

1

POTENTIEL DE VALORISATION DE SITES MINIERS ET 2 CARRIERS EN STEP EN FRANCE ET EN BELGIQUE

3

5 Philippe GOMBERT⁽¹⁾, Angélique POULAIN⁽²⁾, Pascal GODERNIAUX⁽³⁾

6 Philippe ORBAN⁽⁴⁾, Estanislao PUJADES⁽⁵⁾, Alain DASSARGUES⁽⁶⁾

7 ⁽¹⁾ Ineris, Parc Technologique Alata, 60550 Verneuil-en-Halatte, France - e-mail: philippe.gombert@ineris.fr

8 ⁽²⁾ Université d'Avignon - e-mail: angelique.poulain@univ-avignon.fr

9 ⁽³⁾ Université de Mons, Geology and Applied Geology - e-mail: pascal.goderniaux@umons.ac.be

10 ⁽⁴⁾ Hydrogéologie & Géologie de l'Environnement, Université de Liège - e-mail: p.orban@uliege.be

11 ⁽⁵⁾ Department of Computational Hydrosystems, UFZ – Helmholtz Centre for Environmental Research, Permoserstr. 15, 04318
12 Leipzig, Germany – e-mail: estanislao.pujades-garnes@ufz.de

13 ⁽⁶⁾ Hydrogéologie & Géologie de l'Environnement, Université de Liège - e-mail: alain.dassargues@uliege.be

14

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

27 **MOTS CLEFS :** Station de transfert d'énergie par pompage ; stockage d'énergie ; risques ; mines ; carrières

28

POTENTIAL FOR THE DEVELOPMENT OF MINING AND 29 QUARRYING SITES IN PUMPING HYDRO-STORAGE IN FRANCE AND 30 BELGIUM

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

44 **KEY WORDS :** Pumping Hydro-Energy Storage; energy storage; risks; mines; quarries

45 **I INTRODUCTION**

46 Apparu en Suisse en 1890, le concept de Station de Transfert d'Energie par Pompage (STEP) vise
47 (i) à stocker de l'énergie potentielle en période de surproduction électrique ou de basse
48 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 m³ 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 m³ 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 dénivellés 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 [Cluster TWEED, 2018 ; Archambeau *et al.*, 2016]. 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.

II PRÉSENTATION DE LA TECHNOLOGIE

II.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 1970-80 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

97 n'a encore été réalisé mis à part la modernisation de certaines STEP : il existe en effet des obstacles
98 limitant les possibilités de développement des nouveaux ouvrages, qu'ils soient de nature technico-
99 économiques (les meilleurs sites ont déjà été équipés, l'ouverture des concessions hydroélectriques
100 à la concurrence freine l'énergéticien historique) ou socio-environnementaux (acceptabilité
101 sociétale et impact sur l'environnement).

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

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

112 II.2 STEP non conventionnelles

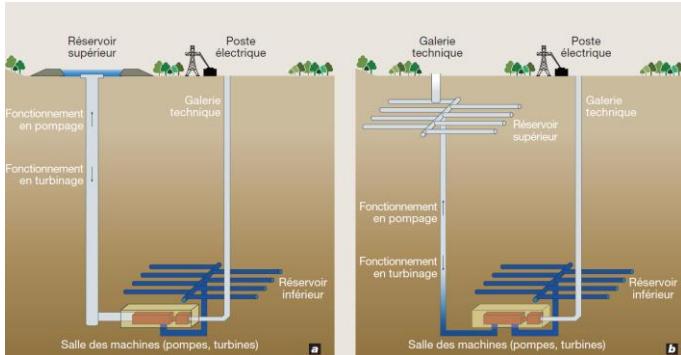
113 L'énergie produite étant directement proportionnelle à la hauteur de chute et au volume d'eau
114 stocké, la création d'une STEP de puissance importante nécessite un fort dénivelé (plusieurs
115 centaines de mètres) ou un important potentiel de stockage (plusieurs millions de m³ d'eau pour
116 chaque réservoir). Ce sont principalement le coût de construction et l'impact socio-environnemental
117 de ces grands réservoirs qui restreignent les possibilités d'implantations de nouvelles STEP.
118 Cependant, il est possible d'économiser la construction du réservoir inférieur [Pérez-Díaz *et al.*,
119 2014] dans le cas des STEP marines (mer), des STEP de carrières¹ (ancienne carrière ou mine de
120 surface ennoyée) ou des STEP semi-souterraines (ancienne mine ou carrière souterraine ennoyée).
121 Il existe également la possibilité de créer des STEP entièrement souterraines où les deux réservoirs
122 seraient situés à deux niveaux différents du sous-sol [Salmon, 2015]. Une STEP non
123 conventionnelle est donc constituée de deux réservoirs d'eau situés à des altitudes différentes mais
124 dont l'un, au moins, existe déjà : si l'un de ces réservoirs est souterrain, on peut en outre parler de
125 STEP-3S, c'est-à-dire de « STEP Souterraine ou Semi-Souterraine ».

126 Il est intéressant de réaliser un calcul prospectif de ce que pourrait apporter cette technologie de
127 stockage d'énergie à l'échelle d'un pays. Cela a été réalisé par l'Ineris [2016] pour la France dans le
128 cas de STEP-3S, sur la base d'une hauteur de chute de 500 m et d'un volume de réservoirs de
129 100 000 m³ chacun. Considérant qu'il existe déjà une centaine de stockages souterrains en France
130 (principalement d'hydrocarbures) et que leur remplacement par le même nombre de STEP-3S serait
131 socialement acceptable, cela permettrait de stocker environ 4 TWh par an sur la base d'un cycle de
132 pompage-turbinage par jour ou 8 TWh sur la base de deux cycles journaliers. Cela ne correspond
133 toutefois qu'à 1% ou 2% de la production d'énergies renouvelables attendue dans un futur proche.
134 Les STEP-3S ne sont donc pas des solutions de stockage massif de l'énergie à l'échelle
135 nationale mais elles peuvent toutefois présenter un intérêt local ou régional pour réguler la
136 production électrique d'un champ d'éolienne ou de panneaux photovoltaïques. C'est ainsi que Scott
137 (1976) prévoit des STEP-3S de 2000 MW basées sur les dénivels de l'ordre de 500 m. Il existe
138 même des projets de STEP-3S de plus modeste puissance, destinés à lisser les pics horaires de
139 demande électrique, en creusant des puits rejoignant l'aquifère près de certaines retenues d'eau ou
140 STEP de surface (House, 2017 ; Beulher *et al.*, 2017).

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 « minéral », 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.

141 II.3 Analyse de risques et d'impact

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



150 **Figure 1. Schéma simplifié de l'utilisation d'anciennes mines comme STEP semi-souterraine
151 (a) et souterraine (b) [Salmon, 2015]**

152 III STEP DE SURFACE EN MINES OU CARRIERES

153 III.1 Principe et exemples

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

159 En France, un projet de micro-STEP en carrière a été initié en 2015 à Berrien (Finistère). Il s'agit de
160 convertir une carrière de kaolin en fin d'exploitation, qui dispose de plusieurs bassins étagés sur une
161 surface de 116 hectares. Couplée à un parc photovoltaïque et éolien, la STEP aura une puissance de
162 1,5 MW pour une hauteur de chute assez modeste (40 m). Le site a vocation à fournir 6 GWh par
163 an, sur la base d'un turbinage quotidien de 11 h, soit la consommation électrique (hors chauffage et
164 eau chaude) de 2230 foyers [ADEME, 2014].

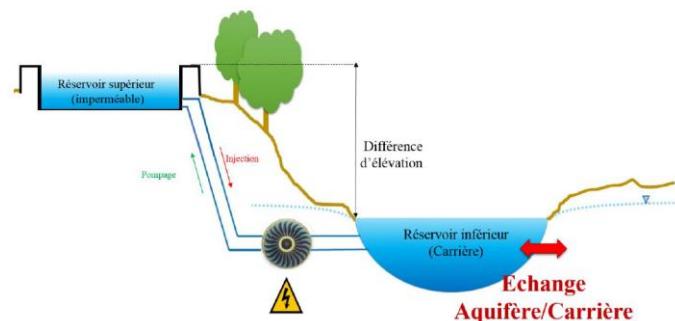
165 En Belgique, le projet SMARTWATER [Cluster TWEED, 2018] financé par la Wallonie entre
166 2014 et 2018, avait pour objectif de fournir des réponses quant à l'implémentation de STEP utilisant
167 des sites miniers ou carriers préexistants. Ce projet a fait intervenir des collaborations
168 pluridisciplinaires permettant d'aboutir à un ensemble de critères et d'outils socio-juridiques,
169 économiques, géomécaniques, hydrogéologiques, hydrauliques, hydromécaniques et
170 électromécaniques pour l'aide à la décision dans le but de favoriser les STEP en Wallonie. Dans le
171 contexte carrier et topographique wallon, la puissance disponible moyenne par site serait de l'ordre
172 de 10 à 20 MW, ce qui correspond à la puissance de production d'un parc éolien classique. La
173 Figure 3b montre un exemple de carrière pouvant potentiellement être reconvertie en STEP.
174

175 III.2 Potentiel

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

179 En France, un recensement réalisé en 2012 indique 4 710 carrières en activité et 101 616 carrières
 180 abandonnées (<http://www.brgm.fr/projet/observatoire-carrieres-materiaux-france>). Elles concernent
 181 principalement la production de granulats, de roches ornementales et de construction et de quelques
 182 minéraux industriels (talc, andalousite, silex, micas, feldspaths, argile, silice). Il existe également
 183 quelques mines de surface qui présentent des lacs miniers permanents. Sachant qu'à l'échelle de la
 184 France, il suffirait d'une trentaine de STEP de 60 MW pour atteindre les 1,5 à 2 GW prévus par la
 185 PPE [MTES, 2019], cela représente moins de 0,1% des carrières abandonnées.

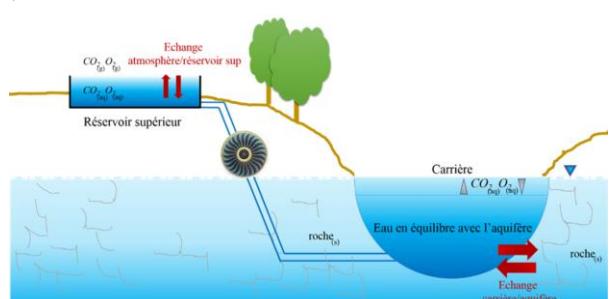
186 En Belgique, un inventaire des sites miniers et carriers de Wallonie, a été réalisé afin d'estimer le
 187 potentiel de stockage disponible. En 2001, il existait environ 964 carrières inscrites en zone
 188 d'extraction aux plans de secteur [Caudron *et al.*, 1995 ; Poty et Chevalier, 2004] et plus de 5000
 189 carrières désaffectées sur le territoire [Remacle, 2009]. Ces sites exploitent ou exploitaient
 190 différents types de roches, dont les calcaires, grès et sables sont les plus représentés. Toutes les
 191 carrières ne sont bien sûr pas utilisables dans le cadre d'installation de STEP, notamment en raison
 192 de contraintes liées à la taille, au relief ou à des contraintes géotechniques. En considérant
 193 uniquement les carrières dont la taille est supérieure à 1 ha, dont le dénivelé exploitable est
 194 supérieur à 20 m et implantées dans des roches non meubles, l'inventaire des carrières wallonnes
 195 fournit un potentiel approximatif de 823 MWh en considérant uniquement les carrières non actives,
 196 et de 4896 MWh en prenant en compte les carrières actuellement encore en cours d'exploitation
 197 [Cluster TWEED, 2018 ; Poulain, 2018 ; Archambeau *et al.*, 2016].



198 **Figure 2. Représentation simplifiée du concept de STEP en carrière (à g.) et exemple de la**
 199 **carrière de Maizeret en Belgique (à d.) [Poulain, 2018]**

200 III.3 Impacts

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



214 **Figure 3. Représentation simplifiée des interactions hydrodynamiques (à g.) et**
215 **hydrochimiques (à d.) entre une STEP de carrière et l'aquifère adjacent [Poulain, 2018]**

216 *III.3.1 Impacts quantitatifs*

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

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

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

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

238 *III.3.2 Impacts qualitatifs*

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

245 L'augmentation de la concentration en oxygène dissous est un paramètre critique en présence
246 d'éléments sensibles aux réactions d'oxydoréduction tels que le fer et le manganèse. Dans les
247 aquifères carbonatés, le CO₂ est l'un des principaux acteurs de la dissolution-précipitation des
248 minéraux. Le brassage de l'eau dans le bassin supérieur peut conduire à son dégazage et à une
249 diminution de sa concentration, facteur favorisant la précipitation des carbonates. Dans un aquifère
250 carbonaté tel que la craie ou le calcaire, la quantité d'eau et de roche présente dans l'aquifère
251 adjacent agit comme un système « tampon » et stabilise les équilibres chimiques de l'eau
252 souterraine. La propagation du stress hydrochimique dans le milieu rocheux, induite par les cycles
253 de pompage-turbinage, est ainsi limitée. Cependant, des phénomènes de précipitation peuvent être
254 attendus au niveau du bassin supérieur. Les quantités précipitées peuvent être importantes, en
255 particulier en début d'opération, et pourraient entraîner la nécessité de nettoyer périodiquement le
256 bassin supérieur ainsi que les équipements [Poulain, 2018].

257 L'hydrochimie des eaux dépend de la nature lithologique de la roche réservoir ainsi que des espèces
258 minérales présentes. Avant l'installation d'une STEP en carrière, il est donc important d'avoir une
259 connaissance approfondie du contexte géologique et de l'évolution hydrochimique attendue, en
260 tenant compte des processus susceptibles de se produire dans le réservoir inférieur, le réservoir
261 supérieur et l'aquifère adjacent. Cette évaluation peut par exemple être réalisée à l'aide de modèles
262 couplés écoulement-transport-hydrochimie. Elle est particulièrement importante pour évaluer
263 l'impact potentiel sur les écosystèmes présents dans la carrière ou sur la production d'eau potable

264 dans l'aquifère adjacent. Un système de monitoring piézométrique développé autour de la carrière
265 permettrait également de contrôler l'évolution chimique des eaux dans l'aquifère, et de réagir en cas
266 de changement hydrochimique non attendu.

267 IV STEP SOUTERRAINES OU SEMI-SOUTERRAINES EN MINES OU CARRIERES

268 IV.1 Principe et exemples

269 Certains équipements hydroélectriques ont depuis longtemps été implantés sous terre, comme des
270 usines hydroélectriques ou des conduites d'amenée d'eau ou de fuite. L'idée de concevoir des
271 réservoirs souterrains est née aux États-Unis en 1917 où elle a donné lieu à un brevet [Fessenden,
272 1917]. Toutefois, la première - et unique - réalisation ne date que de 2006 en Autriche [Madlener et
273 Specht, 2013] : il s'agit du site de Nassfeld où le réservoir inférieur d'une STEP conventionnelle a
274 été agrandi en creusant 160 000 m³ de vides souterrains.

275 Les avantages liés à la conversion d'anciennes mines ou carrières souterraines en STEP-3S sont
276 multiples : pas de creusement de vides de grandes dimensions, pas de prélèvement d'eau en surface
277 pour remplir les réservoirs, occupation du sol réduite et impact environnemental faible à modéré en
278 surface. Cependant, les sollicitations auxquelles devra être soumis le réservoir inférieur peuvent
279 imposer le creusement de nouvelles cavités dédiées à cet usage [Menéndez *et al.*, 2017]. C'est ce
280 qui est prévu dans le projet de réutilisation de la mine de charbon en fin d'exploitation de Posper-
281 Daniel à Bottrop, en Allemagne, profonde d'environ 1200 m [Madlener et Specht, 2013]. L'état des
282 galeries souterraines, la résistance des terrains et la présence de gaz de mine ne permettront pas la
283 réutilisation des galeries d'exploitation du charbon et il faudra creuser une galerie circulaire de
284 15 km de longueur à 530 m de profondeur afin d'y stocker 575 000 m³ d'eau [Niemann *et al.*,
285 2018]. Cette STEP semi-souterraine sera capable de fournir 200 MW sur une durée de 3,75 h. La
286 durée des travaux est estimée entre 7 et 10 ans et l'investissement nécessaire est de l'ordre de
287 600 M€. Il est intéressant de noter que plus de 80% des riverains interrogés se sont déclarés
288 favorables à ce projet, ce qui est un niveau d'acceptabilité sociétale assez rare.

289 La nécessité de creuser de nouveaux bassins en souterrain risque donc d'augmenter les coûts de
290 construction et de maintenance du réservoir inférieur, mais la possibilité d'implanter ce dernier au
291 droit du réservoir supérieur permet de diminuer la longueur du canal d'amenée ou du canal de fuite
292 et donc de réduire en conséquence leurs coûts de construction [Pérez-Díaz *et al.*, 2014]. Des études
293 économiques des différentes options sont à particulariser pour chaque site [Madlener et Specht,
294 2013 ; Menendez *et al.*, 2020].

295 Un autre concept, moins largement répandu est celui de STEP marine semi-souterraine. Il n'existe
296 actuellement qu'une seule STEP marine conventionnelle dans le monde : construite au Japon en
297 1999, elle dispose d'un bassin de 0,56 Mm³ situé à 136 m au-dessus de la mer, ce qui lui donne une
298 puissance de 30 MW pendant environ 6 h [Pérez-Díaz *et al.*, 2014]. Cependant, l'Estonie a un projet
299 de STEP marine semi-souterraine à Muuga pour 2020 : il combinerait la mer comme réservoir
300 supérieur et de vastes cavités anciennement creusées dans le granite sous le niveau de la mer
301 comme réservoirs inférieurs [Estivo, 2010 ; Pérez-Díaz *et al.*, 2014]. En turbinant 4,75 Mm³ d'eau
302 de mer en 12 h, la puissance annoncée serait de 500 MW pour une hauteur de chute de 500 m. Ce
303 projet nécessitera cependant le creusement d'un canal d'amenée souterrain et de galeries
304 souterraines supplémentaires pour atteindre le volume de stockage souhaité.

305 IV.2 Potentiel

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

309 Les cavités minées pourraient être réutilisées en réservoir souterrain de STEP lorsqu'elles seront
310 abandonnées mais plusieurs problèmes limitent l'intérêt d'une telle opération : ces cavités ont un
311 volume (<0,2 Mm³) 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 Mm³ 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 (Figure 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 Armorican, 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 reconvertis 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 creusées 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.

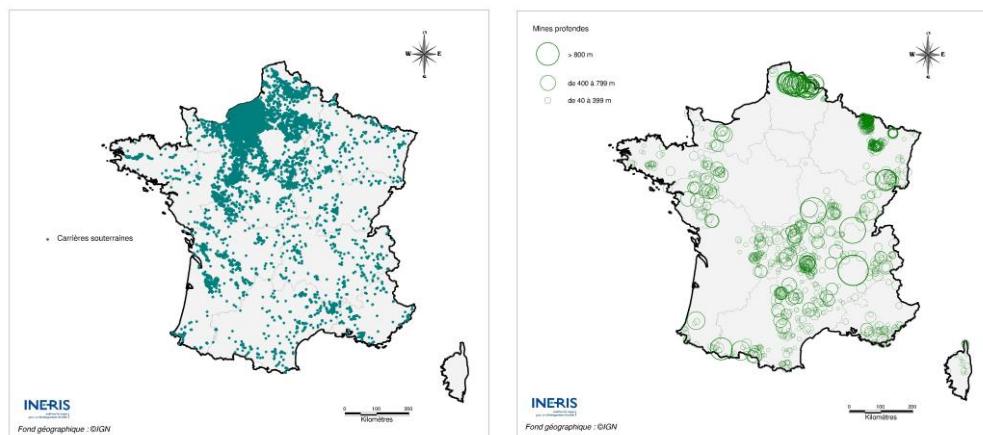


Figure 4. Localisation des carrières (à g.) et des mines (à d.) souterraines connues en France [Ineris, 2016]

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

352 du projet Smartwater, deux cas types ont été définis et étudiés plus en détail, l'un représentatif
353 d'une ancienne mine de charbon et l'autre d'une carrière d'ardoises [Bodeux *et al.*, 2017].

354 IV.3 Risques et impacts

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

359 IV.3.1 Perte d'étanchéité

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

377 IV.3.2 Mouvements de terrain

378 Les mouvements de terrain peuvent impliquer la partie souterraine (instabilité) ou superficielle
379 (surrection/subsidence) d'une STEP-3S. Les aspects géomécaniques induits par les variations
380 cycliques du niveau de l'eau dans les réservoirs souterrains entraînent des changements de l'état de
381 contrainte dans le matériau rocheux. Ces changements d'ampleur et d'orientation des principales
382 contraintes peuvent entraîner des ruptures par fatigue des géomatériaux. Pour étudier cela
383 précisément, il faut réaliser des essais de résistance en conditions cycliques de saturation et
384 désaturation. L'altération du matériau rocheux dépend surtout de sa nature lithologique et résulte
385 principalement de sa perte de résistance due à l'érosion ou à la dissolution du matériau, phénomène
386 qui peut être accéléré par les circulations d'eau dans des fissures ou fractures [Cerfontaine *et al.*,
387 2018]. Ces risques géomécaniques sont importants dans le cas d'exploitations souterraines
388 réutilisées en STEP-3S car leurs galeries n'ont pas été dimensionnées pour ce type d'usage. De
389 façon générale, tout creusement de vide souterrain, induisant une extraction de matériau, peut
390 engendrer des tassements ou affaissements en surface. Ces affaissements peuvent être amplifiés ou
391 réactivés lors du transfert des masses d'eau depuis le fond vers la surface, et au contraire
392 contrebalancés lors du remplissage du réservoir souterrain. C'est ce qu'ont montré Gombert *et al.*
393 [2014] lors du suivi en continu des mouvements de terrain induits par le pompage d'un aquifère
394 minier ennoyé. L'amplitude de ces mouvements, généralement de quelques millimètres à quelques
395 centimètres en surface, est d'autant plus faible que les cavités souterraines sont profondes.

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

401 *IV.3.3 Perturbations hydrodynamiques*

402 Outre les aspects géomécaniques, la principale préoccupation concernant l'utilisation des cavités
403 souterraines abandonnées est l'échange d'eau potentiel entre le réservoir inférieur et le milieu
404 géologique environnant. Cette interaction a été étudiée du point de vue des flux d'eau en termes
405 d'impact environnemental ou d'efficacité de l'installation [Pujades *et al.*, 2016 ; Bodeux *et al.*,
406 2017 ; Pujades *et al.*, 2017a]. Si le réservoir inférieur n'est pas étanche, de l'eau en provenance d'un
407 aquifère adjacent va pouvoir s'y diriger dès que le niveau d'eau au sein de ce réservoir sera
408 inférieur au niveau piézométrique non perturbé de l'aquifère, ce qui se produira en période de
409 pompage. De ce fait, lors du passage ultérieur en mode turbinage, le volume disponible dans le
410 réservoir inférieur ainsi que la hauteur de chute seront réduits, ce qui affectera le rendement du
411 dispositif. Le niveau piézométrique est donc un facteur qui contrôle l'équilibre entre les flux
412 entrants et sortants du réservoir inférieur. Si ce niveau est supérieur à l'altitude moyenne du
413 réservoir inférieur, ce dernier aura tendance à se remplir naturellement au fur et à mesure qu'il sera
414 vidé par pompage. Si, au contraire, il se trouve en dessous, c'est le remplissage du réservoir
415 inférieur lors de la phase de turbinage qui provoquera un écoulement d'eau vers l'aquifère. Dans les
416 deux cas, il y aura un impact piézométrique dans l'aquifère adjacent ainsi qu'un risque
417 d'interactions hydrochimiques [Pujades *et al.*, 2018a, 2018b].

418 *IV.3.4 Interactions hydrochimiques*

419 En conditions naturelles, l'eau du réservoir inférieur et l'eau souterraine du milieu environnant sont
420 en équilibre chimique avec la lithologie mais lorsque l'activité STEP-3S commence, l'eau du
421 réservoir souterrain est pompée, évacuée et stockée dans le réservoir de surface. Au cours de cette
422 opération, l'eau est aérée et, par conséquent, sa composition chimique évolue vers un nouvel
423 équilibre avec l'atmosphère, ce qui induit une variation des concentrations d'O₂ et de CO₂ dissous.
424 Lorsque cette eau est ensuite turbinée de la surface vers le réservoir souterrain, elle évolue à
425 nouveau vers un autre équilibre chimique avec le milieu géologique environnant. Ces cycles
426 hydrochimiques peuvent conduire à la précipitation ou à la dissolution de minéraux, et à des
427 variations de pH ou de redox. Une étude numérique de l'évolution chimique de l'eau présente dans
428 les mines, dans le contexte spécifique d'opérations de pompage-turbinage a été menée par Pujades
429 *et al.* [2017b, 2018a, 2018b]. Les résultats démontrent par exemple que la présence de pyrite
430 influence la composition chimique de l'eau, en ayant tendance à diminuer son pH, pouvant ainsi
431 entraîner la dissolution de la roche encaissante. Cette acidification de l'eau modifie les propriétés
432 hydrogéologiques du milieu, ce qui pourrait avoir un impact sur les écoulements et induire des
433 zones où l'impact hydrochimique est plus ou moins fort. Cela confirme les études antérieures sur
434 l'oxydation des sulfures dans les mines de charbon ennoyées [Younger *et al.*, 2002], qui se traduit
435 par la formation d'acide sulfurique et par la baisse du pH [Bigham et Nordstrom, 2000]. En
436 conséquence, l'activité d'une STEP-3S peut affecter la qualité des eaux souterraines environnantes
437 et, si une partie de l'eau pompée doit être rejetée à l'extérieur, des eaux de surface [Pujades *et al.*,
438 2016 ; Bodeux *et al.*, 2017]. Ces questions environnementales sont importantes car les futures
439 STEP-3S devront respecter la Directive Cadre sur l'Eau [DCE, 2000/60/CE] visant à garantir le
440 « bon état » qualitatif des eaux de surface et des eaux souterraines.

441 Les changements hydrochimiques peuvent également influencer l'efficacité d'une STEP-3S. Une
442 eau acide peut accélérer la corrosion des équipements (tuyaux, pompes, turbines, structures en
443 béton) [Kapil et Bhattacharyya, 2016 ; Sharma *et al.*, 2013], et d'éventuelles précipitations peuvent
444 provoquer du « clogging » (colmatage des conduites) et altérer l'efficacité mécanique
445 [Sterpejkowicz-Wersocki, 2014]. Si l'eau renferme des carbonates en équilibre avec le CO₂ dissous,
446 son brassage peut induire un dégazage et donc la précipitation de phases minérales carbonatées. S'il
447 s'agit d'une eau anoxique, provenant d'un aquifère minier/carrier ou en interaction avec une nappe
448 profonde, elle peut renfermer des métaux en solution (fer, manganèse, éléments traces métalliques)
449 [España *et al.*, 2006; Xuan *et al.*, 2013; Younger *et al.*, 2002] : son oxygénation lors de son transfert
450 dans le réservoir superficiel pourra y induire la précipitation de certains de ces métaux. Les
451 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 apparaît donc indispensable d'approfondir les connaissances hydrochimiques de chaque site minier ou carrière 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.

IV.3.5 Emissions 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 CH₄, de radon, de CO₂, déficit d'O₂), 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.

V 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 mûre 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 physicochimiques 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.

VI 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.

REFERENCES

- 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 D. O., Rayudu R. K. (2014). - *Review of energy storage technologies for sustainable power networks*. Sustainable Energy Technol. and Assessments, DOI: [10.1016/j.seta.2014.07.004](https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.07.004)
- Archambeau P., Bodeux S., Cerfontaine B., Charlier R., Dassargues A., Erpicum S., Frippiat C., Goderniaux P., Pirotton M., Poulain A., Orban P., Pujades E., Ronchi B., Stassen F., Willems T.

498 (2016). - *Sites de stockage hydraulique – Inventaire, Analyses géomécanique, hydrogéologique et*
499 *hydraulique*, Délivrable D1.2 – Projet Smartwater

500 Barbaux A. (2017). - *Pourquoi EDF n'investit pas plus dans les STEP pour le stockage des*
501 *énergies renouvelables ?* L'Usine Nouvelle, Publié le 30/11/2017, Consulté le 25/02/2020,
502 [https://www.usinenouvelle.com/article/pourquoi-edf-n-investit-pas-plus-dans-les-step-pour-le-](https://www.usinenouvelle.com/article/pourquoi-edf-n-investit-pas-plus-dans-les-step-pour-le-stockage-des-energies-renouvelables.N620998)
503 [stockage-des-energies-renouvelables.N620998](https://www.usinenouvelle.com/article/pourquoi-edf-n-investit-pas-plus-dans-les-step-pour-le-stockage-des-energies-renouvelables.N620998)

504 Beulher M., Iqbal N., Ahinga Z. (2017). - Groundwater Bank Energy Storage Systems. A
505 Feasibility Study for Willow Springs Water Bank. California Energy Commission, December 2017,
506 CEC-500-2017-042, <https://ww2.energy.ca.gov/2017publications/CEC-500-2017-042/CEC-500-2017-042.pdf> (consulté le 09/07/2020).

508 Bigham J. M., Nordstrom D. K. (2000). - *Iron and aluminum hydroxysulfates from acid sulfate*
509 *waters.* Rev. Mineral. Geochem., **40**: 351–403. <http://dx.doi.org/10.2138/rmg.2000.40.7>

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

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

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

519 Cerfontaine B., Ronchi B., Archambeau P., Poulain A., Pujades E., Orban P., Charlier R.,
520 Veschkens M., Pirotton M., Goderniaux P., Dassargues A., Erpicum S. (2018). - *Guidelines related*
521 *to the use of an existing cavity (mine/quarry) as reservoir of a pumped storage hydroelectric facility.*
522 E-printS/working paper on ORBI-ULiège. <http://hdl.handle.net/2268/222722>

523 Cluster TWEED (2018). - *SMARTWATER : stockage énergétique par turbinage-pompage*
524 *hydroélectrique : conférences et visite.* Froyennes, 17/05/2018, <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).

527 EERA (2016). - *Underground Pumped hydro storage.* Europ. Energy Res. Alliance Joint Program
528 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).

530 España J. S., Pamo E. L., Pastor E. S., Andrés J. R., Rubí J. A. M. (2006). - *The removal of*
531 *dissolved metals by hydroxysulphate precipitates during oxidation and neutralization of acid mine*
532 *waters, Iberian Pyrite Belt.* Aquat. Geochem., **12**: 269–298. <https://doi.org/10.1007/s10498-005-6246-7>

534 Estivo A. F. (2010). - *Brief Description of the Muuga Seawater Pumped Hydro Accumulation*
535 *Power Plant.* Project No. ENE 1001, 10 p.

536 Fessenden R. A. (1917). - *System of storing power.* US Patent 1 247 520, Nov. 20, 1917.

537 Gombert P., Arbia A., Daupley X., Bouffier C., Pacot R. (2014). - *Surveillance de l'aléa*
538 *“mouvement de terrain” au droit d'un aquifère minier testé par pompage.* 24^e Réunion des
539 Sciences de la Terre, Pau, 27-31 octobre 2014.

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

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

545 IRENA (2017). - *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030.* International
546 Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 132 p.

- 547 Kapil N., Bhattacharyya K. G. (2016). - *A comparison of neutralization efficiency of chemicals*
548 *with respect to acidic Kopili River water.* Appl. Water Sci., dx.doi.org/10.1007/s13201-016-0391-6
- 549 House L. W., 2017. – *Economic Potential of Peak Hour Pumped Storage and Aquifer Pumped*
550 *Hydro Technologies at Willow Springs Water Bank.* EPC15-049 Tech Memo No. 1,
551 <https://www.waterandenergyconsulting.com/TechMemo1.pdf> (consulté le 09/07/2020)
- 552 Madlener R., Specht J. M. (2013). - *An Exploratory Economic Analysis of Underground Pumped-*
553 *Storage Hydro Power Plants in Abandoned Coal Mines.* <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2350106>
- 554 Menéndez J., Loredo J., Fernández J. M., Galdo M. (2017). - *Underground pumped-storage hydro*
555 *power plants with mine water in abandoned coal mines.* In: Wolkersdorfer C, Sartz L, Sillanpää M,
556 Häkkinen A (Eds) Mine water and circular economy, Lappeenranta, Finland, IMWA 2017.
557 https://www.imwa.info/docs/imwa_2017/IMWA2017_Menendez_6.pdf (consulté le 05/07/2020).
- 558 Menéndez J., Fernández-Oro J. M., Loredo J. (2020). - *Economic Feasibility of Underground*
559 *Pumped Storage Hydropower Plants Providing Ancillary Services.* Appl. Sci. 2020, 10, 3947.
560 <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/11/3947/htm> (consulté le 05/07/2020)
- 561 MTES (2019). - *Programmation Pluriannuelle de l'Energie (2019-2023, 2024-2028). Projet pour*
562 *consultation.* Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 396 p., https://www.ecologique-solaire.gouv.fr/sites/default/files/ppe_pour_consultation_du_public.pdf (consulté le 25/02/2020).
- 563 Niemann A., Balmes J. P., Schreiber U., Wagner H. J., Friedrich T. (2018). - *Proposed*
564 *Underground Pumped Hydro Storage Power Plant at Prosper-Daniel Colliery in Bottrop : State of*
565 *Play and Prospects.* In: Mining Report, **154/3:** 214-223.
- 566 Pérez-Díaz J. I., Cavazzini G., Blázquez F., Platero C., Fraile-Ardanuy J., Sánchez J. A., Chazarra
567 M. (2014). - *Technological developments for pumped-hydro energy storage.* Mechanical Storage
568 Subprogramme, Joint Programme on Energy Storage, Eur. Energy Res. Alliance, May 2014.
- 569 Poty E., Chevalier E. (2004). - *L'activité extractive en Wallonie. Situation actuelle et*
570 *perspectives.* Rapport, Ministère de la Région wallonne, Direction générale de l'Aménagement du
571 territoire, du Logement et du Patrimoine. 85 p.
- 572 Poulain A. (2018). - *Etude de l'impact sollicitations cycliques au sein d'aquifères non confinés, à*
573 *différentes échelles. Applications à des systèmes de pompage – turbinage en carrières.* Thèse de
574 doctorat, Université de Mons, Belgique.
- 575 Poulain A., de Dreuzy J.-R., Goderniaux P. (2018a). - *Pump Hydro Energy Storage (PHES) in*
576 *groundwater flooded quarries.* Journal of Hydrology, **559:** 1002-1012.
- 577 Poulain A., Goderniaux P., Pujades, E., Dassargues A., Orban P. (2018b). - *Utilisation de mines et*
578 *carrières pour le développement de systèmes de stockage d'énergie par pompage-turbinage : études*
579 *hydrogéologiques en Région wallonne.* Géologues, **196 :** 66-71.
- 580 Pujades E., Willems T., Bodeux S., Orban P., Dassargues A. (2016). - *Underground pumped*
581 *storage hydroelectricity using abandoned works (deep mines or open pits) and the impact on*
582 *groundwater flow.* Hydrogeol. J., **24:** 1531-1546.
- 583 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.
- 584 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 Procedia, **125:** 504-510.
- 585 Pujades E., Jurado A., Orban P., Dassargues A. (2018a). - *Parametric assessment of*
586 *hydrochemical changes induced by underground pumped storage hydropower.* Science of the Total Environment, **659:** 599-611. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.103>
- 587 Pujades E., Jurado A., Orban P., Ayora C., Poulain A., Goderniaux P., Brouyère S., Dassargues A.
588 (2018b). - *Hydrochemical changes induced by underground pumped storage hydropower and their*
589 *associated impacts.* J. of Hydrology, **563:** 927-941. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.041>

- 596 Remacle A. (2009). - Contribution des anciennes carrières à la biodiversité wallonne. Convention
597 "Les carrières en Région wallonne : inventaire et intérêt biologique"(C45). Rapport non publié.
598 Service public de Wallonie, Direction générale opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources
599 naturelles et de l'Environnement, Direction de la Nature, Belgique.
- 600 Salmon R. (2015). - *Note relative à la valorisation d'anciennes mines et carrières en Stations de*
601 *Transfert d'Energie par Pompage (STEP) dans le contexte de la Transition Energétique*. Ineris
602 DRS-15-153745-10023A, <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/drs-15-153745-10023a-note-step-sign%C3%A9-1-1445952822.pdf> (Consulté le 25/02/2020).
- 604 Scott F. M. (1976). - *Hydropower from Underground Pumped Storage. Energy Sources. Part A*
605 Recovery: 217-227. DOI: [10.1080/00908317508945949](https://doi.org/10.1080/00908317508945949).
- 606 Sharma S., Sack A., Adams J. P., Vesper D. J., Capo R. C., Hartsock A., Edenborn H. M. (2013).
607 - *Isotopic evidence of enhanced carbonate dissolution at a coal mine drainage site in Allegheny*
608 *County, Pennsylvania, USA*. Appl. Geochem., **29**: 32-42.
- 609 SIA Partners (2018). - *Stockage d'électricité par STEP : des solutions pour accompagner les*
610 *prochaines étapes de la transition énergétique ?* Publié le 15/05/2018, Consulté le 25/02/2020,
611 [http://www.energie.sia-partners.com/20180515/stockage-delectricite-par-step-des-solutions-pour-](http://www.energie.sia-partners.com/20180515/stockage-delectricite-par-step-des-solutions-pour-accompagner-les-prochaines-etapes-de-la)
612 [accompagner-les-prochaines-etapes-de-la](http://www.energie.sia-partners.com/20180515/stockage-delectricite-par-step-des-solutions-pour-accompagner-les-prochaines-etapes-de-la).
- 613 Sterpejkwicz-Wersocki W. (2014). - *Problem of clogging in drainage systems in the examples of*
614 *the Žur and Podgaje dams*. Arch. Hydro-Eng. Environ. Mech., **61**: 183-192.
- 615 Ursat X., Jacquet-Francillon H., Rafaï I. (2011). - *Expérience d'EDF dans l'exploitation des*
616 *STEP*. SHF : « Pumped storage Powerplants », Lyon, 23-24 novembre 2011.
- 617 Xuan P. T., Van Pho N., Gas'kova O. L., Bortnikova S.B. (2013). - *Geochemistry of surface*
618 *waters in the vicinity of open pit mines at the Cay Cham deposit, Thai Nguyen province, northern*
619 *Vietnam*. Geochem. Int., **51**: 931-938. <https://doi.org/10.1134/S0016702913110062>
- 620 Younger P. L., Banwart S. A., Hedin R. S. (2002). - *Mine Water: Hydrology, Pollution,*
621 *Remediation*. Springer Science & Business Media.