surface (House, 2017 ; Beulher *et al.*, 2017).

2.3 Analyse de risques et d'impact

Que l'on envisage la construction de STEP ou de STEP-3S, une composante fondamentale de la faisabilité consiste à analyser les risques (incidences sur la santé ou la sécurité des personnes) et les impacts (atteintes aux biens, aux activités humaines ou à l'environnement). Ils sont classiquement subdivisés en risques ou impacts chroniques, c'est-à-dire résultant des activités courantes, ou accidentels, liés à un événement imprévu. Ils font le plus souvent intervenir un « mécanisme initiateur » (cause), lequel est susceptible de déclencher un « évènement redouté » qui peut alors être à l'origine d'un « phénomène dangereux ou impactant » (conséquence) selon qu'il atteint des personnes ou des biens ou l'environnement.

3 Step de surface en mines ou carrières

3.1 Principe et exemples

L'utilisation de sites carriers ou miniers préexistants présente plusieurs avantages : (i) la diminution des coûts de construction des bassins de stockage, (ii) la présence d'une réserve d'eau directement utilisable puisque la plupart des sites sont situés sous le niveau d'eau naturel de la nappe souterraine, (iii) l'existence d'un grand nombre de sites potentiellement exploitables. Une représentation simplifiée du concept est présentée à la figure 3a.

[1] Rappelons que le concept de mine et de carrière diffère selon les pays. En France, une exploitation – qu'elle soit superficielle ou souterraine – est dénommée mine si elle concerne une substance stratégique appelée « minerai », sinon il s'agit d'une carrière. Dans la plupart des autres pays, une mine est une exploitation strictement souterraine et une carrière une exploitation de surface, quelle que soit la substance exploitée.

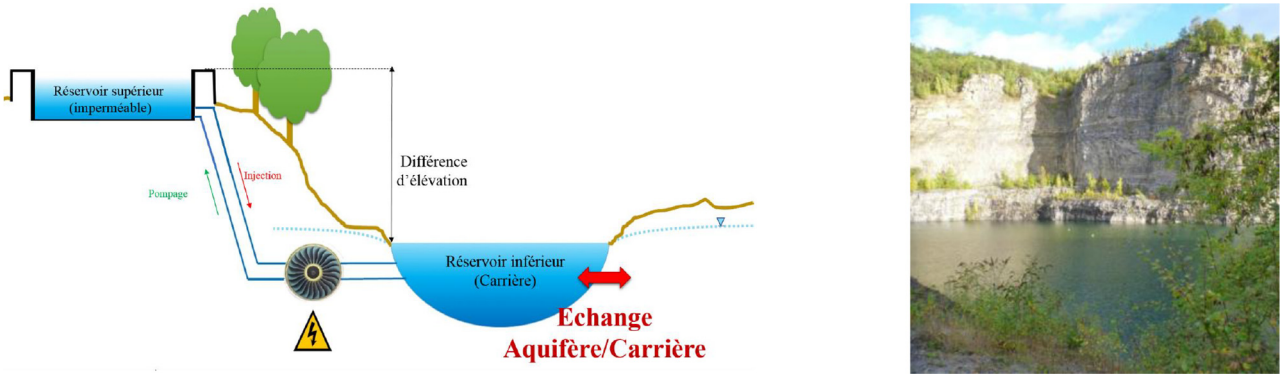


Fig. 2. Représentation simplifiée du concept de STEP en carrière (à g.) et exemple de la carrière de Maizeret en Belgique (à d.) (Poulain, 2018).

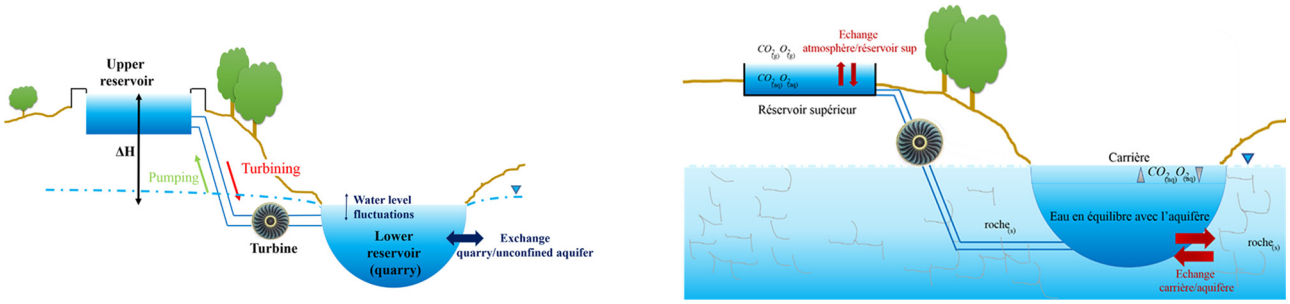


Fig. 3. Représentation simplifiée des interactions hydrodynamiques (à g.) et hydrochimiques (à d.) entre une STEP de carrière et l'aquifère adjacent (Poulain, 2018).

En France, un projet de micro-STEP en carrière a été initié en 2015 à Berrien (Finistère). Il s'agit de convertir une carrière de kaolin en fin d'exploitation, qui dispose de plusieurs bassins étagés sur une surface de 116 hectares. 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). Le site a vocation à fournir 6 GWh par an, sur la base d'un turbinage quotidien de 11 h, soit la consommation électrique (hors chauffage et eau chaude) de 2230 foyers (ADEME, 2014).

En Belgique, le projet SMARTWATER (Cluster TWEED, 2018) financé par la Wallonie entre 2014 et 2018, avait pour objectif de fournir des réponses quant à l'implémentation de STEP utilisant des sites miniers ou carriers préexistants. Ce projet a fait intervenir des collaborations pluridisciplinaires permettant d'aboutir à un ensemble de critères et d'outils socio-juridiques, économiques, géomécaniques, hydrogéologiques, hydrauliques, hydromécaniques et électromécaniques pour l'aide à la décision dans le but de favoriser les STEP en Wallonie. Dans le contexte carrier et topographique wallon, la puissance disponible moyenne par site serait de l'ordre de 10 à 20 MW, ce qui correspond à la puissance de production d'un parc éolien classique. La figure 3b montre un exemple de carrière pouvant potentiellement être reconvertie en STEP.

3.2 Potentiel

Le potentiel des anciens sites miniers de surface ou carriers pour l'accueil de STEP, dépend de trois facteurs (Fig. 2) : l'existence de bassins ennoyés ou ennoyables, leur localisation en pied de reliefs et leur usage actuel ou programmé (réserve naturelle, plan d'eau de loisir, etc.).

En France, un recensement réalisé en 2012 indique 4710 carrières en activité et 101 616 carrières abandonnées (http://www.brgm.fr/projet/observatoire-carrieres-materiaux-france). Elles concernent principalement la production de granulats, de roches ornementales et de construction et de quelques minéraux industriels (talc, andalousite, silex, micas, feldspaths, argile, silice). Il existe également quelques mines de surface qui présentent des lacs miniers permanents. Sachant qu'à l'échelle de la France, il suffirait d'une trentaine de STEP de 60 MW pour atteindre les 1,5 à 2 GW prévus par la PPE (MTES, 2019), cela représente moins de 0,1 % des carrières abandonnées.

En Belgique, un inventaire des sites miniers et carriers de Wallonie, a été réalisé afin d'estimer le potentiel de stockage disponible. En 2001, il existait environ 964 carrières inscrites en zone d'extraction aux plans de secteur (Caudron *et al.*, 1995 ; Poty et Chevalier, 2004) et plus de 5000 carrières désaffectées sur le territoire (Remacle, 2009). Ces sites exploitent ou exploitaient différents types de roches, dont les calcaires, grès et sables sont les plus représentés. Toutes les carrières ne sont bien sûr pas utilisables dans le cadre d'installation de STEP, notamment en raison de contraintes liées à la taille, au relief ou à des contraintes géotechniques. En considérant uniquement les carrières dont la taille est supérieure à 1 ha, dont le dénivelé exploitable est supérieur à 20 m et implantées dans des roches non meubles, l'inventaire des carrières wallonnes fournit un potentiel approximatif de

823 MWh en considérant uniquement les carrières non actives, et de 4896 MWh en prenant en compte les carrières actuellement encore en cours d'exploitation (Archambeau *et al.*, 2016 ; Cluster TWEED, 2018 ; Poulain, 2018).

3.3 Impacts

Le développement de systèmes de pompage-turbinage en carrière doit être examiné en fonction des particularités environnementales propres à chaque site. En dehors des contraintes liées aux activités d'exploitation encore présentes, à l'intérêt biologique du site, à la présence de captages ou d'activités de loisirs, les carrières ne peuvent pas être considérées comme des milieux étanches. Elles sont en fait en interaction étroite avec le milieu rocheux adjacent (Fig. 3). L'utilisation des anciennes carrières comme bassins de stockage soulève donc de nombreuses questions des points de vue hydrogéologique et hydrogéochimique (Poulain, 2018 ; Pujades *et al.*, 2018b). En conséquence, le pompage ou l'injection de grands volumes d'eau dans de courts intervalles de temps induira inévitablement un impact sur la nappe aquifère environnante. Inversement, ces échanges d'eau peuvent également avoir un impact sur l'amplitude des fluctuations du niveau de l'eau dans le réservoir inférieur, donc sur le rendement de la STEP.

3.3.1 Impacts quantitatifs

D'un point de vue hydrodynamique, les fluctuations du niveau d'eau dans une carrière induisent un impact alentour, dû à la propagation des fluctuations piézométriques au sein de la roche réservoir. Cette propagation est fortement dépendante des propriétés hydrauliques du milieu et donc des contextes géologiques et hydrogéologiques dans lesquels sont implantées les carrières.

La quantification de cette distance de propagation est cruciale afin de prévenir les risques de conflits avec d'autres usages initialement présents à proximité, comme des captages d'eau potable. De plus, les oscillations à répétition du plan d'eau peuvent constituer un facteur d'instabilité des parois de la carrière, voire même provoquer des tassements ou ruptures locaux si des roches compactables ou altérées sont présentes aux alentours de la carrière.

La fréquence des cycles de pompage-turbinage a une influence prépondérante sur l'impact environnemental d'un tel système, ainsi que sur la production électrique. Plus la fréquence des cycles est basse, plus les interactions carrière-nappe d'eau souterraine augmentent, engendrant une diminution des fluctuations du niveau piézométrique dans la carrière, mais une augmentation de leur distance de propagation au sein de l'aquifère (Poulain *et al.*, 2018a, 2018b).

Avant la mise en place d'une STEP utilisant une carrière comme réservoir inférieur, il est donc indispensable d'étudier ces impacts. Poulain *et al.* (2018a) fournissent différents outils numériques permettant de les évaluer rapidement pour des cas relativement simples mais des modélisations plus spécifiques sont requises pour des cas plus complexes (Poulain, 2018). La présence d'hétérogénéités, telles que des zones très perméables ou des conduits karstiques, peut par exemple avoir un impact important sur la propagation des sollicitations dans le milieu en induisant une zone préférentielle de propagation (Poulain, 2018).

3.3.2 Impacts qualitatifs

La répétition de cycles de pompage-turbinage induit une aération de l'eau, et donc une modification des concentrations en gaz dissous. Cela peut provoquer l'évolution de la composition chimique de l'eau dans la carrière et dans l'aquifère alentour, modifiant les interactions chimiques eau-roche et provoquant des réactions d'oxydoréduction ou de dissolution-précipitation. Peu d'études ont été réalisées sur l'hydrochimie de l'eau des anciennes carrières ennoyées. La plupart de ces études sont liées à la présence de métaux lourds dans la zone d'extraction (Xuan *et al.*, 2013).

L'augmentation de la concentration en oxygène dissous est un paramètre critique en présence d'éléments sensibles aux réactions d'oxydoréduction tels que le fer et le manganèse. Dans les aquifères carbonatés, le CO_2 est l'un des principaux acteurs de la dissolution-précipitation des minéraux. Le brassage de l'eau dans le bassin supérieur peut conduire à son dégazage et à une diminution de sa concentration, facteur favorisant la précipitation des carbonates. Dans un aquifère carbonaté tel que la craie ou le calcaire, la quantité d'eau et de roche présente dans l'aquifère adjacent agit comme un système « tampon » et stabilise les équilibres chimiques de l'eau souterraine. La propagation du stress hydrochimique dans le milieu rocheux, induite par les cycles de pompage-turbinage, est ainsi limitée. Cependant, des phénomènes de précipitation peuvent être attendus au niveau du bassin supérieur. Les quantités précipitées peuvent être importantes, en particulier en début d'opération, et pourraient entraîner la nécessité de nettoyer périodiquement le bassin supérieur ainsi que les équipements (Poulain, 2018).

L'hydrochimie des eaux dépend de la nature lithologique de la roche réservoir ainsi que des espèces minérales présentes. Avant l'installation d'une STEP en carrière, il est donc important d'avoir une connaissance approfondie du contexte géologique et de l'évolution hydrochimique attendue, en tenant compte des processus susceptibles de se produire dans le réservoir inférieur, le réservoir supérieur et l'aquifère adjacent. Cette évaluation peut par exemple être réalisée à l'aide de modèles couplés écoulement-transport-hydrochimie. Elle est particulièrement importante pour évaluer l'impact potentiel sur les écosystèmes présents dans la carrière ou sur la production d'eau potable dans l'aquifère adjacent. Un système de monitoring piézométrique développé autour de la carrière permettrait également de contrôler l'évolution chimique des eaux dans l'aquifère, et de réagir en cas de changement hydrochimique non attendu.

4 Step souterraines ou semi-souterraines en mines ou carrières

4.1 Principe et exemples

Certains équipements hydroélectriques ont depuis longtemps été implantés sous terre, comme des usines hydroélectriques ou des conduites d'amenée d'eau ou de fuite. L'idée de concevoir des réservoirs souterrains est née aux États-Unis en 1917 où elle a donné lieu à un brevet (Fessenden, 1917). Toutefois, la première – et unique – réalisation ne date que de 2006 en Autriche (Madlener et Specht, 2013) : il s'agit du site de Nassfeld où le réservoir

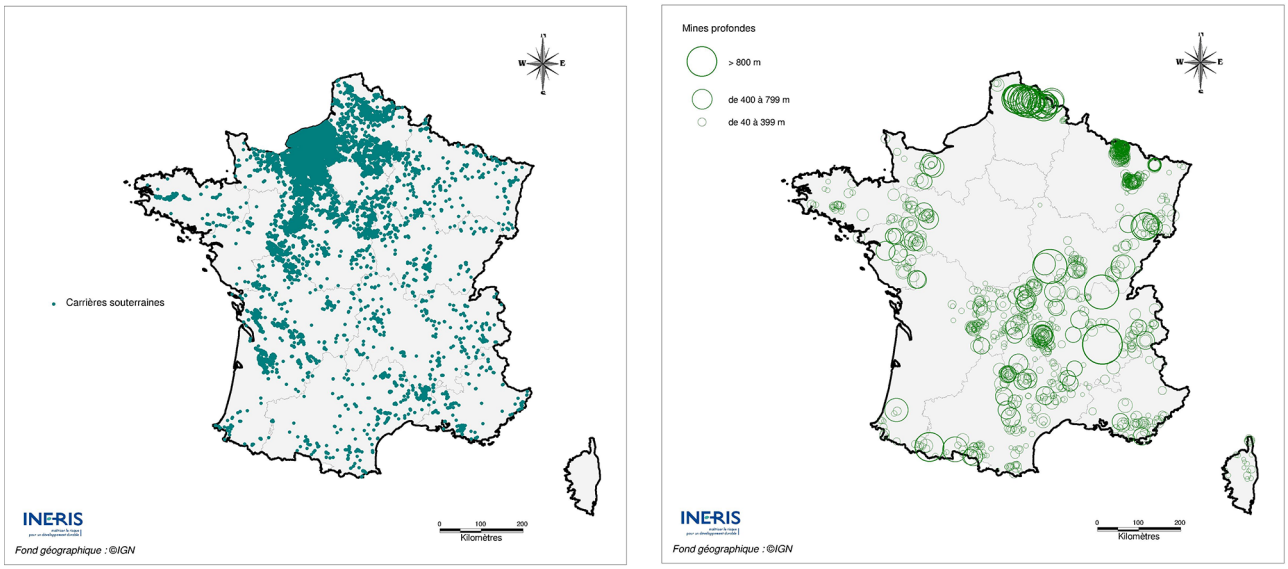


Fig. 4. Localisation des carrières (à g.) et des mines (à d.) souterraines connues en France (Ineris, 2016).

inférieur d'une STEP conventionnelle a été agrandi en creusant 160 000 m^3 de vides souterrains.

Les avantages liés à la conversion d'anciennes mines ou carrières souterraines en STEP-3S sont multiples : pas de creusement de vides de grandes dimensions, pas de prélèvement d'eau en surface pour remplir les réservoirs, occupation du sol réduite et impact environnemental faible à modéré en surface. Cependant, les sollicitations auxquelles devra être soumis le réservoir inférieur peuvent imposer le creusement de nouvelles cavités dédiées à cet usage (Menéndez *et al.*, 2017). C'est ce qui est prévu dans le projet de réutilisation de la mine de charbon en fin d'exploitation de Posper-Daniel à Bottrop, en Allemagne, profonde d'environ 1200 m (Madlener et Specht, 2013). L'état des galeries souterraines, la résistance des terrains et la présence de gaz de mine ne permettront pas la réutilisation des galeries d'exploitation du charbon et il faudra creuser une galerie circulaire de 15 km de longueur à 530 m de profondeur afin d'y stocker 575 000 m^3 d'eau (Niemann *et al.*, 2018). Cette STEP semi-souterraine sera capable de fournir 200 MW sur une durée de 3,75 h. La durée des travaux est estimée entre 7 et 10 ans et l'investissement nécessaire est de l'ordre de 600 M€. Il est intéressant de noter que plus de 80 % des riverains interrogés se sont déclarés favorables à ce projet, ce qui est un niveau d'acceptabilité sociétale assez rare.

La nécessité de creuser de nouveaux bassins en souterrain risque donc d'augmenter les coûts de construction et de maintenance du réservoir inférieur, mais la possibilité d'implanter ce dernier au droit du réservoir supérieur permet de diminuer la longueur du canal d'amenée ou du canal de fuite et donc de réduire en conséquence leurs coûts de construction (Pérez-Díaz *et al.*, 2014). Des études économiques des différentes options sont à particulariser pour chaque site (Madlener et Specht, 2013 ; Menéndez *et al.*, 2020).

Un autre concept, moins largement répandu est celui de STEP marine semi-souterraine. Il n'existe actuellement qu'une seule STEP marine conventionnelle dans le monde : construite au Japon en 1999, elle dispose d'un bassin de 0,56 Mm^3 situé à 136 m au-dessus de la mer, ce qui lui donne une puissance de 30 MW pendant environ 6 h (Pérez-Díaz *et al.*, 2014). Cependant, l'Estonie a un projet de STEP marine semi-souterraine à Muuga pour 2020 : il combinerait la mer comme réservoir supérieur et de vastes cavités anciennement creusées dans le granite sous le niveau de la mer comme réservoirs inférieurs (Estivo, 2010 ; Pérez-Díaz *et al.*, 2014). En turbinant 4,75 Mm^3 d'eau de mer en 12 h, la puissance annoncée serait de 500 MW pour une hauteur de chute de 500 m. Ce projet nécessitera cependant le creusement d'un canal d'amenée souterrain et de galeries souterraines supplémentaires pour atteindre le volume de stockage souhaité.

4.2 Potentiel

La France dispose actuellement de 9 stockages souterrains creusés par méthode minière et de 78 autres creusés par dissolution dans des couches salines. Elle renferme en outre (Fig. 4), plusieurs centaines de milliers de cavités souterraines qui sont pour la plupart abandonnées (Ineris, 2016).

Les cavités minées pourraient être réutilisées en réservoir souterrains de STEP lorsqu'elles seront abandonnées mais plusieurs problèmes limitent l'intérêt d'une telle opération : ces cavités ont un volume ($< 0{,}2$ Mm^3) et une profondeur (< 200 m) modestes et elles renferment des gaz de pétrole liquéfié (GPL) qu'il faudra tout d'abord éliminer. Les cavités salines semblent plus intéressantes car elles renferment essentiellement du gaz naturel sous pression et possèdent des caractéristiques plus imposantes : jusqu'à 1 Mm^3 de volume chacune, et entre 900 et 1500 m de profondeur. Mais elles sont creusées dans le sel qui, outre qu'il est moins résistant aux sollicitations mécaniques, est une roche très soluble à l'eau : cela nécessiterait d'utiliser de la saumure saturée qui est un liquide très corrosif, notamment pour les pompes et turbines. Quant aux cavités souterraines abandonnées, on ne connaît la localisation que d'environ 10 % d'entre elles, à savoir 6 000 sites miniers et 30 000 carrières (Fig. 4). Toutefois, leur profondeur, leurs dimensions et leur état de stabilité sont

souvent inconnus, ce qui nécessite un important travail d'inventaire avant de pouvoir juger de leur potentiel de reconversion en STEP-3S. Leurs caractéristiques principales sont les suivantes :

- les mines ont servi à extraire des minerais stratégiques (charbon, métaux, soufre, sel...) et sont de ce fait régies par le Code Minier ; elles ont été implantées dans les grandes régions de socle (Massif central, Massif Armoricain, Pyrénées, Alpes, Vosges...) et sont souvent profondes de plusieurs centaines de mètres ; cependant, leurs accès en surface ont généralement été rebouchés afin de réduire les risques résiduels en fin d'exploitation ; quelques-unes d'entre elles pourraient éventuellement être reconverties en STEP-3S mais à condition que leurs niveaux profonds soient encore accessibles et stables ;
- les carrières souterraines ont surtout servi à extraire des matériaux de construction et sont régies par le Code de l'Environnement ; elles ont généralement été creusée dans les grandes zones sédimentaires (Bassin Parisien, Bassin Aquitain, Provence, Ardennes...) ; elles sont moins profondes (quelques dizaines de mètres) et ont souvent été abandonnées sans précautions ; néanmoins, de par leur grand nombre, plusieurs d'entre elles devraient pouvoir être réutilisables en STEP semi-souterraines dans chaque département.

En Belgique, bien que le réservoir inférieur puisse être foré ou excavé, l'option envisagée en Wallonie consiste à utiliser les cavités existantes des anciennes exploitations souterraines. Cette option est séduisante car elle offrirait des perspectives intéressantes de développement économique après l'arrêt de l'exploitation minière et comme réhabilitation de sites industriels. Dans le cadre du projet Smartwater, un inventaire des cavités pouvant être utilisées comme réservoir souterrain d'une STEP-3S a été réalisé. Cet inventaire a permis d'identifier environ 300 sites en Wallonie, regroupés en trois catégories : les concessions minières de houille, les mines métalliques et les carrières d'ardoises ou de marbres noirs (Archambeau *et al.*, 2016). Sur la plupart de ces sites, les activités d'extraction sont terminées depuis plus de 30 ans. Un double défi existe donc, d'une part, pour retrouver et exploiter les informations sur ces exploitations (afin de redéfinir la géométrie des cavités existantes en fin d'exploitation) et, d'autre part, pour déterminer l'état actuel des cavités qui se trouvent pour la plupart sous eau après l'arrêt des pompages d'exhaure. Un travail au cas par cas doit donc être envisagé pour préciser la géométrie de chaque exploitation souterraine. Dans le cas du projet Smartwater, deux cas types ont été définis et étudiés plus en détail, l'un représentatif d'une ancienne mine de charbon et l'autre d'une carrière d'ardoises (Bodeux *et al.*, 2017).

4.3 Risques et impacts

On s'intéresse ici aux risques et impacts liés à la partie souterraine d'une STEP-3S, à savoir les cavités et leurs puits d'accès. Les principaux évènements redoutés sont la perte d'étanchéité de la cavité, les mouvements de terrain en surface, l'altération des eaux souterraines ainsi que, dans le cas spécifique des STEP semi-souterraines, l'émission de gaz vers la surface (Ineris, 2016).

4.3.1 Perte d'étanchéité

La perte d'étanchéité peut impacter les puits d'accès et les cavités souterraines. Elle est principalement due à un défaut de cimentation au niveau des interfaces roche-ouvrage ou à une dégradation progressive des équipements (cimentations, tubages, soutènements...). Elle peut être aggravée par l'augmentation de perméabilité de la roche encaissante due au creusement des ouvrages souterrains mais, également, aux sollicitations induites par les cycles de pompage-turbinage. Les phénomènes redoutés sont essentiellement une perte du volume stocké (donc du rendement de la STEP) associée à la percolation d'eau dans le milieu souterrain (dégradation des équipements ou des parois rocheuses, contamination de la nappe) : ce dernier phénomène est particulièrement important en cas de réutilisation d'anciennes mines du fait de l'altération que peut subir l'eau du réservoir inférieur au contact de certains minerais, notamment métalliques (acidification, contamination par des sulfates ou des éléments traces métalliques...). Les méthodes de maîtrise de ces risques passent par la mise en place d'une auscultation et d'une surveillance régulières pendant toute la durée d'exploitation : cela peut déboucher, si nécessaire, sur des limitations de la vitesse, de la fréquence, de l'amplitude ou de la durée des cycles de pompage ou de turbinage. Concernant les aspects qualitatifs, il s'agit principalement de suivre la qualité physico-chimique de l'eau transitant entre les deux réservoirs et de mettre en place un réseau de piézomètres de contrôle de l'état des eaux souterraines adjacentes, sus-jacentes ou sous-jacentes.

4.3.2 Mouvements de terrain

Les mouvements de terrain peuvent impliquer la partie souterraine (instabilité) ou superficielle (surrection/subsidence) d'une STEP-3S. Les aspects géomécaniques induits par les variations cycliques du niveau de l'eau dans les réservoirs souterrains entraînent des changements de l'état de contrainte dans le matériau rocheux. Ces changements d'ampleur et d'orientation des principales contraintes peuvent entraîner des ruptures par fatigue des géomatériaux. Pour étudier cela précisément, il faut réaliser des essais de résistance en conditions cycliques de saturation et désaturation. L'altération du matériau rocheux dépend surtout de sa nature lithologique et résulte principalement de sa perte de résistance due à l'érosion ou à la dissolution du matériau, phénomène qui peut être accéléré par les circulations d'eau dans des fissures ou fractures (Cerfontaine *et al.*, 2018). Ces risques géomécaniques sont importants dans le cas d'exploitations souterraines réutilisées en STEP-3S car leurs galeries n'ont pas été dimensionnées pour ce type d'usage. De façon générale, tout creusement de vide souterrain, induisant une extraction de matériau, peut engendrer des tassements ou affaissements en surface. Ces affaissements peuvent être amplifiés ou réactivés lors du transfert des masses d'eau depuis le fond vers la surface, et au contraire contrebalancés lors du remplissage du réservoir souterrain. C'est ce qu'ont montré Gombert *et al.* (2014) lors du suivi en continu des mouvements de terrain induits par le pompage d'un aquifère minier ennoyé. L'amplitude de ces mouvements, généralement de quelques millimètres à quelques centimètres en surface, est d'autant plus faible que les cavités souterraines sont profondes.

Les méthodes de maîtrise des risques de mouvements de terrain passent par la mise en place d'une surveillance et d'un plan de gestion du cyclage, c'est-à-dire de la fréquence et de l'intensité des cycles de pompage-turbinage : en surface, il peut s'agir de campagnes de nivellement, de suivis GPS en continu ou d'interférométrie radar et, en souterrain, de capteurs de déformation, de scans ou de diagraphies qui permettent de visualiser en 3D les cavités et leurs éventuelles déformations.

4.3.3 Perturbations hydrodynamiques

Outre les aspects géomécaniques, la principale préoccupation concernant l'utilisation des cavités souterraines abandonnées est l'échange d'eau potentiel entre le réservoir inférieur et le milieu géologique environnant. Cette interaction a été étudiée du point de vue des flux d'eau en termes d'impact environnemental ou d'efficacité de l'installation (Pujades *et al.*, 2016 ; Bodeux *et al.*, 2017 ; Pujades *et al.*, 2017a). Si le réservoir inférieur n'est pas étanche, de l'eau en provenance d'un aquifère adjacent va pouvoir s'y diriger dès que le niveau d'eau au sein de ce réservoir sera inférieur au niveau piézométrique non perturbé de l'aquifère, ce qui se produira en période de pompage. De ce fait, lors du passage ultérieur en mode turbinage, le volume disponible dans le réservoir inférieur ainsi que la hauteur de chute seront réduits, ce qui affectera le rendement du dispositif. Le niveau piézométrique est donc un facteur qui contrôle l'équilibre entre les flux entrants et sortants du réservoir inférieur. Si ce niveau est supérieur à l'altitude moyenne du réservoir inférieur, ce dernier aura tendance à se remplir naturellement au fur et à mesure qu'il sera vidé par pompage. Si, au contraire, il se trouve en dessous, c'est le remplissage du réservoir inférieur lors de la phase de turbinage qui provoquera un écoulement d'eau vers l'aquifère. Dans les deux cas, il y aura un impact piézométrique dans l'aquifère adjacent ainsi qu'un risque d'interactions hydrochimiques (Pujades *et al.*, 2018a, 2018b).

4.3.4 Interactions hydrochimiques

En conditions naturelles, l'eau du réservoir inférieur et l'eau souterraine du milieu environnant sont en équilibre chimique avec la lithologie mais lorsque l'activité STEP-3S commence, l'eau du réservoir souterrain est pompée, évacuée et stockée dans le réservoir de surface. Au cours de cette opération, l'eau est aérée et, par conséquent, sa composition chimique évolue vers un nouvel équilibre avec l'atmosphère, ce qui induit une variation des concentrations d'O_2 et de CO_2 dissous. Lorsque cette eau est ensuite turbinée de la surface vers le réservoir souterrain, elle évolue à nouveau vers un autre équilibre chimique avec le milieu géologique environnant. Ces cycles hydrochimiques peuvent conduire à la précipitation ou à la dissolution de minéraux, et à des variations de pH ou de rédox. Une étude numérique de l'évolution chimique de l'eau présente dans les mines, dans le contexte spécifique d'opérations de pompage-turbinage a été menée par Pujades *et al.* (2017b, 2018a, 2018b). Les résultats démontrent par exemple que la présence de pyrite influence la composition chimique de l'eau, en ayant tendance à diminuer son pH, pouvant ainsi entraîner la dissolution de la roche encaissante. Cette acidification de l'eau modifie les propriétés hydrogéologiques du milieu, ce qui pourrait avoir un impact sur les écoulements et induire des zones où l'impact hydrochimique est plus ou moins fort. Cela confirme les études antérieures sur l'oxydation des sulfures dans les mines de charbon ennoyées (Younger *et al.*, 2002), qui se traduit par la formation d'acide sulfurique et par la baisse du pH (Bigham et Nordstrom, 2000). En conséquence, l'activité d'une STEP-3S peut affecter la qualité des eaux souterraines environnantes et, si une partie de l'eau pompée doit être rejetée à l'extérieur, des eaux de surface (Pujades *et al.*, 2016 ; Bodeux *et al.*, 2017). Ces questions environnementales sont importantes car les futures STEP-3S devront respecter le Directive Cadre sur l'Eau (DCE, 2000/60/CE) visant à garantir le « bon état » qualitatif des eaux de surface et des eaux souterraines.

Les changements hydrochimiques peuvent également influencer l'efficacité d'une STEP-3S. Une eau acide peut accélérer la corrosion des équipements (tuyaux, pompes, turbines, structures en béton) (Sharma *et al.*, 2013 ; Kapil et Bhattacharyya, 2016), et d'éventuelles précipitations peuvent provoquer du « clogging » (colmatage des conduites) et altérer l'efficacité mécanique (Sterpejkowicz-Wersocki, 2014). Si l'eau renferme des carbonates en équilibre avec le CO_2 dissous, son brassage peut induire un dégazage et donc la précipitation de phases minérales carbonatées. S'il s'agit d'une eau anoxique, provenant d'un aquifère minier / carrier ou en interaction avec une nappe profonde, elle peut renfermer des métaux en solution (fer, manganèse, éléments traces métalliques) (Younger *et al.*, 2002 ; España *et al.*, 2006 ; Xuan *et al.*, 2013) : son oxygénation lors de son transfert dans le réservoir superficiel pourra y induire la précipitation de certains de ces métaux. Les changements hydrochimiques peuvent donc conduire à une diminution d'efficacité et de durabilité des installations mais également déplacer les équilibres chimiques au sein de l'aquifère et induire une altération de la qualité des eaux voire la fragilisation de la roche encaissante par dissolution. Il apparait donc indispensable d'approfondir les connaissances hydrochimiques de chaque site minier ou carrier pouvant faire office de STEP et de mettre préalablement en place une modélisation réaliste couplant écoulement souterrain et hydrochimie. Enfin, bien que peu étudié, il existe un risque potentiel de prolifération bactérienne, inhérent aux perturbations qualitatives induites par le fonctionnement d'une STEP-3S.

4.3.5 Émissions de gaz

Les émissions de gaz sont essentiellement liées aux STEP semi-souterraines au sein desquelles le transfert de grands volumes d'eau de la surface vers le fond implique celui de grands volumes d'air en sens inverse (Ineris, 2016). Le premier risque, d'ordre quantitatif, concerne l'effet de souffle susceptible de se produire au niveau des têtes de puits. Mais il faut également prendre en compte un risque qualitatif lié à la composition spécifique de certaines atmosphères souterraines (présence de CH_4, de radon, de CO_2, déficit d'O_2), notamment en cas de réutilisation d'anciennes mines. Cela peut être à l'origine d'émissions d'air vicié – potentiellement asphyxiant, toxique, inflammable ou explosif – qui imposera le suivi de la qualité de cet air.

5 Conclusions

Pour contribuer à l'utilisation harmonieuse des énergies renouvelables, il convient de mettre en place des solutions de

stockage et de production d'énergie. Les STEP sont actuellement la technologie de stockage de masse la plus mâture mais leur potentiel de développement est limité dans certains pays. C'est pourquoi le recours à des STEP en mines et carrières superficielles ou souterraines est suggéré. Il pourrait s'agir de STEP conventionnelles utilisant un bassin préexistant comme réservoir inférieur ou de STEP-3S disposant d'au moins un réservoir souterrain.

Ces nouvelles technologies de STEP amènent de nouvelles problématiques de gestion des risques et impacts (Cerfontaine *et al.*, 2018). L'interrelation plus ou moins étroite avec le milieu souterrain pourrait engendrer des perturbations physico-chimiques aussi bien de l'eau transitant entre les réservoirs que de l'aquifère environnant. Des risques d'instabilité sont également possibles au niveau du réservoir inférieur, qu'il soit constitué par un bassin superficiel préexistant ou par une galerie souterraine : ils peuvent également se traduire en surface par des mouvements de terrain d'amplitude faible à modérée. Dans le cas des STEP semi-souterraines, il faudra en outre tenir compte des transferts de gaz potentiellement dangereux entre l'atmosphère souterraine et la surface.

Ces risques ne doivent cependant pas freiner le développement de ces nouvelles technologies et le retour d'expérience des STEP conventionnelles existantes ou de la gestion des mines et carrières montre que des mesures de surveillance et de mitigation efficaces peuvent être mises en place.

Remerciements. E. Pujades remercie l'Université de Liège et l'UE pour leur soutien financier dans le cadre du programme de bourses postdoctorales Marie Curie BeIPD-COFUND (2014–2016 « Boursiers du FP7-MSCA-COFUND, 600405 »). Le projet de recherche SMARTWATER a été soutenu par le Service Public de Wallonie – Département de l'énergie et du bâtiment durable.

Références

ADEME. 2014. Micro-STEP de Berrien. https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/microstep-de-berrien.pdf (consulté le 25/02/20).

Akinyele DO, Rayudu RK. 2014. Review of energy storage technologies for sustainable power networks. *Sustain Energy Technol Assess*. https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.07.004.

Archambeau P, Bodeux S, Cerfontaine B, *et al*. 2016. Sites de stockage hydraulique – Inventaire, Analyses géomécanique, hydrogéologique et hydraulique. Délivrable D1.2 – Projet Smartwater.

Barbaux A. 2017. Pourquoi EDF n'investit pas plus dans les STEP pour le stockage des énergies renouvelables ? *L'Usine Nouvelle*. https://www.usinenouvelle.com/article/pourquoi-edf-n-investit-pas-plus-dans-les-step-pour-le-stockage-des-energies-renouvelables.N620998 (consulté le 25/02/2020).

Beulher M, Iqbal N, Ahinga Z. 2017. Groundwater bank energy storage systems. A feasibility study for Willow Springs Water Bank. California Energy Commission, CEC-500-2017-042. https://ww2.energy.ca.gov/2017publications/CEC-500-2017-042/CEC-500-2017-042.pdf (consulté le 09/07/2020).

Bigham JM, Nordstrom DK. 2000. Iron and aluminum hydroxysulfates from acid sulfate waters. *Rev Mineral Geochem* 40: 351–403. https://doi.org/10.2138/rmg.2000.40.7.

Billout M, Deneux M, Pastor JM. 2007. Rapport d'information n° 357 fait au nom de la mission commune d'information sur la sécurité d'approvisionnement électrique de la France et les moyens de la préserver. Sénat, Session ord. 2006–2007, Annexe au PV de la séance du 27/06/07.

Bodeux S, Pujades E, Orban P, Brouyère S, Dassargues A. 2017. Interactions between groundwater and the cavity of an old slate mine used as lower reservoir of an UPSH (Underground Pumped Storage Hydroelectricity): A modelling approach. *Eng Geol* 217: 71–80.

Caudron M, Chevalier E, Barchy L, Poty E. 1995. Inventaire des ressources du sous-sol et des besoins à termes de l'industrie extractive en Région wallonne. Conventions Région wallonne (DGATLP) / Université de Liège – Rapports non publiés.

Cerfontaine B, Ronchi B, Archambeau P, *et al.* 2018. Guidelines related to the use of an existing cavity (mine/quarry) as reservoir of a pumped storage hydrolectric facility. E-printS/working paper on ORBI-ULiège. http://hdl.handle.net/2268/222722.

Cluster TWEED. 2018. SMARTWATER : stockage énergétique par turbinage-pompage hydroélectrique: conférences et visite. Froyennes. http://clusters.wallonie.be/tweed-fr/smartwater-stockage-energetique-par-turbinage-pompage-hydroelectrique-conferences-et-visite-froyennes-17-mai-2018.html?IDC=6903&IDD=113281 (consulté le 30/04/2019).

EERA. 2016. Underground Pumped hydro storage. *Eur Energy Res Alliance Joint Program SP4*. https://eera-es.eu/wp-content/uploads/2016/03/EERA_Factsheet_Underground-Pumped-Hydro-Energy-Storage_not-final.pdf (consulté le 25/02/2020).

España JS, Pamo EL, Pastor ES, Andrés JR, Rubí JAM. 2006. The removal of dissolved metals by hydroxysulphate precipitates during oxidation and neutralization of acid mine waters, Iberian Pyrite Belt. *Aquat Geochem* 12: 269–298. https://doi.org/10.1007/s10498-005-6246-7.

Estivo AF. 2010. Brief description of the Muuga seawater pumped hydro accumulation power plant. Project No. ENE 1001, 10 p.

Fessenden RA. 1917. System of storing power. US Patent 1 247 520, Nov. 20, 1917.

Gaumier L, Seydel J. 1977. Operation of the Coo-Trois Ponts pumped storage plant by the national distribution center of Belgium. *Rev. Gén. Electr.* 86(7-8): 592–596.

Gombert P, Arbia A, Daupley X, Bouffier C, Pacot R. 2014. Surveillance de l'aléa « mouvement de terrain » au droit d'un aquifère minier testé par pompage. In: *24e Réunion des Sciences de la Terre*, Pau, 27–31 octobre 2014.

Higounenc F, Sécher M. 2016. Définition de la pointe de consommation électrique. BEI ERE, http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/1574 (consulté le 25/02/2020).

House LW. 2017. Economic potential of peak hour pumped storage and aquifer pumped hydro technologies at Willow Springs Water Bank. EPC15-049 Tech Memo No. 1, https://www.waterandenergyconsulting.com/TechMemo1.pdf (consulté le 09/07/2020).

Ineris. 2016. Le stockage souterrain dans le contexte de la transition énergétique. Maîtrise des risques et impacts. https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/ineris-dossier-ref-stockage-souterrain.pdf (consulté le 25/02/2020).

IRENA. 2017. Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 132 p.

Kapil N, Bhattacharyya KG. 2016. A comparison of neutralization efficiency of chemicals with respect to acidic Kopili River water. *Appl Water Sci*. https://doi.org/10.1007/s13201-016-0391-6.

Madlener R, Specht JM. 2013. An exploratory economic analysis of underground pumped-storage hydro power plants in abandoned coal mines. https://doi.org/10.2139/ssrn.2350106.

Menéndez J, Loredo J, Fernández JM, Galdo M. 2017. Underground pumped-storage hydro power plants with mine water in abandoned coal mines. In: Wolkersdorfer C, Sartz L, Sillanpää M, Häkkinen A, eds. Mine water and circular economy, Lappeenranta, Finland,

IMWA 2017. https://www.imwa.info/docs/imwa_2017/IMWA2017_Menendez_6.pdf (consulté le 05/07/2020).

Menéndez J, Fernández-Oro JM, Loredo J. 2020. Economic feasibility of underground pumped storage hydropower plants providing ancillary services. *Appl Sci* 10: 3947. https://www.mdpi.com/2076-3417/10/11/3947/htm (consulté le 05/07/2020).

MTES. 2019. Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (2019–2023, 2024–2028). Projet pour consultation. Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, 396 p. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ppe_pour_consultation_du_public.pdf (consulté le 25/02/2020).

Niemann A, Balmes JP, Schreiber U, Wagner HJ, Friedrich T. 2018. Proposed underground pumped hydro storage power plant at Prosper-Daniel colliery in bottrop: State of play and prospects. *Mining Rep* 154(3): 214–223.

Pérez-Díaz JI, Cavazzini G, Blázquez F, *et al*. 2014. Technological developments for pumped-hydro energy storage. In: *Mechanical Storage Subprogramme, Joint Programme on Energy Storage*, May 2014. *Eur Energy Res Alliance*.

Poty E, Chevalier E. 2004. L'activité extractive en Wallonie. Situation actuelle et perspectives. Rapport, Ministère de la Région wallonne, Direction générale de l'Aménagement du territoire, du Logement et du Patrimoine, 85 p.

Poulain A. 2018. Étude de l'impact sollicitations cycliques au sein d'aquifères non confinés, à différentes échelles. Applications à des systèmes de pompage-turbinage en carrières. Thèse de doctorat, Université de Mons, Belgique.

Poulain A, de Dreuzy J-R, Goderniaux P. 2018a. Pump Hydro Energy Storage (PHES) in groundwater flooded quarries. *J Hydrol* 559: 1002–1012.

Poulain A, Goderniaux P, Pujades E, Dassargues A, Orban P. 2018b. Utilisation de mines et carrières pour le développement de systèmes de stockage d'énergie par pompage-turbinage : études hydrogéologiques en Région wallonne. *Géologues* 196: 66–71.

Pujades E, Willems T, Bodeux S, Orban P, Dassargues A. 2016. Underground pumped storage hydroelectricity using abandoned works (deep mines or open pits) and the impact on groundwater flow. *Hydrogeol J* 24: 1531–1546.

Pujades E, Orban P, Bodeux S, Archambeau P, Erpicum S, Dassargues A. 2017a. Underground pumped storage hydropower plants using open pit mines: how do groundwater exchanges influence the efficiency? *Appl Energy* 190: 135–146.

Pujades E, Orban P, Jurado A, Ayora C, Brouyère S, Dassargues A. 2017b. Water chemical evolution in Underground Pumped Storage Hydropower plants and induced consequences. *Energy Proc* 125: 504–510.

Pujades E, Jurado A, Orban P, Dassargues A. 2018a. Parametric assessment of hydrochemical changes induced by underground pumped storage hydropower. *Sci Total Environ* 659: 599–611. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.103.

Pujades E, Jurado A, Orban P, *et al*. 2018b. Hydrochemical changes induced by underground pumped storage hydropower and their associated impacts. *J Hydrol* 563: 927–941. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.041.

Remacle A. 2009. Contribution des anciennes carrières à la biodiversité wallonne. Convention « Les carrières en Région wallonne : inventaire et intérêt biologique » (C45). Rapport non publié. Service public de Wallonie, Direction générale opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources naturelles et de l'Environnement, Direction de la Nature, Belgique.

Salmon R. 2015. Note relative à la valorisation d'anciennes mines et carrières en Stations de Transfert d'Energie par Pompage (STEP) dans le contexte de la Transition Energétique. Ineris DRS-15-153745-10023A, https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/drs-15-153745-10023a-note-step-sign%C3%A9e-1-1445952822.pdf (consulté le 25/02/2020).

Scott FM. 1976. Hydropower from underground pumped storage. *Energy Sources. Part A Recovery* 217–227. https://doi.org/10.1080/00908317508945949.

Sharma S, Sack A, Adams JP, *et al*. 2013. Isotopic evidence of enhanced carbonate dissolution at a coal mine drainage site in Allegheny County, Pennsylvania, USA. *Appl Geochem* 29: 32–42.

SIA Partners. 2018. Stockage d'électricité par STEP : des solutions pour accompagner les prochaines étapes de la transition énergétique ? https://www.sia-partners.com/fr/actualites-et-publications/de-nos-experts/stockage-delectricite-par-step-des-solutions-pour (consulté le 25/02/2020).

Sterpejkowicz-Wersocki W. 2014. Problem of clogging in drainage systems in the examples of the Zur and Podgaje dams. *Arch Hydro Eng Environ Mech* 61: 183–192.

Ursat X, Jacquet-Francillon H, Rafaï I. 2011. Expérience d'EDF dans l'exploitation des STEP. In: *SHF : « Pumped storage Powerplants »*, 23–24 novembre 2011, Lyon.

Xuan PT, Van Pho N, Gas'kova OL, Bortnikova SB. 2013. Geochemistry of surface waters in the vicinity of open pit mines at the Cay Cham deposit, Thai Nguyen province, northern Vietnam. *Geochem Int* 51: 931–938. https://doi.org/10.1134/S0016702913110062.

Younger PL, Banwart SA, Hedin RS. 2002. Mine water: Hydrology, pollution, remediation. Springer Science & Business Media.

Citation de l'article : Gombert P, Poulain A, Goderniaux P, Orban P, Pujades E, Dassargues A. 2020. Potentiel de valorisation de sites miniers et carriers en step en France et en Belgique. *La Houille Blanche* : 33–42