

Utilisation de mines et carrières pour le développement de systèmes de stockage d'énergie par pompage-turbinage : études hydrogéologiques en Région wallonne

Angélique Poulain¹, Pascal Goderniaux², Estanislao Pujades³, Alain Dassargues⁴, Philippe Orban⁵.

Introduction

La gestion de la production énergétique implique aujourd'hui de nouveaux défis socio-économiques et environnementaux. Les difficultés sont notamment liées à l'inadéquation entre l'offre et la demande au cours du temps, renforcée par le fait qu'une part de plus en plus importante de **la production provient de sources renouvelables et intermittentes**. L'intégration et la régulation de cette énergie intermittente dans les réseaux est problématique et requiert **des solutions de stockage temporaire**.

L'utilisation de systèmes hydroélectriques de « pompage - turbinage » constitue une solution de stockage parmi les plus efficaces. Ces systèmes sont généralement constitués d'un réservoir supérieur et d'un réservoir inférieur. L'eau est pompée du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur durant les périodes de faible demande et d'excédent de production électrique. Durant les périodes de forte demande, l'eau est relâchée vers le réservoir inférieur, à travers des turbines, afin de produire de l'électricité. La période des cycles est typiquement de quelques heures. La quantité d'énergie consommée et produite dépend de la différence d'élévation entre les deux réservoirs et du volume d'eau concerné.

Ce type de station hydroélectrique utilise classiquement des bassins artificiels imperméables. Récemment, l'idée d'utiliser les nombreuses carrières à ciel ouvert ou carrières/mines souterraines comme bassin de stockage a été émise. Cela offre plusieurs avantages. L'utilisation de ces ouvrages permet d'économiser des coûts de construction de bassins de stockage. La plupart sont situés sous le niveau d'eau naturel de la nappe souterraine et permettent d'avoir à disposition une réserve d'eau directement utilisable. Par ailleurs, ils offrent souvent des volumes exploitables importants. Enfin, ils sont nombreux sur le territoire wallon, en raison d'une activité extractive passée et présente très importante, ce qui permet potentiellement de multiplier le nombre de systèmes pompage-turbinage à différents endroits, et d'intégrer l'électricité produite au sein du réseau électrique de moyenne tension.

Toutefois, leur utilisation s'accompagne également de contraintes importantes.

- **Le dénivelé exploitable est lié à la localisation des sites**, à leur géométrie, à la géomorphologie du lieu, au niveau naturel de la nappe d'eau souterraine. Dans la plupart des cas, la carrière ou la mine peut être utilisée comme bassin inférieur, fonctionnant avec un bassin supérieur à implanter. Le dénivelé exploitable est fortement variable et détermine la rentabilité et la faisabilité des systèmes.
- **Les carrières à ciel ouvert et mines souterraines ne peuvent être considérées comme de simples réservoirs étanches**. Ils sont en effet en interaction forte avec la nappe d'eau souterraine. Lors des activités de pompage - turbinage, les carrières/mines auront tendance à se vider ou se remplir plus ou moins rapidement, en fonction du contexte hydrogéologique. Cela a un impact sur la différence de niveau entre les réservoirs supérieur et inférieur, et donc sur la productivité du système (Pujades *et al.*, 2017).
- **L'alternance et la cinétique des cycles de pompage - turbinage** dans les réservoirs **engendrent des fluctuations rapides et périodiques du niveau d'eau**, qui vont se propager dans le milieu environnant. Cela peut avoir un impact sur d'autres ouvrages éventuels (ex. pompes) à proximité. Ces cycles de charge/décharge dans le milieu rocheux peuvent également engendrer des problèmes de stabilité potentiellement importants dans certains milieux rocheux. Ces problèmes de stabilité peuvent par exemple avoir lieu au niveau des parois de la carrière, des piliers des mines souterraines, ou dans des zones de roches altérées sous forme d'effondrement localisés. Ces effondrements localisés sont par exemple régulièrement observés autour de certaines carrières calcaires où la nappe d'eau souterraine est rabattue par pompage d'exhaure.

Dans ce contexte, l'objectif du projet SMARTWATER est d'étudier la faisabilité de tels systèmes, en examinant la problématique d'un point de vue multidisciplinaire (Epicum *et al.*, 2017). Le projet est constitué de différents volets abordant les aspects électriques, électromécaniques, hydrogéologiques, hydrauliques, géomécaniques, économiques, environnementaux, et législatifs. Cet article présente les résultats obtenus concernant le volet hydro-

1. Geology and Applied Geology, Université de Mons, Belgique. Courriel : Angélique.POULAIN@umons.ac.be

2. Geology and Applied Geology, Université de Mons, Belgique. Courriel : Pascal.Goderniaux@umons.ac.be

3. Hydrogeology and Environmental Geology, Université de Liège, Belgique. Now at Department of Computational Hydrosystems, UFZ - Helmholtz Centre for Environmental Research. Courriel : estanislao.pujades@gmail.com

4. Hydrogeology and Environmental Geology, Université de Liège, Belgique. Courriel : alain.dassargues@uliege.be

5. Hydrogeology and Environmental Geology, Université de Liège, Belgique. Courriel : p.orban@uliege.be

géologique, et l'étude des interactions entre les systèmes de pompage - turbinage, en carrières et en mines souterraines, et les nappes d'eau souterraine.

Méthodologie

L'approche utilisée par SMARTWATER comprend deux volets : (1) Définition des potentialités et de différents cas-types représentatifs du contexte carriériste et minier en Wallonie ; (2) Développement d'outils de modélisation permettant d'étudier de manière détaillée les différents problèmes hydrogéologiques, hydrauliques et géomécaniques, en relation avec des systèmes de pompage - turbinage en mine ou en carrière.

Modélisation générique de cas-types

D'après l'inventaire du contexte carriériste et minier en Wallonie, environ 1500 carrières et 300 mines sont toujours inscrites au plan de secteur (Caudron *et al.*, 1995 ; Poty and Chevalier, 2004). Parmi celles-ci, environ 200 carrières sont en exploitation. L'ensemble de ces carrières et mines sont situées dans différents contextes lithologiques, essentiellement sédimentaires.

Dans le cadre de l'utilisation de carrière ou de mine comme réservoir inférieur d'une station de pompage - turbinage, les différents sites doivent répondre aux critères suivants :

- le fond de la carrière ou de la mine doit être sous le niveau de la nappe d'eau souterraine et permettre une accumulation d'eau ;
- le site doit se situer dans un environnement topographique favorable à l'implémentation d'un réservoir supérieur en maximisant le dénivelé entre les deux réservoirs ;
- le site doit être facilement accessible au réseau de distribution d'électricité de moyenne tension.

À partir de cet inventaire, différents « cas types » synthétiques ont été établis. Ces cas types sont repré-

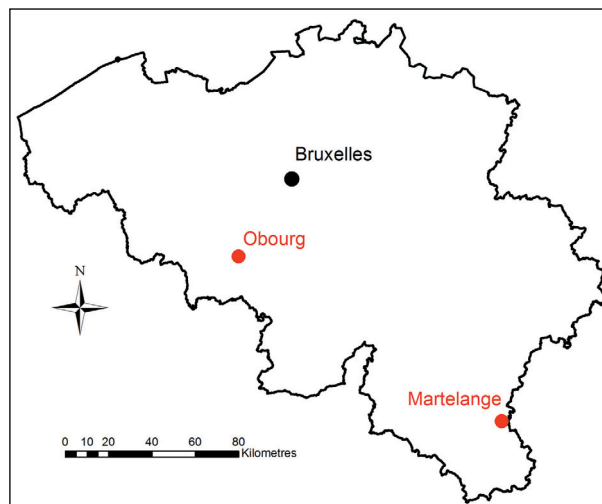


Figure 1. Localisation de la carrière à ciel ouvert de Obourg et des carrières souterraines de Martelange.

sentatifs du contexte wallon en termes de morphologie, de dimensions, de géologie, d'hydrogéologie et de topographie. Leur étude et modélisation génériques apportent des résultats pouvant être associés à une majorité de carrières ou mines existantes. Ils apportent donc des données préliminaires et permettent d'établir des études de pré-faisabilité, avant toute étude plus spécifique. Les différents cas-types sélectionnés et conceptualisés sont résumés dans le tableau 1.

Modélisation de cas réels

Le dimensionnement et l'étude d'incidence relative aux stations de pompage - turbinage imposent de pouvoir simuler l'ensemble du système de manière réaliste et précise. Plusieurs cas réels ont été modélisés dans le cadre du projet Smartwater, en tenant compte explicitement des spécificités géométriques, topographiques, et hydrogéologiques des différents sites. Des scénarios de pompage - turbinage réalistes ont été imposés dans les carrières ou les mines afin d'en quantifier l'impact. Dans cet article, les cas de la carrière de Obourg et de la carrière

	Carrière de craie	Carrière de calcaire	Carrière de roche cristalline magmatique	Carrière de grès	Mine de charbon	Ardoisière
Surface (m ²)	500 x 500 m	175 x 175 m	800 x 800 m	100 x 100 m	-	-
Volume utiles (m ³)	5 000 000 m ³	1 225 000 m ³	76 800 000 m ³	300 000 m ³	30 000 m ³	600 000 m ³
Dénivelé potentiellement exploitable	40 m	100 m	120 m	50 m	500 m	100 m
Conductivité hydraulique	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	10 ⁻⁷	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷
Porosité efficace (%)	16	16	5	14	1-5	1-5

Tableau 1. Caractéristiques hydrogéologiques et morphologiques des différents cas-types conceptualisés. Source : modifié d'après Poulain *et al.*, 2018.

souterraine de Martelange sont présentés (Fig. 1).

La carrière de Obourg, située dans l'Ouest de la Belgique, fait partie d'un ensemble d'anciennes exploitations de craie, utilisées pour la production de ciment. La surface de la carrière étudiée est d'environ 250 000 m² et est entièrement noyée (Fig. 2). La carrière est considérée comme le réservoir inférieur du système de pompage - turbinage. La topographie des lieux permet la construction d'un réservoir supérieur, d'une capacité maximale de 1 million m³, situé 35 m plus haut que le niveau d'eau dans la carrière. À proximité de la carrière, les formations crayeuses affleurent. Plus au Sud, des sédiments sablo-argileux superficiels sont observés. Deux captages exploitant l'aquifère crayeux, sont situés à proximité des carrières de Obourg (Fig. 3).

La carrière souterraine de Martelange, située dans le Sud-Est de la Belgique, a été exploitée pour la production d'ardoises. La cavité souterraine se compose de 9 chambres reliées entre elles par des galeries dont le nombre exact reste inconnu. Le volume utile exploitable est estimé à 400 000 m³. La carrière souterraine est considérée comme le réservoir inférieur du système de pompage - turbinage. Un bassin supérieur de capacité équivalente pourrait être créé à proximité en permettant un dénivelé maximum de 250 m.

Cinq scénarios de pompage - turbinage ont été développés et sont utilisés comme sollicitations des modèles hydrogéologiques. Ces scénarios décrivent la vidange et le remplissage du bassin supérieur, en alternant les phases de pompage, turbinage et arrêts du système, durant quatorze jours. Trois scénarios sont basés sur l'étude journalière du marché de l'électricité à différentes

périodes de l'année (printemps, été et hiver). Les périodes de pompage et de turbinage sont d'environ cinq heures. La succession des différentes phases (pompage/turbinage/arrêt) est plus rapide en hiver, intermédiaire au printemps, et plus lente en été. Les deux derniers scénarios sont générés aléatoirement, avec un changement de phase (pompage/turbinage/arrêt) tous les quarts d'heure suivant une loi uniforme. Ils permettent d'étudier l'impact de cycles de très hautes fréquences.

Description des outils développés pour le volet hydrogéologique

Des modèles numériques 3D simulant les écoulements souterrains ont été développés. Ils permettent d'étudier la sensibilité aux différents paramètres dans le cadre de sollicitations cycliques, de quantifier les volumes d'eau échangés entre les mines ou carrières et le milieu rocheux, de simuler les fluctuations du niveau dans les ouvrages, et d'évaluer la distance d'influence autour de ces ouvrages.

Pour les carrières, des modèles d'écoulement d'eau souterraine ont été développés avec le code de calcul par différences finies MODFLOW (Harbaugh, 2005). Les modèles génériques correspondants aux 4 cas-types carrières sont relativement simples. Ils sont constitués d'une couche d'éléments dont l'épaisseur correspond à la zone saturée en eau de la carrière. L'approximation de Dupuit, l'hypothèse d'un milieu rocheux homogène et d'une nappe libre sont utilisées. Les carrières sont assimilées à un volume vide, de surface carrée, situé au centre d'un maillage de 10 km de côté, correspondant au milieu rocheux. Les modèles développés pour les cas réels intègrent les spécificités de chaque site, de manière réaliste.

Pour les mines/carrières souterraines, le code SUFT3D (Saturated-Unsaturated Flow and Transport and 3D) a été utilisé. Ce code est particulièrement adapté à la

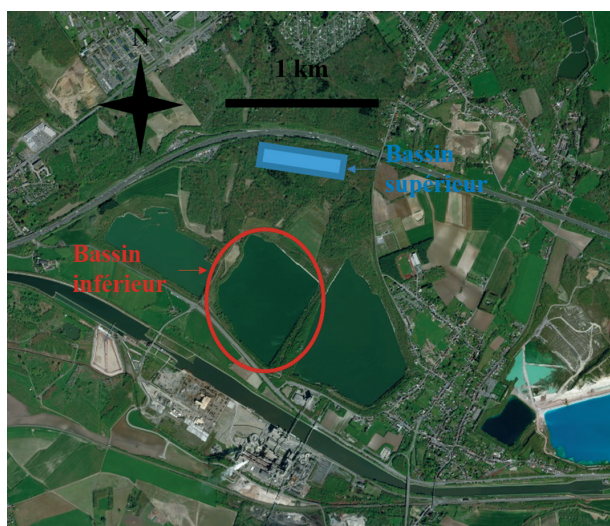


Figure 2. Vue aérienne des anciennes carrières d'Obourg et localisation potentielle du bassin supérieur.

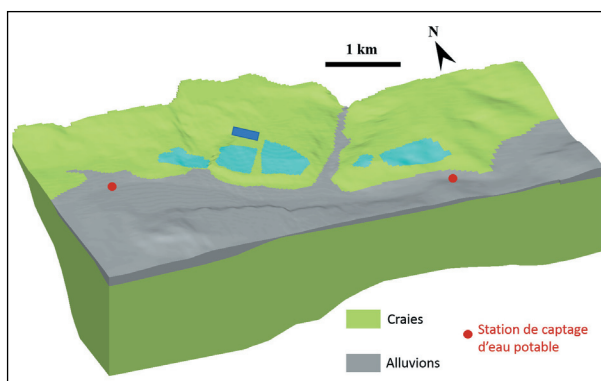


Figure 3. Modèle géologique simplifié de la zone à proximité des anciennes carrières d'Obourg. Les anciennes carrières sont figurées en bleu clair. Le bassin supérieur est figuré en bleu foncé. Source : Ericum et al., 2017.

modélisation des cavités souterraines (Bodeux *et al.*, 2017 ; Brouyère *et al.*, 2009) qui sont représentées comme des réservoirs linéaires tandis que l'encaissant géologique est considéré comme un milieu poreux. Le modèle a été utilisé pour tester différentes configurations de connexions entre les chambres, notamment.

Résultats

Modélisation générique de cas-types carrières

Le tableau 2 montre certains résultats issus des modèles génériques relatifs aux cas-types carrières à ciel ouvert. Les résultats correspondent aux cas types du tableau, et à des cycles de 10 h de période, et de 25 m³/s d'amplitude. La fluctuation du niveau dans la carrière est logiquement très dépendante de la surface de la carrière. À titre d'exemple, les carrières de type « roche cristalline magmatique » sont généralement très étendues en Belgique et, à volumes pompés/turbinés égaux, les fluctuations induites du niveau d'eau y sont plus réduites. Les propriétés hydrauliques du milieu rocheux influencent les échanges d'eau entre la carrière et le milieu rocheux, ainsi que la distance d'influence du pompage - turbinage autour de la carrière. Plus les volumes d'eau échangés sont importants, plus l'amplitude des fluctuations en carrière diminue, par rapport au cas d'un réservoir imperméable. De manière générale, une conductivité hydraulique élevée du milieu rocheux induit donc des fluctuations plus faibles du niveau d'eau dans la carrière, mais une propagation du stress cyclique dans le milieu rocheux plus importante. Lorsque la porosité du milieu rocheux est faible, l'atténuation de la variation du niveau d'eau dans la carrière est moins importante, mais la propagation dans le milieu est plus importante. En ce qui concerne les cas-types simulés, la **diminution de l'amplitude des fluctuations par rapport au cas étanche reste très limitée**. Les carrières de type « roche cristalline magmatique » sont très similaires au cas étanche correspondant. Pour le cas-type « carrière de grès », la diminution avoisine les

3 %, due aux interactions carrière - nappe d'eau souterraine. La distance d'influence absolue dépend des propriétés hydrauliques du milieu et de la valeur des fluctuations dans la carrière. Cette distance d'influence absolue est extrêmement faible pour le cas type « roche cristalline magmatique ». Elle est la plus élevée pour le cas type « calcaire », en raison de la surface limitée de la carrière, et d'un massif rocheux considéré comme relativement perméable. En Belgique, les carrières de ce type sont en effet souvent situées **dans des formations géologiques relativement fracturées**. De manière générale, la distance d'influence augmente également lorsque la fréquence des cycles de pompage – turbinage diminue (Poulain *et al.*, in review).

Modélisation de cas réels

Pour les différents scénarios, les fluctuations du niveau dans les ouvrages sont logiquement corrélées avec les cycles de pompage - turbinage.

La figure 4 (haut) montre les débits de pompage – turbinage utilisés pour la carrière de Obourg et le scénario de type « été ». La figure 4 (bas) montre les fluctuations du niveau d'eau correspondantes dans la carrière, et les débits d'échange avec le milieu rocheux. La figure 5 montre les fluctuations maximales du niveau d'eau autour de la carrière. La distance d'influence maximum est d'environ 700 m. Cette distance d'influence varie peu entre les scénarios utilisés. Ceux-ci contiennent en effet tous un signal multi-fréquentiel, avec présence de basses fréquences décrivant la variabilité de la succession des cycles au cours de la semaine. Ces basses fréquences sont celles qui se propagent le plus loin dans le milieu rocheux. Les résultats correspondant au modèle développé montrent que les fluctuations induites n'entrent pas en interférence avec les captages environnants.

La figure 6 montre un exemple de résultats concernant la carrière souterraine de Martelange, pour un scénario de pompage - turbinage de type aléatoire. Elle

	Carrière de craie	Carrière de calcaire	Carrière de roches cristallines magmatiques	Carrière de grès
Amplitude des fluctuations du niveau d'eau dans la carrière (m)	1.14	9.11	0.45	27.71
Amplitude des fluctuations du niveau d'eau dans la carrière si celle-ci est considérée étanche (m)	1.15	9.35	0.45	28.65
Distance d'influence dans le milieu rocheux (m)	57	82	6	27

Tableau 2. Résultats relatifs aux différents cas types, et correspondant à des cycles de pompage - turbinage sinusoïdaux de 10 h de période, et de 25 m³/s d'amplitude. Source : modifié d'après Poulain *et al.*, 2018.

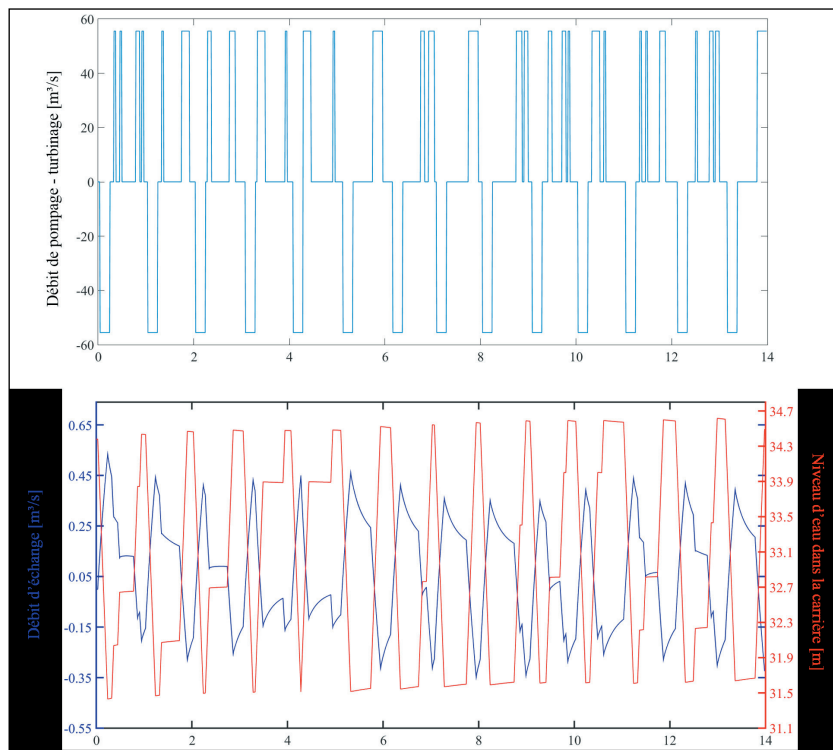


Figure 4. Débits de pompage - turbinage pour le scénario de type "été" (haut). Évolution du niveau de l'eau dans la carrière et des débits d'échanges entre l'aquifère et la carrière (bas). Source : Ercicum et al., 2017.

montre l'évolution temporelle des débits échangés entre chaque chambre de la carrière. Dans le modèle développé, les 9 chambres souterraines sont considérées comme en équilibre avec la pression atmosphérique, et reliées entre elles par deux galeries de connexion. Ces premiers résultats montrent que, pour les hypothèses

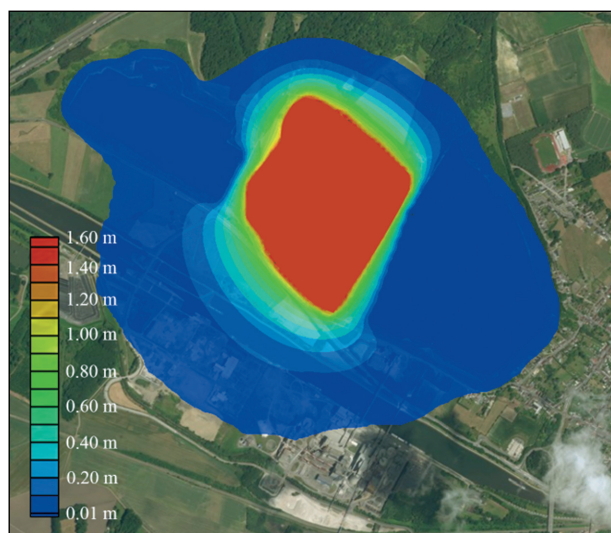


Figure 5. Distribution spatiale des fluctuations maximum du niveau d'eau autour de la carrière, simulée pour le scénario de pompage - turbinage de type « Été ». Source : Ercicum et al., 2017.

prises en compte pour le cas de Martelage, les échanges d'eau entre les cavités et le milieu rocheux restent limités. De même, la zone impactée par les rabattements engendrés par les activités de pompage/turbinage reste limitée.

Conclusions

L'utilisation de carrières ou mines/carrières souterraines comme bassin de systèmes de stockage hydroélectrique par pompage - turbinage semble intéressante, tant en termes de coût que de réutilisation du territoire. L'utilisation de telles cavités nécessite cependant de bien étudier leur fonctionnement ainsi que les interactions existantes entre ces cavités et les eaux souterraines présentes dans le milieu géologique environnant. Le projet Smartwater a mis en place des outils permettant de simuler de manière réaliste et fiable, le fonctionnement et l'impact environnemental de tels systèmes.

Pour les carrières, les modèles génériques et déterministes développés permettent de mettre en évidence que la variable la plus contraignante pour l'installation de tels systèmes est l'impact environnemental autour de la carrière. Les volumes d'eau échangés entre la cavité et le milieu rocheux peuvent diminuer les fluctuations du niveau d'eau dans la cavité, et affecter la productivité dans certains cas, mais l'impact reste très modéré. Pour

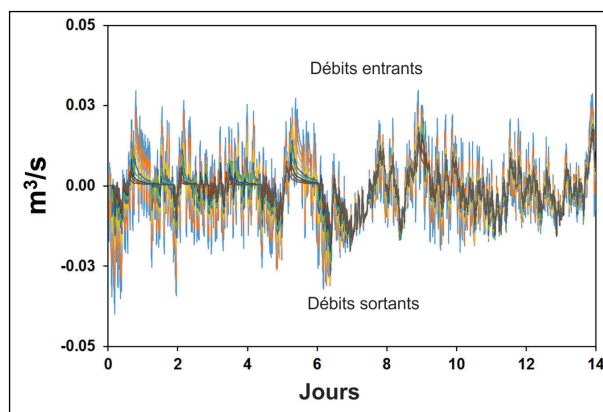


Figure 6. Évolution temporelle des débits échangés entre chaque chambre (1 couleur par chambre) et le milieu souterrain environnant pour les 14 premiers jours de simulation pour le scénario aléatoire 1, des chambres à pression atmosphérique et deux galeries de connexion entre les chambre. Par comparaison, le débit pompé/turbiné est de l'ordre de 22 m³/s.

les mines ou carrières souterraines, la fluctuation du niveau d'eau dans la cavité reste par contre une variable importante.

La mise en œuvre réelle de tels systèmes nécessiterait cependant de réaliser des caractérisations plus précises. La géométrie réelle des cavités souterraines reste souvent mal connue, de même que l'hétérogénéité du milieu souterrain. L'évolution de la qualité de l'eau souterraine suite aux cycles de pompage/turbinage devrait également être étudiée. L'eau, aérée et réinjectée de manière cyclique dans le milieu rocheux, peut en effet modifier les équilibres hydrogéochimiques (Pujades *et al.*, 2017).

Remerciements

Cette recherche est financée par le Service Public de Wallonie, Direction générale opérationnelle de l'Aménagement du territoire, du Logement, du Patrimoine et de l'Énergie, dans le cadre du projet SMARTWATER. Les scénarios de pompage – turbinage basés sur l'étude du marché de l'électricité ont été développés par le centre de recherche Multitel et le 'Hydraulics in environmental and civil engineering Group' de l'Université de Liège.

Références

- Bodeux S., Pujades E., Orban P., Brouyère S. et Dassargues A., 2017. Interactions between groundwater and the cavity of an old slate mine used as lower reservoir of an UPSH (Underground Pumped Storage Hydroelectricity): A modelling approach. *Eng. Geol.* 217, 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.12.007>
- Brouyère S., Orban P., Wildemeersch S., Couturier J., Gardin N. et Dassargues A., 2009. The Hybrid Finite Element Mixing Cell Method: A New Flexible Method for Modelling Mine Ground Water Problems. *Mine Water Environ.* 28, 102-114. <https://doi.org/10.1007/s10230-009-0069-5>
- Caudron M., Chevalier E., Barchy L. et Poty E., 1995. Inventaire des ressources du sous-sol et des besoins à termes de l'industrie extractive en Région wallonne, Conventions Région wallonne (DGATLP) / Université de Liège - rapports non publiés.
- Ercicum S., Archambeau P., Dewals B., Piroton M., Pujades E., Orban P., Dassargues A., Cerfontaine B., Charlier R., Poulain A., Goderniaux P., Ronchi B., Fripiat C. et Veschkens M., 2017. Underground pumped hydro-energy storage in Wallonia (Belgium) using old mines - Potential and challenges.
- Harbaugh A.W., 2005. MODFLOW-2005: the U.S. Geological Survey modular ground-water model--the ground-water flow process (USGS Numbered Series No. 6-A16), Techniques and Methods.
- Poty E. et Chevalier E., 2004. L'activité extractive en Wallonie. Situation actuelle et perspectives. Rapport, Ministère de la Région wallonne, Direction générale de l'Aménagement du territoire, du Logement et du Patrimoine.
- Poulain A., De Dreuzy J.-R., Goderniaux P., 2018. Pump Hydro Energy Storage systems (PHES) in groundwater flooded quarries. *Journal of Hydrology*. In press.
- Pujades E., Orban P., Bodeux S., Archambeau P., Ercicum S. et Dassargues A., 2017. Underground pumped storage hydropower plants using open pit mines: How do groundwater exchanges influence the efficiency? *Appl. Energy* 190. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.093>
- Pujades E., Orban Ph., Jurado A., Ayora C., Brouyère S. et Dassargues A., 2017, Water chemical evolution in Underground Pumped Storage Hydropower plants and induced consequences, *Energy Procedia*, 125, 504-5.