

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

Philippe GOMBERT<sup>(1)</sup>, Angélique POULAIN<sup>(2)</sup>, Pascal GODERNIAUX<sup>(3)</sup>

Philippe ORBAN<sup>(4)</sup>, Estanislao PUJADES<sup>(5)</sup>, Alain DASSARGUES<sup>(6)</sup>

<sup>(1)</sup> Ineris, Parc Technologique Alata, 60550 Verneuil-en-Halatte, France - e-mail: [philippe.gombert@ineris.fr](mailto:philippe.gombert@ineris.fr)

<sup>(2)</sup> Université d'Avignon - e-mail: [angelique.poulain@univ-avignon.fr](mailto:angelique.poulain@univ-avignon.fr)

<sup>(3)</sup> Université de Mons, Geology and Applied Geology - e-mail: [pascal.goderniaux@umons.ac.be](mailto:pascal.goderniaux@umons.ac.be)

<sup>(4)</sup> Hydrogéologie & Géologie de l'Environnement, Université de Liège - e-mail: [p.orban@uliege.be](mailto:p.orban@uliege.be)

<sup>(5)</sup> Department of Computational Hydrosystems, UFZ – Helmholtz Centre for Environmental Research, Permoserstr. 15, 04318 Leipzig, Germany – e-mail: [estanislao.pujades-garnes@ufz.de](mailto:estanislao.pujades-garnes@ufz.de)

<sup>(6)</sup> Hydrogéologie & Géologie de l'Environnement, Université de Liège - e-mail: [alain.dassargues@uliege.be](mailto:alain.dassargues@uliege.be)

Les Stations de Transfert d'Énergie 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 CLEFS :** Station de transfert d'énergie par pompage ; stockage d'énergie ; risques ; mines ; carrières

## *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.

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

### **I INTRODUCTION**

Apparu en Suisse en 1890, le concept de Station de Transfert d'Énergie 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

49 (ii) à produire de l'électricité par turbinage en période de forte demande ou pour des besoins de  
50 régulation du réseau électrique. À ce jour, il existe plus de 40 STEP dans le monde qui totalisent  
51 une puissance installée de 169 GW et représentent environ 97% des capacités de stockage  
52 d'électricité [IRENA, 2017]. Dans l'Union Européenne, l'énergie électrique produite par turbinage  
53 des STEP correspond actuellement à 323 TWh/an pour un potentiel estimé à plus de 1000 TWh/an.  
54 Compte-tenu du développement attendu des énergies renouvelables, dont une partie est  
55 intermittente (éolien, solaire), les STEP seraient un excellent moyen pour intégrer cette production  
56 dans les réseaux électriques en tamponnant leur productivité aléatoire [Pérez-Díaz *et al.*, 2014].

57 Sur le plan technique, l'énergie potentielle renfermée dans 1 m<sup>3</sup> d'eau chutant de 100 m est de  
58 0,273 kWh, soit environ 1 MJ. En considérant le même dénivelé mais pour un volume d'un million  
59 de m<sup>3</sup> d'eau et un rendement de 90%, on obtient une capacité de stockage d'énergie de 245 MWh.  
60 Une telle capacité permettrait, lors de chaque cycle de pompage-turbinage, de stocker la production  
61 maximale d'électricité d'un champ de 10 éoliennes terrestres pendant 12 h, ou de fournir l'énergie  
62 excédentaire demandée lors des pointes de consommation d'électricité journalières qui surviennent  
63 pendant quelques heures. La gestion de ces pointes nécessite la plupart du temps le démarrage de  
64 moyens de production rapide et massive d'électricité comme les centrales à fioul, les turbines à gaz,  
65 les centrales hydrauliques ou les STEP [Higounenc et Sécher, 2016].

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

73 Néanmoins, en France, le récent projet de Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE) a fixé  
74 pour objectif une augmentation des capacités de production des STEP de 1,5 à 2 GW d'ici 2035  
75 [MTES, 2019]. En outre, la Loi de transition énergétique pour la croissance verte, promulguée en  
76 2015, a décidé de porter la part des énergies renouvelables à 23% de la consommation d'énergie en  
77 2020, soit environ 352 TWh par an, ce qui nécessitera une importante capacité de stockage [Ineris,  
78 2016].

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

## 86 **II PRÉSENTATION DE LA TECHNOLOGIE**

### 87 **II.1 STEP conventionnelles**

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

92 La France dispose de 6 STEP conventionnelles construites dans les années 1970-80 avec une  
93 puissance de 4,9 GW en turbinage et exploitées sur des cycles journaliers à hebdomadaires [Ursat *et*  
94 *al.*, 2011]. Bien que le potentiel d'implantation soit estimé à 6 GW supplémentaires [Barbaux,  
95 2017] et que la Programmation Pluriannuelle des Investissements ait initialement prévu l'installation  
96 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 Coe  
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 m<sup>3</sup> 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 carrières<sup>1</sup> (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 ».

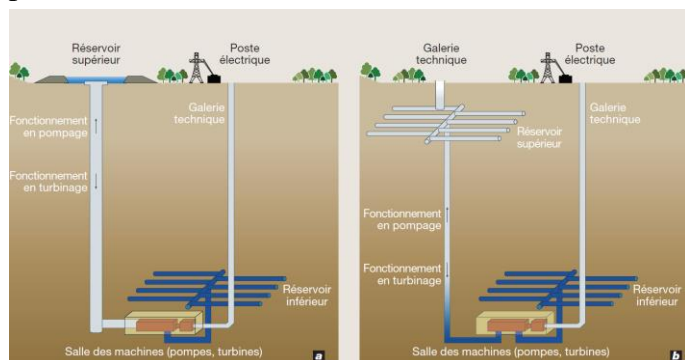
126 Il est intéressant de réaliser un calcul prospectif de ce que pourrait apporter cette technologie de  
127 stockage d'énergie à l'échelle d'un pays. Cela a été réalisé par l'Ineris [2016] pour la France dans le  
128 cas de STEP-3S, sur la base d'une hauteur de chute de 500 m et d'un volume de réservoirs de  
129 100 000 m<sup>3</sup> 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 dénivelés 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).

---

<sup>1</sup> 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.

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

## 153 III STEP DE SURFACE EN MINES OU CARRIERES

### 154 III.1 Principe et exemples

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

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

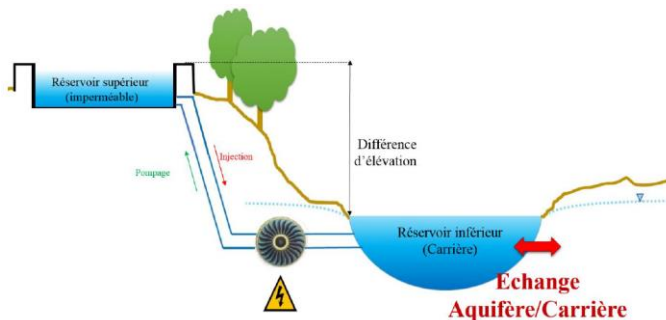
166 En Belgique, le projet SMARTWATER [Cluster TWEED, 2018] financé par la Wallonie entre  
167 2014 et 2018, avait pour objectif de fournir des réponses quant à l'implémentation de STEP utilisant  
168 des sites miniers ou carriers préexistants. Ce projet a fait intervenir des collaborations  
169 pluridisciplinaires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

### 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.

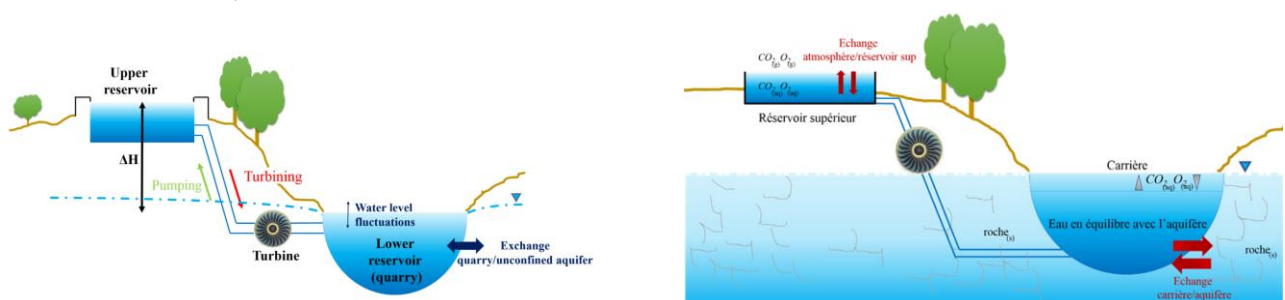
186 En Belgique, un inventaire des sites miniers et carriers de Wallonie, a été réalisé afin d'estimer le  
 187 potentiel de stockage disponible. En 2001, il existait environ 964 carrières inscrites en zone  
 188 d'extraction aux plans de secteur [Caudron *et al.*, 1995 ; Poty et Chevalier, 2004] et 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  
 199 **Figure 2. Représentation simplifiée du concept de STEP en carrière (à g.) et exemple de la**  
 200 **carrière de Maizeret en Belgique (à d.) [Poulain, 2018]**

201 **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 hydrogéochimique [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 CO<sub>2</sub> 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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 Mm<sup>3</sup> 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 Mm<sup>3</sup> 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.

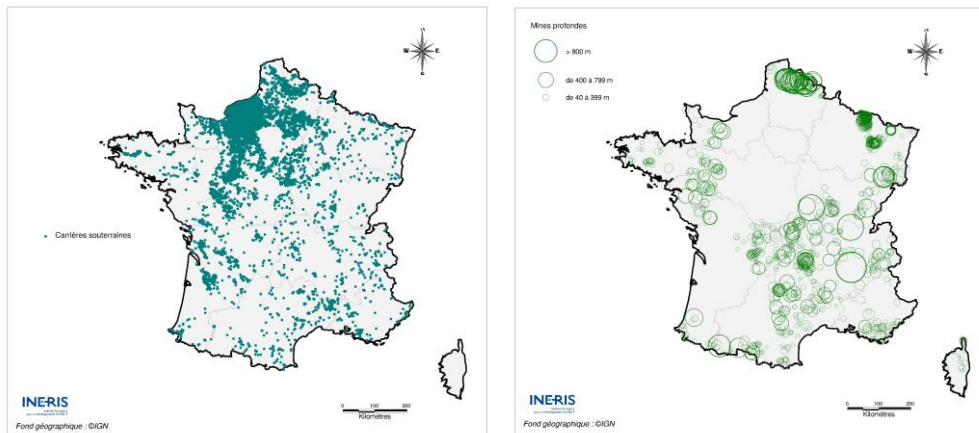
### 305 **IV.2 Potentiel**

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 souterrains 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 Mm<sup>3</sup>) et une profondeur (<200 m) modestes et elles renferment des gaz de pétrole

312 liquéfié (GPL) qu'il faudra tout d'abord éliminer. Les cavités salines semblent plus intéressantes car  
313 elles renferment essentiellement du gaz naturel sous pression et possèdent des caractéristiques plus  
314 imposantes : jusqu'à 1 Mm<sup>3</sup> de volume chacune, et entre 900 et 1500 m de profondeur. Mais elles  
315 sont creusées dans le sel qui, outre qu'il est moins résistant aux sollicitations mécaniques, est une  
316 roche très soluble à l'eau : cela nécessiterait d'utiliser de la saumure saturée qui est un liquide très  
317 corrosif, notamment pour les pompes et turbines. Quant aux cavités souterraines abandonnées, on  
318 ne connaît la localisation que d'environ 10% d'entre elles, à savoir 6 000 sites miniers et 30 000  
319 carrières (Figure 4). Toutefois, leur profondeur, leurs dimensions et leur état de stabilité sont  
320 souvent inconnus, ce qui nécessite un important travail d'inventaire avant de pouvoir juger de leur  
321 potentiel de reconversion en STEP-3S. Leurs caractéristiques principales sont les suivantes :

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



335  
336 **Figure 4. Localisation des carrières (à g.) et des mines (à d.) souterraines connues en France**  
337 **[Ineris, 2016]**  
338

339 En Belgique, bien que le réservoir inférieur puisse être foré ou excavé, l'option envisagée en  
340 Wallonie consiste à utiliser les cavités existantes des anciennes exploitations souterraines. Cette  
341 option est séduisante car elle offrirait des perspectives intéressantes de développement économique  
342 après l'arrêt de l'exploitation minière et comme réhabilitation de sites industriels. Dans le cadre du  
343 projet Smartwater, un inventaire des cavités pouvant être utilisées comme réservoir souterrain d'une  
344 STEP-3S a été réalisé. Cet inventaire a permis d'identifier environ 300 sites en Wallonie, regroupés  
345 en trois catégories : les concessions minières de houille, les mines métalliques et les carrières  
346 d'ardoises ou de marbres noirs [Archambeau *et al.*, 2016]. Sur la plupart de ces sites, les activités  
347 d'extraction sont terminées depuis plus de 30 ans. Un double défi existe donc, d'une part, pour  
348 retrouver et exploiter les informations sur ces exploitations (afin de redéfinir la géométrie des  
349 cavités existantes en fin d'exploitation) et, d'autre part, pour déterminer l'état actuel des cavités qui  
350 se trouvent pour la plupart sous eau après l'arrêt des pompes d'exhaure. Un travail au cas par cas  
351 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 événements 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 minerais, 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 nivellement, 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'O<sub>2</sub> et de CO<sub>2</sub> 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 rédox. 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 le 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 CO<sub>2</sub> 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

452 des installations mais également déplacer les équilibres chimiques au sein de l'aquifère et induire  
453 une altération de la qualité des eaux voire la fragilisation de la roche encaissante par dissolution. Il  
454 apparait donc indispensable d'approfondir les connaissances hydrochimiques de chaque site minier  
455 ou carrier pouvant faire office de STEP et de mettre préalablement en place une modélisation  
456 réaliste couplant écoulement souterrain et hydrochimie. Enfin, bien que peu étudié, il existe un  
457 risque potentiel de prolifération bactérienne, inhérent aux perturbations qualitatives induites par le  
458 fonctionnement d'une STEP-3S.

#### 459 *IV.3.5 Emissions de gaz*

460 Les émissions de gaz sont essentiellement liées aux STEP semi-souterraines au sein desquelles le  
461 transfert de grands volumes d'eau de la surface vers le fond implique celui de grands volumes d'air  
462 en sens inverse [Ineris, 2016]. Le premier risque, d'ordre quantitatif, concerne l'effet de souffle  
463 susceptible de se produire au niveau des têtes de puits. Mais il faut également prendre en compte un  
464 risque qualitatif lié à la composition spécifique de certaines atmosphères souterraines (présence de  
465 CH<sub>4</sub>, de radon, de CO<sub>2</sub>, déficit d'O<sub>2</sub>), notamment en cas de réutilisation d'anciennes mines. Cela  
466 peut être à l'origine d'émissions d'air vicié - potentiellement asphyxiant, toxique, inflammable ou  
467 explosif - qui imposera le suivi de la qualité de cet air.

## 468 **V CONCLUSIONS**

469 Pour contribuer à l'utilisation harmonieuse des énergies renouvelables, il convient de mettre en  
470 place des solutions de stockage et de production d'énergie. Les STEP sont actuellement la  
471 technologie de stockage de masse la plus mûre mais leur potentiel de développement est limité  
472 dans certains pays. C'est pourquoi le recours à des STEP en mines et carrières superficielles ou  
473 souterraines est suggéré. Il pourrait s'agir de STEP conventionnelles utilisant un bassin préexistant  
474 comme réservoir inférieur ou de STEP-3S disposant d'au moins un réservoir souterrain.

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

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

## 486 **VI REMERCIEMENTS**

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

## 491 **REFERENCES**

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

494 Akinyele D. O., Rayudu R. K. (2014). - *Review of energy storage technologies for sustainable  
495 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)

496 Archambeau P., Bodeux S., Cerfontaine B., Charlier R., Dassargues A., Erpicum S., Fripiat C.,  
497 Goderniaux P., Piroton 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-](https://ww2.energy.ca.gov/2017publications/CEC-500-2017-042/CEC-500-2017-042.pdf)  
507 [2017-042.pdf](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., Piroton 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-](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)  
525 [fr/smartwater-stockage-energetique-par-turbinage-pompage-hydroelectrique-conferences-et-visite-](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)  
526 [froyennes-17-mai-2018.html?IDC=6903&IDD=113281](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-](https://eera-es.eu/wp-content/uploads/2016/03/EERA_Factsheet_Underground-Pumped-Hydro-Energy-Storage_not-final.pdf)  
529 [Hydro-Energy-Storage\\_not-final.pdf](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-](https://doi.org/10.1007/s10498-005-6246-7)  
533 [6246-7](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<sup>e</sup> 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.enseiht.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-](https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/ineris-dossier-ref-stockage-souterrain.pdf)  
544 [ref-stockage-souterrain.pdf](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](https://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., Loredó 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](https://www.imwa.info/docs/imwa_2017/IMWA2017_Menendez_6.pdf) (consulté le 05/07/2020).

558 Menéndez J., Fernández-Oro J. M., Loredó 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-](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ppe_pour_consultation_du_public.pdf)  
563 [solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ppe\\_pour\\_consultation\\_du\\_public.pdf](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ppe_pour_consultation_du_public.pdf) (consulté le 25/02/2020).

564 Niemann A., Balmes J. P., Schreiber U., Wagner H. J., Friedrich T. (2018). - *Proposed*  
565 *Underground Pumped Hydro Storage Power Plant at Prosper-Daniel Colliery in Bottrop : State of*  
566 *Play and Prospects*. In: Mining Report, **154/3**: 214-223.

567 Pérez-Díaz J. I., Cavazzini G., Blázquez F., Platero C., Fraile-Ardanuy J., Sánchez J. A., Chazarra  
568 M. (2014). - *Technological developments for pumped-hydro energy storage*. Mechanical Storage  
569 Subprogramme, Joint Programme on Energy Storage, Eur. Energy Res. Alliance, May 2014.

570 Poty E., Chevalier E. (2004). - *L’activité extractive en Wallonie. Situation actuelle et*  
571 *perspectives*. Rapport, Ministère de la Région wallonne, Direction générale de l’Aménagement du  
572 territoire, du Logement et du Patrimoine. 85 p.

573 Poulain A. (2018). - *Etude de l’impact sollicitations cycliques au sein d’aquifères non confinés, à*  
574 *différentes échelles. Applications à des systèmes de pompage – turbinage en carrières*. Thèse de  
575 doctorat, Université de Mons, Belgique.

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

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

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

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

587 Pujades E., Orban P., Jurado A., Ayora C., Brouyère S., Dassargues, A. (2017b). - *Water chemical*  
588 *evolution in Underground Pumped Storage Hydropower plants and induced consequences*. Energy  
589 Procedia, **125**: 504-510.

590 Pujades E., Jurado A., Orban P., Dassargues A. (2018a). - *Parametric assessment of*  
591 *hydrochemical changes induced by underground pumped storage hydropower*. Science of the Total  
592 Environment, **659**: 599-611. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.103>

593 Pujades E., Jurado A., Orban P., Ayora C., Poulain A., Goderniaux P., Brouyère S., Dassargues A.  
594 (2018b). - *Hydrochemical changes induced by underground pumped storage hydropower and their*  
595 *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-](https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/drs-15-153745-10023a-note-step-sign%C3%A9-1-1445952822.pdf)  
603 [153745-10023a-note-step-sign%C3%A9-1-1445952822.pdf](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-deelectricite-par-step-des-solutions-pour-](http://www.energie.sia-partners.com/20180515/stockage-deelectricite-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-deelectricite-par-step-des-solutions-pour-accompagner-les-prochaines-etapes-de-la).

613 Sterpejkowicz-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., Rafai 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.