

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de
Master Ingénieur Civil des Constructions par

PESESSE CORENTIN

Faisabilité de projets de pompage-turbinage basés sur d'anciennes galeries minières

Membres du jury : S. Erpicum, R. Charlier, B. Dewals et V. Lognay



Année académique 2012-2013

UNIVERSITÉ DE LIÈGE - FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

Résumé

« Faisabilité de projets de pompage-turbinage basés sur d'anciennes galeries minières », par PESESSE CORENTIN, Ingénieur Civil des Constructions, 2012-2013.

Le présent travail étudie la faisabilité technico-économique d'un système de pompage-turbinage exploitant d'anciennes galeries minières ou d'anciennes carrières souterraines (« STEP minier ») comme réservoir inférieur, et ce plus particulièrement en Région wallonne. Ce travail aborde tout d'abord l'organisation et les caractéristiques du réseau électrique belge, dans le but de déterminer le rôle que pourrait jouer un projet de STEP minier au sein de ce réseau. Ensuite, les types de cavités existantes sont décrits afin d'en déterminer les caractéristiques qui les rendent propices à ce type de projet. Enfin, les systèmes hydrauliques de pompage-turbinage sont étudiés, ainsi que les écoulements en galeries, tous deux nécessaires à la réalisation d'un STEP minier. En guise d'exemples, l'ensemble de ces études est appliqué à deux cas particuliers. Il en ressort que ce projet de STEP minier a un potentiel d'avenir, et qu'il mérite des études plus approfondies, notamment concernant le « smart grids », la caractérisation du patrimoine minier existant, l'étude technique des phénomènes hydrodynamiques ainsi que la stabilité de la cavité soumise au cycle de charge-décharge, et finalement le développement de nouvelles technologies permettant de diminuer les investissements.

Abstract

« Feasibility of a pumped-storage project using old mining complex », by PESESSE CORENTIN, Civil Engineer, 2012-2013.

This study examines the technical and economical feasibility of a pumped-storage project using old mining complex as lower tank, and this, more specifically in the Wallonia region. Firstly the organization and characteristics of the Belgian electricity network will be studied in order to determine the potential of such a project within the network. Then, types of existing cavities will be considered in order to determine the characteristics that make them suitable for this type of project. Finally, the hydraulic pump-turbine and the flows in the galleries will be studied, as they both are necessary for the realization of such a project. Serving as an example, all these studies are being applied to two particular cases. This project seems to be interesting for the future, and deserves further study, especially regarding the "smart grids", the characterization of the existing mining heritage, the technical study of hydrodynamic phenomena and stability of the mining complex permanently loaded by a charge-discharge cycle, and finally the development of new technologies able to reduce money investment.

Remerciements

Ce travail est le fruit de nombreuses rencontres et d'échanges. Plus que les livres, ce sont très certainement ces échanges qui m'ont permis de mieux cerner les problèmes et d'arriver aux résultats présentés.

Je tiens tout d'abord à remercier mon promoteur, M. Erpicum, ainsi que les trois autres membres du jury, M. Charlier, M. Dewals et M. Lognay, pour leur soutien, leur disponibilité et leurs conseils tout au long du travail. C'était une chance d'avoir d'un côté un jury constitué d'une part de membres du corps professoral, et d'autre part d'un ingénieur de chez Electrabel. Cela m'a permis d'avoir deux points de vue complémentaires sur le sujet.

Ce travail comporte vraiment un aspect multi-disciplinaire. J'ai été amené à consulter différents services de l'Université de Liège. Je tiens à remercier M. Dassargues pour ses conseils de géohydrolicien, M. Ernst pour la partie « smart grids », ainsi que M. Denoël, M. Stilmant et Mlle Dieudonné pour leurs aides et leurs conseils divers.

Une étude de faisabilité implique de connaître les contextes économiques et pratiques dans lequel le projet se situe. C'est ainsi que je veux remercier aussi mes nombreux contacts dans le milieu extra-académique.

En ce qui concerne la compréhension du réseau électrique, M. Lambin et M. Druet de chez ELIA, ainsi que M. Feye de chez ORES.

Dans le domaine des mines, M. De Bruyn du Centre d'archives de Blegny, M. Pacyna du SPW à Namur, M. Bamboneyho et M. Masson du SPW à Liège pour la facilité avec laquelle ils m'ont permis d'accéder aux archives, ainsi que M. Drevet et M. Berger de l'ISSeP.

Pour les turbomachines et le système de pompage-turbinages, M. François, qui m'a fait visiter la centrale de Coe, M. Nahan de la HERS, M. Verraes et son associé de la société Merytherm, ainsi que M. Herbillon du SPW.

J'ai eu également la chance de discuter avec le spéléologue M. Duseigne, ainsi qu'avec M. Klerks spéléoplongeur ; je les remercie chaleureusement. Les informations qu'ils m'ont apportées étaient indispensables à mon travail.

Pour l'évaluation économique des solutions techniques, je tiens à remercier M. Counasse du bureau Greisch ainsi que M. Viroux du bureau Galère pour m'avoir aidé au calcul

d'un ordre de grandeur de prix pour une centrale sur le site de l'ardoisière de Martelange.

Merci à Mme Anceau pour ses conseils bibliographiques.

Sans oublier les membres de ma famille et mes amis pour leur conseils et la relecture tout au long du travail.

Merci à vous tous, que vous ayez contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	i
Remerciements	ii
Table des matières	iv
Table des figures	vii
1 Energie électrique	1
1.1 Contexte	1
1.1.1 Au XXe siècle	1
1.1.2 Et au XXIe siècle ?	3
1.1.3 Les acteurs de l'électricité en Belgique	6
1.2 Le stockage	8
1.2.1 Les services du stockage	9
1.2.2 Quels services utiles à quels acteurs	10
1.2.3 Les différentes technologies	12
1.3 Le projet : utiliser d'anciennes galeries désaffectées en guise de bassin inférieur	14
1.3.1 Place du projet dans le réseau actuel et futur	15
1.3.2 Divers problèmes liés au projet	17
2 Les cavités souterraines	24
2.1 Trouver un site adéquat : méthode de travail	24
2.1.1 Analyse des terrils	25
2.1.2 Analyse historique	25
2.1.3 Analyse basée sur des informations directes	26
2.2 Types de cavités souterraines et leurs caractéristiques	28

2.2.1	Les charbonnages	29
2.2.2	Les carrières souterraines	34
2.2.3	Mines métalliques	39
2.2.4	Résumé des caractéristiques de chaque type de cavité	39
2.3	Puissances et cycles des STEP miniers	40
2.4	Choix d'un type de cavité souterraine	44
2.5	Gestion de l'eau et conflits d'utilisation	46
2.5.1	Rabattement de la nappe	46
2.5.2	Effet cyclique de remplissage-vidage	48
2.5.3	Conflits d'utilisations	48
3	Ecoulement hydraulique et système de pompage turbinage	52
3.1	Ecoulement en galerie	52
3.2	Rendement d'un système de pompage-turbinage	55
3.3	Différents systèmes de mise en place	56
3.3.1	Caverne classique	57
3.3.2	Large puits	58
3.3.3	Système compact	59
3.4	Les différentes turbomachines	61
3.5	Dimensionnement de la conduite	63
4	Deux études de cas	65
4.1	Le charbonnage de Gosson-Kessales	65
4.1.1	Volume disponible	66
4.1.1.1	Méthodologie	66
4.1.1.2	Résultats et analyse paramétrique	72
4.1.2	Volume exploitable (érosion)	73
4.1.3	Effet d'un éboulement sur le volume disponible	80
4.1.3.1	Méthodologie	81
4.1.3.2	Résultats et analyse paramétrique	83
4.1.4	Venues d'eau, impact sur le rendement	88
4.1.5	Conclusion	90
4.2	L'ardoisière de Martelange	92
4.2.1	Volume et situation	92
4.2.2	Erosion, hydrodynamique, débits d'infiltration	96
4.2.3	Faisabilité économique et conclusion	98
5	Conclusion	105

Table des figures

1.1	Schéma d'une station de pompage-turbinage [Anonyme, 2013]	3
1.2	Evolution du parc éolien en Belgique, d'après [Huart (dir.), 2013a]	4
1.3	Stratification du réseau électrique [Beguín et Corhay, 2011]	6
1.4	Position d'ELIA dans le marché [ELIA, 2013b]	7
1.5	Aspect local d'une petite centrale de stockage	16
1.6	Plan wallon éolien [SPW, 2013a]	17
1.7	Carte du réseau haute tension belge [J.-J. Lambin, comm. pers., 2013]	18
2.1	Logiciel : informations sur les puits en Région wallonne [J.-M. Bomboneyho, comm. pers, 2013]	28
2.2	Vue en plan de la mine de Gosson - Archive du SPW après reconstitution . .	29
2.3	Gisements charbonniers - position géographique [Erren, 2011]	30
2.4	Charbonnage à une altitude supérieure à la vallée adjacente	31
2.5	Charbonnage profond nécessitant une pompe d'exhaure	31
2.6	Schéma d'un charbonnage [Demarles, 2009]	32
2.7	Schéma d'une porte d'aérage [Stassen, 1966]	33
2.8	Photo d'une porte d'aérage [Stassen, 1966]	33
2.9	Carrière souterraine multi-étagée à flanc de vallée	36
2.10	Ardoisière de Martelange schématisée	37
2.11	Ardoisières - position géographique	38
2.12	Stockage sur un seul niveau de galerie	41
2.13	Stockage sur plusieurs niveaux de galerie	42
2.14	Puissances disponibles pour les sites les plus puissants	44
2.15	Puissances disponibles pour les sites les moins puissants	45
2.16	Pollution possible lors de la remontée d'une nappe phréatique	47
3.1	Galerie idéalisée - schéma [Pummer, 2013]	53
3.2	Galerie idéalisée - photo du modèle réduit [Pummer, 2013]	53

3.3	Niveau d'eau de la galerie principale, d'après [Pummer, 2013]	54
3.4	Le réseau de galerie à droite est moins sensible aux phénomènes parasites d'oscillations que celui de gauche [Pummer, 2013]	54
3.5	Schéma de positionnement d'une caverne	58
3.6	Système par puits large	58
3.7	Système compact	59
3.8	Choix d'un type de turbine [Groussier, 2012]	64
4.1	Volume disponible au sein d'un réseau de galeries	66
4.2	Zone complexe d'un plan	67
4.3	Incohérence entre plans	68
4.4	Sections types de galeries d'après [Stassen, 1986]	70
4.5	Bornes du coefficient de forme	70
4.6	Réseau de galeries comportant des boucles	71
4.7	Principe de la routine Matlab pour calculer le volume total disponible . . .	71
4.8	Influence du diamètre sur le volume disponible (Coef. forme = 0,9)	72
4.9	Influence du coefficient de forme ($D = 3m$)	73
4.10	Noeuds étudiés pour placer les turbomachines	74
4.11	Eloignement des volumes en fonction du noeud choisi	75
4.12	Hauteur minimum d'eau dans les galeries au niveau du puits	76
4.13	Ordre de grandeur de vitesses critiques d'érosion [Couret, 2011]	78
4.14	Organisation des galeries aux alentours du puits	79
4.15	Solution du processus itératif	80
4.16	Ecoulement à travers un éboulement (turbinage)	81
4.17	Ecoulement à travers un éboulement (pompage)	81
4.18	Hypothèse supplémentaire faite lors du cas de la turbine	84
4.19	Résultats de l'étude d'un éboulement dans le cadre d'un turbinage	85
4.20	Résultats de l'étude d'un éboulement dans le cadre d'un pompage	86
4.21	Influence des paramètres k et L_{eblmt}	86
4.22	Influence du débit de pompage et de l'éloignement de l'éboulement	87
4.23	Valeurs d'exhaure pour la concession de Gosson-Kessales [fait partie de l'annexe n°6]	88
4.24	Salle de pompage d'un charbonnage [Stassen, 1966]	89
4.25	Lien entre précipitations et débit d'infiltration [Stassen, 1966]	89
4.26	Ardoisière de Martelange [J.-L. Berger et J.-P. Drevet, comm. pers. 2013] .	93
4.27	Volume englobant l'ardoisière	94
4.28	Photo d'une chambre de l'ardoisière de Martelange [Duseigne, n d]	94

4.29	Localisation de l'ardoisière de Martelange d'après [SPW, 2013b]	95
4.30	Pompe similaire à celle de Martelange	97
4.31	Différents cas possibles	99
4.32	Turbine Francis [pxl Industries, 2013]	101
4.33	Vertical Shaft Sinking Machine (VSM) [Herrenknecht, 2013]	103

Chapitre 1

Energie électrique : le problème du stockage

1.1 Contexte

Alors que l'homme consomme de plus en plus d'énergie, la conscience environnementale est de plus en plus présente dans l'opinion publique. La recherche d'une énergie plus "verte" est en plein développement. Qui n'a pas vu d'éoliennes pousser dans les champs, des panneaux solaires s'installer sur les toits, qui n'a pas entendu de débats sur les centrales nucléaires suite à la catastrophe de Fukushima... Dans ce cadre, on assiste actuellement à une métamorphose de la production d'électricité.

Cependant ces changements ne sont pas sans conséquences sur la gestion des réseaux électriques, et certains défis vont devoir être relevés dans un futur proche.

1.1.1 Au XXe siècle

Au XXe siècle, la production d'électricité provient principalement de deux types de centrales. Les centrales thermiques¹ et, dans une moindre mesure, les centrales hydro-électriques. Le marché de l'électricité est très fermé, les unités de production sont peu nombreuses, et gérées principalement au niveau national.

D'un côté, on produit l'énergie électrique à partir des centrales thermiques, et en particulier des centrales nucléaires. Un grand nombre de ces centrales ont une forte inertie,

1. Principalement des centrales nucléaires et des centrales à énergie fossile, toutes basées sur la production de chaleur (d'où le nom) destinée à vaporiser de l'eau, elle-même utilisée dans une turbine à vapeur qui actionne un alternateur électrique.

ce qui engendre une production relativement constante dans le temps. D'un autre côté, la demande, elle, n'est pas constante. Son cycle est quotidien (on consomme plus le jour que la nuit), hebdomadaire (la consommation du week-end tend à être inférieure à celle de la semaine), et saisonnier (en hiver de nombreux chauffages électriques sont utilisés et l'éclairage fonctionne beaucoup plus). L'enjeu consiste donc à trouver des moyens pour équilibrer le réseau entre une production d'électricité qui ne correspond pas à la consommation. Ceci peut se faire aisément dans un cycle saisonnier, voire hebdomadaire, par la mise en marche ou l'arrêt d'unités de production. Mais au niveau quotidien, voire horaire, l'inertie des systèmes de production ne permet plus cet équilibrage indispensable inhérent à ce type d'énergie.

C'est pourquoi, dès le XX^e siècle, la nécessité de systèmes de stockage pour l'équilibre horaire ou quotidien s'est fait sentir. A noter que jusqu'à aujourd'hui, aucun moyen n'a été trouvé pour stocker efficacement de l'électricité en tant que telle. Les systèmes de stockage qui ont été mis au point consistent donc toujours à transformer l'énergie électrique en une énergie de forme différente (gravitaire, chimique, ...) lors des périodes creuses². Lorsque que la demande devient plus importante, on utilise cette énergie stockée pour la retransformer en électricité. La principale forme de stockage développée au XX^e siècle a été un stockage sous forme d'énergie potentielle des centrales par accumulation par pompage-turbinage, aussi appelé STEP (Station de Transfert d'Energie par Pompage). Les exemples les plus connus dans nos régions sont la centrale de Coö (Commune de Trois-Ponts) et la centrale de Vianden à la frontière entre le Grand-Duché de Luxembourg et l'Allemagne. Ces stations sont, en effet, un outil très efficace pour assurer l'équilibre entre production et consommation d'électricité. Elles sont composées de, minimum, deux bassins (un supérieur et un inférieur). Leur principe consiste à stocker l'énergie sous forme d'énergie potentielle, en déplaçant des masses d'eau. Lorsque la production d'électricité est supérieure à la demande, l'eau est pompée du bassin inférieur vers le bassin supérieur. Dans le cas inverse, lorsque la production est insuffisante, la centrale se met en mode turbine³, et l'énergie potentielle de l'eau située dans le bassin supérieur est transformée en électricité en s'écoulant vers le bassin inférieur. Ce passage du pompage au turbinage se réalise en quelques minutes maximum, environ une minute pour Coö [L. François, comm. pers., 2013]⁴, ce qui permet une forte réactivité aux variations de consommation. Ce principe est illustré à la figure 1.1.

2. On appelle période creuse, une période où la consommation (demande) est faible et pendant laquelle on peut profiter des moyens de production disponibles pour alimenter le stockage.

3. A l'heure actuelle, la plupart du temps, les pompes et les turbines sont une même machine, dite réversible, pouvant fonctionner dans les deux sens.

4. Ingénieur de chez Electrabel, rencontré lors d'une visite de la centrale de Coö le 20 février 2013, suivie d'un échange par courriers électroniques.

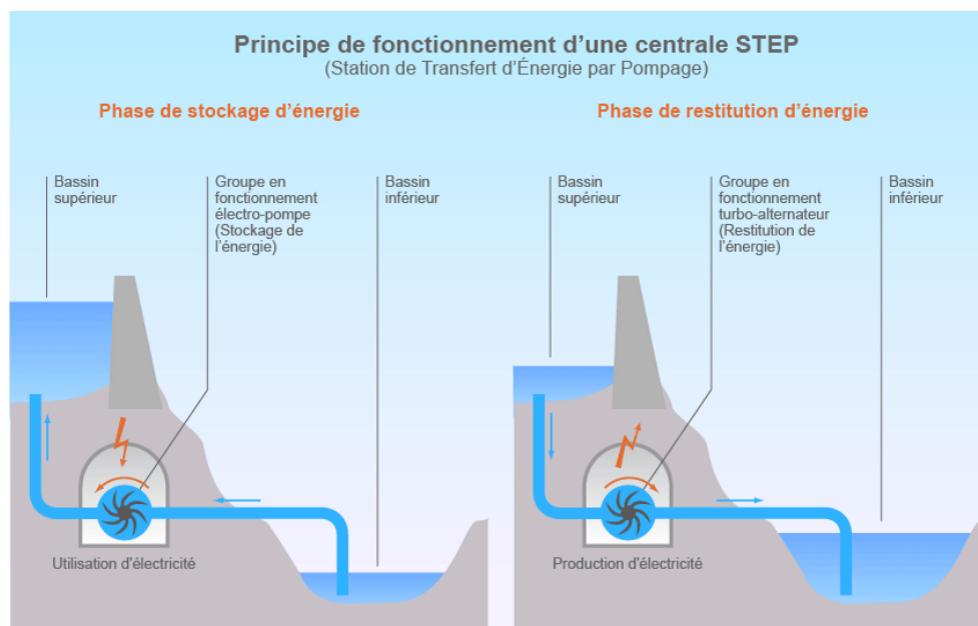


FIGURE 1.1: Schéma d'une station de pompage-turbinage [Anonyme, 2013]

Ces centrales ont donc été conçues pour un cycle quotidien. Leur rentabilité a été calculée sur un fonctionnement journalier. La nuit, le surplus d'électricité permet de remonter l'eau, et lors des pics de consommation diurnes, (principalement aux alentours de midi et de 20h), le système passe en mode turbine.

Notons bien qu'il ne s'agit pas stricto sensu de « stockage d'électricité » mais bien de transformation d'énergie électrique en énergie potentielle, nous utiliserons néanmoins le terme « stockage d'électricité » dans la suite de ce travail.

1.1.2 Et au XXI^e siècle ?

Au début du XXI^e siècle, la prise de conscience de la « santé » de la terre a pris une certaine ampleur. A ce titre, dans le cadre de l'objectif européen pour 2020 de produire 20% de l'énergie consommée par des moyens renouvelables, la Région wallonne a mis en place un système de subventions pour favoriser les modes de production d'énergies alternatives, les dorénavant bien connus « certificats verts ». Indépendamment des polémiques actuelles sur le coût et les conséquences de ces subventions, les investissements dans les énergies renouvelables sont nombreux et ne vont pas s'interrompre dans les années à venir, l'objectif de la Région wallonne dans le secteur éolien en particulier, étant d'atteindre 4500 GWh installés pour 2020. [gouvernement wallon, 2013, SPW, 2013c].

La figure 1.2 montre l'évolution du parc éolien en Belgique ainsi que les perspectives.

Cette énergie verte est inépuisable, mais son développement n'est pas sans conséquence.

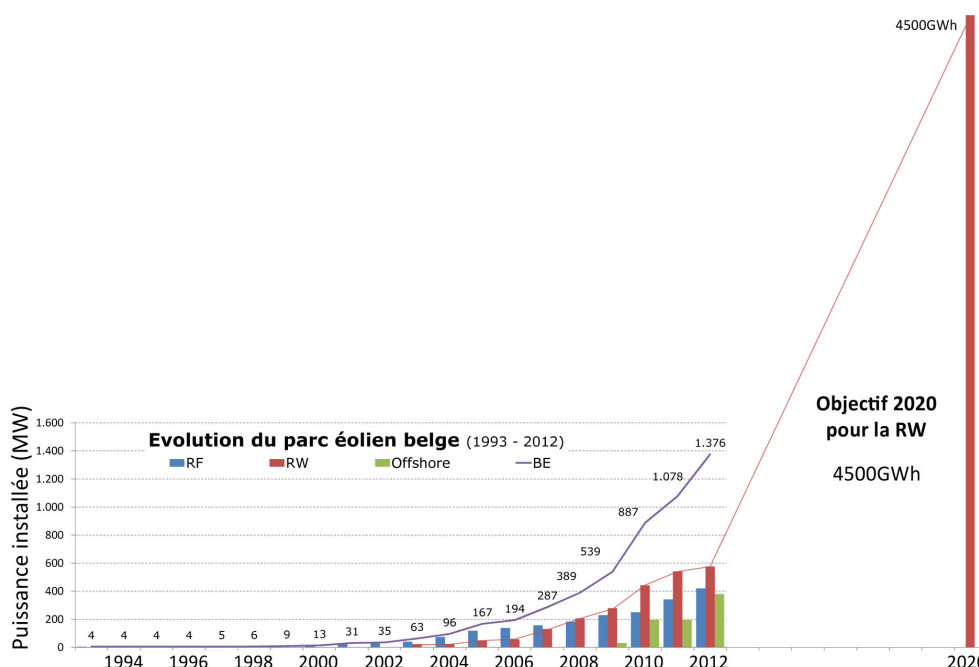


FIGURE 1.2: Evolution du parc éolien en Belgique, d'après [Huart (dir.), 2013a]

Les unités de production principales au XXe siècle - les centrales thermiques - offraient des puissances unitaires élevées (100 à 1000MW généralement par centrale). Au XXIe siècle on voit en revanche fleurir une multitude de petites unités de production qui, pour les éoliennes, atteignent de 2 à 4MW, alors que les productions photovoltaïques individuelles, que l'on compte désormais par milliers, ne représentent généralement que quelques kW de puissance. En outre, ces centrales sont réparties de façon presque homogène⁵ sur le territoire, mais ont une production qui fluctue dans le temps, en fonction de l'ensoleillement ou de la vitesse du vent.

Un premier défi posé par cette modification de la production concerne le réseau de transport de l'électricité. En effet, la gestion et le transport de l'électricité sont directement influencés par les moyens de production ainsi que par l'emplacement géographique de la production. Alors que le réseau était dimensionné pour un transport depuis un petit nombre de puissantes centrales vers les multiples endroits de consommation (centres urbains, mais aussi petits villages), on retrouve aujourd'hui des régions rurales produisant

5. Il y a bien sûr des endroits plus favorables que d'autres. Par exemple, le littoral pour l'éolien, où le vent est plus fort.

un nombre important de MWh lorsque le vent souffle ou lorsque le soleil brille, production très supérieure à la consommation locale. Les charges soumises au réseau ont donc complètement changé.

Au XXe siècle, le réseau a été structuré à partir de très hautes tensions (380kV) depuis des grosses unités de production, vers les basses tensions des habitations (230V), comme nous le montre la figure 1.3 [Beguin et Corhay, 2011]. Cette organisation du réseau ne correspond plus à la réalité du XXIe siècle. Il faut donc, soit modifier le réseau, soit trouver des outils permettant d'adapter les flux d'électricité pour qu'ils correspondent au réseau actuel. La problématique de modification du réseau est, d'un point de vue économique, un défi extrêmement grand. Considérant qu'en Belgique le réseau de transport (haute tension) représente 8.000km [ELIA, 2013c] et le réseau de distribution 18.000km [ICEDD, 2013], et sous l'hypothèse simple d'envisager de ne modifier que 10% du réseau de transport et de distribution, étant donné qu'il faut compter 100€/m pour les réseaux de distribution et 200€/m pour le réseau de transport [B. Feye, comm. pers., 2013]⁶, on peut évaluer le coût d'une telle modification à :

- $0,1 * 8.000 * 200 * 10^3 = 160 \text{ Mio€}$ pour le réseau de transport ;
- $0,1 * 18.000 * 100 * 10^3 = 1,800 \text{ milliards €}$ pour le réseau de distribution.

Ce calcul simple montre à quel point la mise en place de la deuxième solution (outil permettant d'adapter les flux) constitue une alternative à fort potentiel.

Une autre problématique réside dans la fluctuation temporelle de ces nouvelles méthodes de production. Comme expliqué précédemment, jusqu'à maintenant, seule la consommation variait, alors que la production était stable et programmable sur le moyen et long terme. Maintenant, les deux facteurs, consommation et production, varient. A noter que la variation de consommation est assez constante. Les pics sont facilement prévisibles et réguliers. Tandis que la production, elle, fluctue en fonction des éléments naturels (vent, soleil), qui sont beaucoup moins prévisibles. Les acteurs du secteur travaillaient donc au XXe siècle avec un cycle journalier assez stable, ce qui n'est dorénavant plus le cas. Une période creuse en demande peut être mise en défaut par une période très creuse en production. Ou pire, les conséquences des pics de demandes peuvent être amplifiées par une production faible. La gestion est donc d'autant plus difficile, et la nécessité d'équipements de stockage extrêmement souples et réactifs va se faire sentir de plus en plus.

6. Echanges téléphoniques et par courriers électroniques avec un ingénieur de chez ORES, entreprise gestionnaire de distribution.

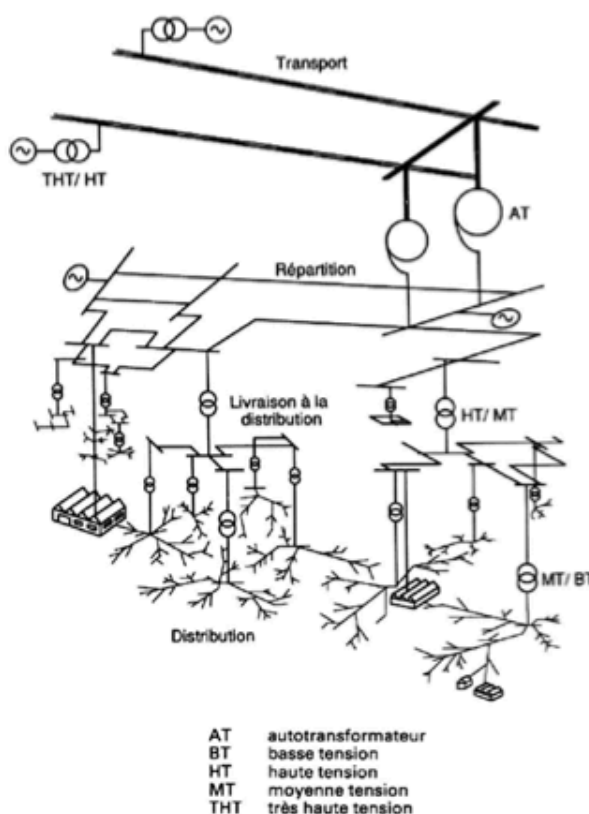


FIGURE 1.3: Stratification du réseau électrique [Beguïn et Corhay, 2011]

Le défi pour la gestion de l'électricité au XXI^e siècle est donc d'assurer l'équilibre entre production et consommation dans un système décentralisé et fortement aléatoire. C'est à ce titre que les centrales par accumulation semblent devoir jouer un rôle important dans l'avenir.

1.1.3 Les acteurs de l'électricité en Belgique

Aujourd'hui, différents acteurs sont présents sur le marché de l'électricité belge :

- les gestionnaires de réseau de transport (GRT), qui assurent le transport de l'énergie à très haute tension sur les longues distances ;
- les gestionnaires de réseau de distribution (GRD), qui assurent le transport et la distribution de l'énergie à moyenne et basse tension au niveau local ;
- les grands producteurs, qui injectent sur le réseau la majeure partie de l'énergie ;
- les auto-producteurs, qui produisent l'électricité qu'ils consomment, mais en utilisant le réseau comme outil d'équilibrage entre leur production et leur consommation ;
- les traders, qui assurent le lien commercial entre producteurs et fournisseurs ;

- les fournisseurs, qui vendent l'électricité aux utilisateurs.

Dans le rôle de GRT, on retrouve en Belgique la société ELIA. Notons que, contrairement aux autres acteurs de la filière qui sont mis en concurrence, ELIA est en position de monopole ; son activité est régulée par des règles bien strictes. Elle a un rôle central, et elle sert de lien entre tous les autres acteurs. Elle gère les lignes aériennes et les câbles souterrains haute tension allant de 380kV à 30kV. De plus, ELIA gère les importations et les exportations avec les pays voisins. La figure 1.4 illustre ce rôle central d'ELIA.

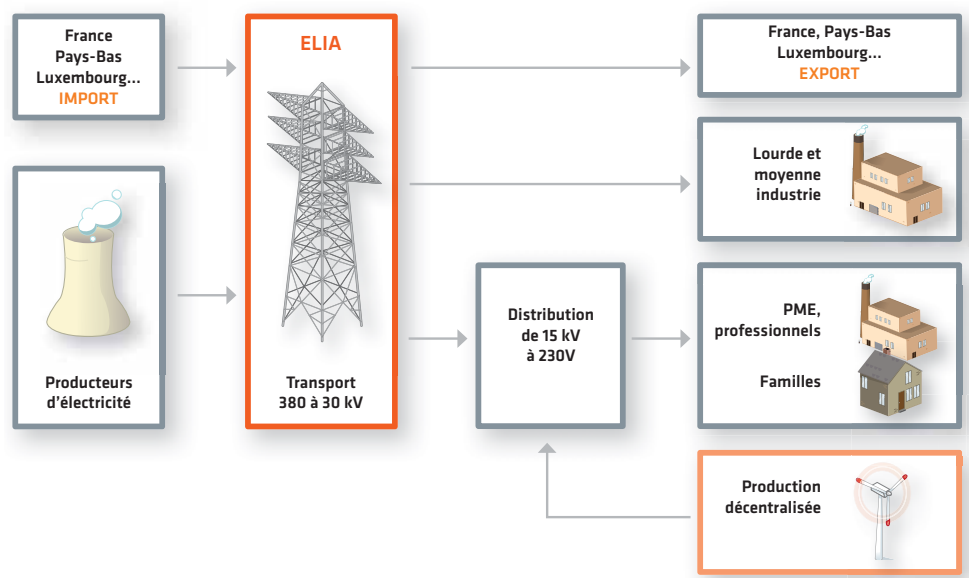


FIGURE 1.4: Position d'ELIA dans le marché [ELIA, 2013b]

Pour les tensions plus basses ($<30\text{kV}$), ce sont les GRD (intercommunales) qui prennent le relais, et permettent à chacun de se connecter au réseau.

Ensuite viennent les grands producteurs, le plus connu étant Electrabel qui reste, pour des raisons historiques, le plus grand producteur de Belgique, mais on y retrouve aussi, depuis l'ouverture du marché de l'électricité, EDF Luminus, Ecopower, etc.

Un autre type de producteurs sont les auto-producteurs. Ces particuliers ou entreprises tiennent à produire eux-même l'électricité dont ils ont besoin. Leur choix est souvent motivé par la politique de soutien destinée à augmenter la part des énergies renouvelables dans le « mix énergétique total ». A travers notamment le système des certificats

verts en Région wallonne. Toutefois, leur production est rarement exactement équilibrée dans le temps avec leur consommation, ils utilisent le réseau comme outil d'équilibrage (tel par exemple les particuliers équipés de panneaux photovoltaïques).

Il existe deux types de production :

- une production centralisée. Propre aux grands producteurs, ce sont de grosses centrales reliées directement aux lignes haute tension ;
- une production décentralisée. Ce sont de petites centrales, panneaux photovoltaïques ou éoliennes par exemple, réparties un peu partout sur le territoire. Elles peuvent être détenues aussi bien par des auto-producteurs que par de grands producteurs, et sont reliées au réseau de distribution si leur puissance est inférieure à 25MVA⁷.

Quant aux traders, ils ont un rôle purement commercial entre les producteurs qui vendent l'électricité et les fournisseurs qui l'achètent. A noter qu'un acteur peut tenir plusieurs rôles, par exemple celui de trader et celui de producteur.

Une confusion existe souvent entre producteurs et fournisseurs. Les producteurs possèdent des unités de production, tandis que les fournisseurs s'occupent de vendre l'électricité aux particuliers et aux entreprises. Il peut arriver qu'un fournisseur soit aussi producteur (c'est le cas d'Electrabel par exemple), mais le fournisseur peut aussi acheter son électricité à des producteurs, sans la produire lui-même, soit directement, soit par l'intermédiaire de traders.

1.2 Le stockage

Ce chapitre présente rapidement les différents acteurs, rôles et technologies tournant autour du stockage de l'électricité. Il se base sur trois documents [ENEA-Consulting, 2012, Beguin et Corhay, 2011, Hendrick *et al.*, 2011]. Nous invitons le lecteur à lire ces documents pour avoir un complément d'informations.

7. Le MVA (mégaVoltAmpère) est une unité de mesure de la puissance électrique apparente. Elle diffère des MW (mégaWatts) par le facteur de puissance (pf) : $MVA * pf = MW$. Le facteur de puissance vaut $\cos(\phi)$ avec ϕ l'angle de déphasage entre U, le potentiel, et I, l'intensité. Dans la suite du travail, nous considérerons que le $pf = 1$, de telle manière à faire correspondre les MVA avec les MW. Il faut garder à l'esprit que ce n'est pas tout à fait le cas. L'ordre de grandeur est cependant conservé, ce qui est suffisant dans le cadre d'une étude de faisabilité.

1.2.1 Les services du stockage

L'arbitrage

Depuis 2006, il existe en Belgique une bourse d'échange liée à l'énergie. Cette bourse permet à quiconque d'acheter ou de vendre de l'énergie, comme on le ferait avec n'importe quelle matière première. Cette bourse est accessible par tous sur <http://belpex.be>. C'est par l'intermédiaire de cette bourse que les producteurs peuvent vendre leur électricité aux fournisseurs.

L'arbitrage consiste donc à acheter l'électricité lorsque son prix est bas, souvent la nuit, ou lors de pics de production, dus par exemple aux grands vents. Cette énergie est stockée, puis revendue lorsque son prix est plus élevé, c'est-à-dire lors des pics de consommation, habituellement aux alentours de midi et 20h (en journée donc).

En s'appuyant sur une capacité de stockage, le trader peut donc acheter et revendre au bon moment l'électricité pour gagner de l'argent. Ce qui lui permet de rentabiliser son investissement dans l'équipement de stockage.

Equilibre en production et consommation

Si la consommation instantanée d'électricité pour une zone géographique donnée dépasse la production pour la même zone, un déclenchement (disjonction) va se produire. Il peut s'agir d'un phénomène local, mais il peut aussi être généralisé ou se répandre sur une région voire le pays entier. Ceci s'appelle alors un « black-out », car il a pour conséquence d'interrompre la distribution d'électricité pour toute la région concernée.

Les GRT et GRD se doivent d'éviter les « black-out », et pour ce faire, il faut toujours que la production d'électricité soit équivalente à la consommation. Toutefois, les GRT et GRD ne produisent pas d'électricité. Un dispositif a été mis en place pour qu'ils puissent répercuter cette exigence sur les autres acteurs de la filière.

Pour disposer d'un réseau de qualité, on estime que, sur une période de temps de 15 minutes, l'équilibre doit être assuré sur le réseau entre la production et la consommation. Tout acteur qui injecte de l'électricité sur le réseau est considéré comme ARP (Access Responsible Party). A ce titre, il doit garantir que ce qu'il injecte sur le réseau, chaque 15 minutes, est équivalent à ce qu'il « consomme » à travers ses clients, qui sont, soit consommateurs directs, soit fournisseurs.

La bourse de vente et d'achat d'électricité Belpex fonctionne donc avec une mise à jour au quart d'heure, et ceci avec une prévision de 24 heures. Pour s'assurer de cet équilibre,

des amendes conséquentes peuvent être infligées aux ARP qui ne respectent pas leur prévision d'équilibre définie 24 heures à l'avance.

Pour montrer l'importance de cette régulation, on peut noter que la bourse Belpex peut, à certains moments, atteindre des prix de vente négatifs, car les ARP préfèrent payer pour qu'on leur achète l'électricité produite, plutôt que de payer les amendes en cas de déséquilibre. Cela a été le cas fin 2012, lorsque les centrales à grande inertie tournaient en « régime d'hiver », mais également les éoliennes et autres producteurs, alors que les températures extérieures limitaient fortement la consommation des particuliers.

On comprend tout de suite que les centrales de stockage permettent aux ARP de gérer au mieux cet équilibre délicat entre production et consommation, et leur évitent ainsi ces amendes conséquentes, ou la vente de leur électricité à trop bon marché.

L'équilibre production-consommation intéresse aussi les auto-producteurs. A moins d'avoir une activité qui peut varier en fonction de la production d'électricité, ces auto-producteurs sont contraints à faire appel à un fournisseur extérieur pour pallier le déséquilibre entre leur production et leur consommation. Néanmoins, cette consommation est ponctuelle. Les grands fournisseurs d'électricité la leur facturent donc très chère.

Des unités de stockage, de faible puissance, leur permettraient de prendre réellement leur autonomie énergétique.

De plus, tout consommateur, relié au réseau, souscrit à une puissance maximum qui n'est finalement atteinte que très ponctuellement. Cette puissance maximum influence directement le prix. Un système de stockage permettrait de lisser la demande en électricité, et permettrait donc de réduire la puissance maximum souscrite et les coûts.

1.2.2 Quels services utiles à quels acteurs

Comme nous l'avons vu, le stockage de l'électricité permet de subvenir à plusieurs demandes (arbitrage, réseau de qualité, équilibre production/consommation). La table 1.1 recense quels services sont utiles à quels acteurs.

La valorisation d'un système de stockage est donc multiple. En résumé, il permet de soit optimiser et mieux gérer la production, ce qui évite les amendes, soit jouer avec les marchés, soit devenir totalement indépendant du réseau.

En plus des méthodes déjà énoncées, il existe une autre méthode de valorisation qui concerne les offres d'ajustement et les réserves. Si les APR sont en déséquilibre, il y a

	GRT & GRD	Traders	Producteurs	Auto producteur	Fournisseur
Arbitrage		X	X		X
Réseau de qualité (fréq., tensions, congestions)	X		X	X	
Equilibre entre production et consommation	X	X	X	X	X

TABLE 1.1: Services utiles à chaque acteur

des amendes ; cependant ELIA, lui, doit quand même garantir cet équilibre, indépendamment de la question des amendes. C'est ainsi qu'ELIA doit disposer de réserves activables à n'importe quel moment pour gérer les déséquilibres et éviter les « black-out ». Ces réserves se décomposent en trois types :

- la réserve primaire : activable en 0 à 30 secondes pour une durée consécutive d'au moins 15 minutes ;
- la réserve secondaire : activable en 30 secondes à 15 minutes, pour une durée consécutive d'au moins 15 minutes ;
- la réserve tertiaire : activable moins rapidement, mais pour une durée plus longue, elle peut être soit une réserve de production (les producteurs sont tenus de produire plus d'électricité) soit de prélèvement (les producteurs sont tenus de diminuer la production).

Ces réserves, mises à la disposition d'ELIA, sont payées de deux manières. Tout d'abord chaque MW mis à disposition à ELIA est payé, c'est-à-dire que même si la réserve n'est pas utilisée, le producteur est rémunéré. Ensuite, pour chaque activation de la réserve, le producteur est rémunéré au MWh demandé. C'est à dire lorsque la réserve est bel et bien activée.

En plus de ces trois réserves, il existe aussi une capacité de « black start ». C'est à dire qu'en cas de « black-out » du réseau, la centrale « black start » peut redémarrer sans le soutien du réseau, et permet à ELIA de réapprovisionner progressivement les utilisateurs du réseau. La mise à disposition d'un service de « Black Start » est elle aussi rétribuée [ELIA, 2013a]. Le système est assez complexe, et nous renvoyons le lecteur sur le site web d'ELIA (<http://www.elia.be/>) pour plus d'informations.

Il est très difficile de quantifier la rémunération d'une mise à disposition d'une telle réserve. Chaque producteur remet prix pour proposer sa réserve pour un an. Les offres sont communiquées par enveloppes fermées à ELIA, qui choisit alors les meilleures. Ces

contrats ne sont donc pas rendus publics. [J.-J., comm. pers., 2013]⁸

Notons qu'il est important de mutualiser les services comme le démontre une étude du Département Américain de l'Energie [Eyer et Corey, 2010]. Rentabiliser une installation de stockage sur un seul service est impossible. Par exemple, la centrale de Coo est valorisée par sa réserve de capacité "Black Start", par sa participation au réglage de la fréquence secondaire, par l'arbitrage (et lissage de pointe) et, finalement, par son intégration dans la production globale d'Electrabel. Il est nécessaire, à l'instar de la centrale de Coo, de valoriser une centrale par différents services pour la rendre rentable.

C'est pour toutes ces raisons qu'il est très difficile de connaître les bénéfices générés par une centrale de stockage. En plus de la complexité des modes de rémunération qu'il faut combiner, il faut prendre en compte l'évolution du réseau dans le temps car la période de retour sur investissement d'une centrale par pompage-turbinage est de plusieurs dizaines d'années. Une étude stochastique sur les besoins actuels et futurs du réseau électrique est donc importante, pour pouvoir au mieux appréhender les recettes pouvant être générées par un système de stockage. On sort ici du cadre strict de ce travail.

1.2.3 Les différentes technologies

Outre la technologie STEP déjà évoquée, d'autres systèmes de stockage existent.

Les informations ci-dessous sont volontairement succinctes. Elles sont là pour évoquer les différentes solutions alternatives, mais ne constituent pas l'objet principal de ce travail. Le lecteur désirant plus d'informations sur ce sujet, est invité à lire les trois documents référencés en début de chapitre.

Les différentes technologies disponibles peuvent se classer en quatre catégories :

- mécanique (potentielle ou cinétique) : stockage gravitaire par pompage (STEP), stockage par air comprimé (CAES⁹), volants d'inertie
- électrochimique et électrostatique : batteries, condensateurs, superconducteurs
- thermique et thermochimique : chaleur sensible ou chaleur latente, énergie par ab/adsorption
- chimique : hydrogène, méthanation, etc.

La table 1.2 reprend les différentes technologies et leurs principales caractéristiques. A noter que de nombreux types de batteries existent. Elles ont été ici regroupées en une seule technologie par souci de clarté.

8. Echange de courriers électroniques avec un ingénieur de chez ELIA.

9. Compressed Air Energy Storage

Vu la complexité du problème, il semble indispensable que la solution finale fasse cohabiter plusieurs technologies de stockage, afin de bénéficier des avantages des unes comme des autres. Notons aussi que, jusqu'ici, les acteurs de la filière électrique n'avaient qu'une très faible emprise sur la consommation. Seules certaines entreprises permettent à ELIA de les déconnecter du système en cas de surconsommation (réserve tertiaire de prélèvement). A l'avenir, des systèmes intelligents de consommation pourront être mis en place. Par exemple, suite à la démocratisation des voitures électriques ou hydrides, il serait possible qu'un chargement intelligent de leurs batteries s'effectue uniquement en période de faible consommation. Chaque voiture prise séparément ne constituerait pas une grande quantité de stockage, mais toutes ensemble, elles constitueraient un stockage non négligeable.

A l'heure actuelle, les STEP représentent la quasi totalité de ce stockage, plus de 100GW à travers le monde, soit 97% du total [Hendrick *et al.*, 2011]. La quantité totale de stockage va augmenter dans les années à venir, mais avec l'arrivée de nouvelles technologies (batteries, CAES,...) le pourcentage de STEP va diminuer.

L'enjeu des études sur le stockage en 2013 est de permettre aux énergies renouvelables de se développer tout en garantissant un réseau équilibré de qualité.

Technologie	Puissance [MW]	Temps de décharge	Temps de réponse	Rendement [%]
Inductif supraconducteur	0 à 100	ms à 8s	< 100ms	
Super condensateur	0 à 10	ms à 60min	10 à 20ms	
Hydrogène	0 à 50	s à 24h	20ms à 1s	40 (prévision à l'avenir : 70)
Volant d'inertie	0 à 10	s à 24h	10 à 20s	
Air comprimé	5 à 3000	1h à 24h	5 à 12min	45-55
STEP	1 à 5000	1h à 24h	1 à 3min	75-80
Batteries	0 à 50	s à 10h	10ms à 20s	très variable suivant le type de batterie

TABLE 1.2: Différents systèmes de stockage avec quelques-unes de leurs caractéristiques, d'après [Hendrick *et al.*, 2011, Ploye, 2013]

1.3 Le projet : utiliser d'anciennes galeries désaffectées en guise de bassin inférieur

La Belgique, et en particulier la région liégeoise, a vu se développer de nombreuses mines de charbon. Toutes ces mines sont fermées aujourd'hui, la dernière, en Campine, ayant fermé ses portes en septembre 1992. Ce ne sont cependant pas les seules cavités souterraines de notre pays. De nombreuses mines de minerai métallique (principalement de fer), mais aussi des carrières souterraines, telles les ardoisières, sont également aujourd'hui désaffectées.

L'idée à l'origine de ce travail consiste à étudier la faisabilité d'utiliser ces mines et carrières désaffectées comme bassin inférieur à une centrale d'accumulation par pompage-turbinage. Ces mines sont parfois profondes, et leur volume non négligeable, ce qui correspondrait à un grand potentiel d'accumulation d'énergie. Mais de nombreux aspects doivent être étudiés et des défis techniques doivent être relevés pour arriver à un système rentable.

Ce travail n'a pas pour but de faire une étude exhaustive du projet, ni de déposer un cahier des charges complet, ce qui correspondrait à un travail de plus grande envergure. L'objectif est de déterminer le potentiel d'avenir de ce type de projet en Région wallonne, et de définir les pistes principales à analyser pour mener à bien un tel projet. Le problème est concentré sur la Wallonie étant donné que la gestion du sous-sol est régionale dans notre pays. Des mines en Région flamande seront mentionnées en guise de comparaison.

La force de ce type de solution est qu'elle est adaptée à un pays à forte densité de population comme la Belgique (limitation de l'occupation d'espace) et qu'elle utilise des anciens sites industriels, ce qui peut s'avérer un atout non négligeable que se soit en réhabilitation de site ou de « permitting » (affectation des terrains au plan de secteur, recours au conseil d'état, etc.).

Cette idée d'utiliser d'anciennes galeries minières en guise de bassin de stockage n'est pas neuve. Un travail de fin d'études à l'Université de Liège a d'ailleurs déjà été rédigé sur ce sujet il y a plus de 20 ans [Loriaux, 1989]. Un peu plus loin, chez nos amis allemands, dans la région de la Ruhr, de nombreuses études sont aussi en cours. Notons par exemple les études faites à l'Université de Duisburg-Essen [Vaille, 2010] ainsi que le symposium annuel IWASA se déroulant à Aix-la-Chapelle [Pummer, 2013] qui, cette année, traitait entre autres du stockage par pompage-turbinage et des réservoirs souterrains.

Malgré ces études et de nombreuses recherches, il semble qu'aucun projet de ce type n'ait jamais été réalisé dans le monde. Pas même un projet pilote. Les recherches n'en sont qu'à leur balbutiement, mais l'attrait est là.

Dans la suite de ce travail, de nombreuses comparaisons seront faites entre les centrales par accumulation de pompage traditionnelles, qu'on nommera par facilité « STEP conventionnels », et les centrales par accumulation de pompage basées sur d'anciennes galeries minières, qu'on appellera « STEP miniers ».

1.3.1 Place du projet dans le réseau actuel et futur

Les STEP conventionnels sont généralement de grande puissance, tel les 1100MW de la centrale de Coe. Ces centrales répondent bien à un contexte de production centralisée autour notamment de quelques centrales nucléaires.

Utiliser d'anciennes cavités souterraines, consiste à imposer les caractéristiques du réservoir inférieur. La différence de niveau entre les deux bassins, et le volume des réservoirs est donc déterminé par le patrimoine souterrain que nous ont laissé les générations précédentes.

Comme nous le verrons plus loin, les volumes et hauteurs de chute disponibles ne permettent pas d'atteindre d'aussi grandes puissances que la centrale de Coe. Cependant des centrales plus modestes ont également leur place dans le réseau actuel, où la production, comme vu au chapitre 1.1.2, se décentralise progressivement avec l'arrivée des énergies renouvelables.

Ce travail va se concentrer vers ce type de centrales plus modestes, de quelques MW à quelques centaines de MW tout au plus. Ces puissances permettent surtout le réglage de la tension et de la fréquence, et la décongestion de certaines lignes. Il ne s'agit donc plus de centrales fonctionnant au niveau national, mais bien au niveau local.

Par exemple, à l'heure actuelle, des problèmes de congestion sont régulièrement constatés dans la « boucle de l'Est »¹⁰ lorsque la production éolienne de ces régions est trop élevée. L'électricité produite en trop grande quantité n'est pas consommée par les utilisateurs du réseau de distribution local. Dès lors la quantité d'énergie rapatriée sur le réseau de (très) haute tension est trop importante, et des congestions ont lieu. Ce principe est représenté à la figure 1.5.

10. Approximativement, la partie germanophone de la Belgique et le nord de la province du Luxembourg.

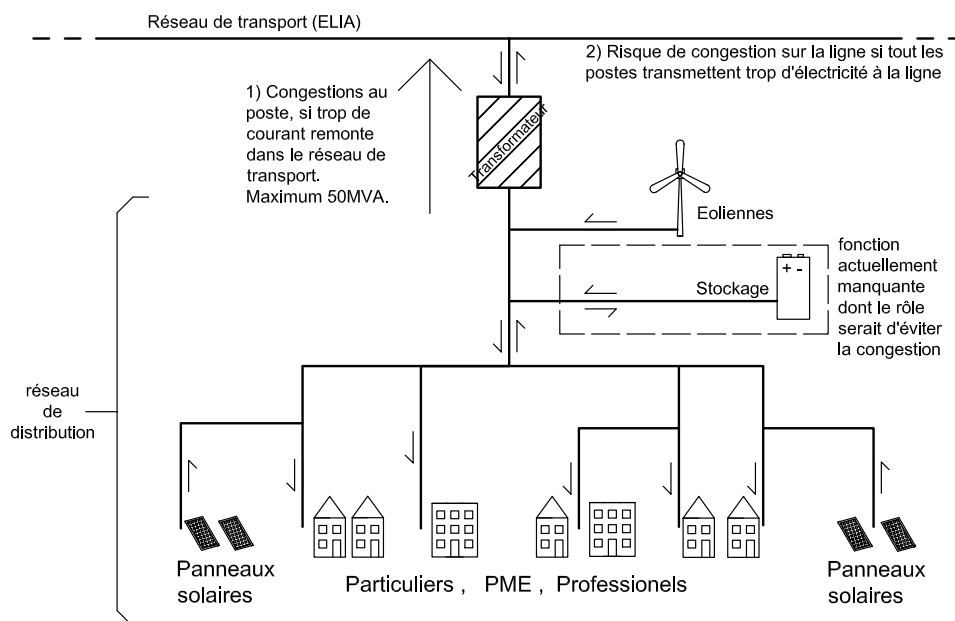


FIGURE 1.5: Aspect local d'une petite centrale de stockage

Cet aspect « local » est très important. En effet, les centrales conventionnelles de grande ampleur peuvent être localisées dans des sites géographiques les plus adaptés, qui sont ensuite reliés au réseau de transport pour pouvoir profiter de cet outil de régulation au niveau national, ou même international. Les investissements dus à la modification du réseau sont amortis assez facilement au vu des grandes puissances mobilisées et des économies d'échelle. Exemple à Vianden, où la station de pompage-turbinage est située au Grand-Duché de Luxembourg, mais est reliée au réseau allemand, et est gérée par l'Allemagne, voisine.

Les problèmes locaux, eux, par contre, ne peuvent pas être délocalisés. Il faut donc développer des installations locales, relativement proches du problème. Ainsi, des sites moins rentables à première vue, en tout cas en ce qui concerne la quantité d'énergie stockée, peuvent tout à fait être pertinents. Ces centrales locales agiront au niveau local, et seront donc liées au réseau de distribution.

En poussant plus loin le principe, en ayant des puissances de stockage un peu plus importantes, on pourrait même concevoir des zones presque autonomes. Si la production d'électricité, ainsi que le système de stockage au sein de la zone, sont assez importantes, la liaison avec le réseau de transport pourrait n'être utilisée que sporadiquement.

Ces centrales locales de plus petite ampleur sont donc, entre autres choses, liées aux productions décentralisées caractéristiques des énergies renouvelables. Il est donc inté-

SERVICE PUBLIC DE WALLONIE

Wallonie

Annexe 3 - Carte des lots croisée avec la carte des zones favorables

Légende

- Champ existants*
- Limites de lots
- Zone favorable sans contrainte d'exclusion **
- Zone favorable avec présence d'au moins une contrainte partielle **

* Situation au 15 janvier 2013. Concernant les installations en fonctionnement, en construction, en projet ou en recours au Conseil d'Etat

** Les zones favorables constituent une référence et n'importent pas zonage à valeur impérative

Ventilation du productible par lot (en GWh/an)

Lot	Existant	Supplémentaire	Total	Lot	Existant	Supplémentaire	Total	Lot	Existant	Supplémentaire	Total
1	0	10	10	18	96	20	116	35	54	47	101
2	96	80	176	19	22	28	50	36	25	14	39
3	13	19	32	20	1	10	11	37	31	18	49
4	118	24	142	21	0	18	18	38	0	96	96
5	51	20	71	22	25	9	34	39	0	29	29
6	0	29	29	23	20	19	39	40	114	63	177
7	64	53	117	24	0	18	18	41	0	38	38
8	0	38	38	25	54	87	141	42	0	32	32
9	180	55	235	26	0	116	116	43	44	11	55
10	71	35	106	27	35	152	187	44	0	18	18
11	13	14	145	28	71	78	149	45	0	80	80
12	0	14	14	29	0	43	43	46	0	28	28
13	270	154	424	30	0	18	18	47	0	61	61
14	51	40	93	31	124	62	186	48	0	43	43
15	64	133	197	32	66	89	155	49	0	9	9
16	0	10	10	33	97	78	175	50	43	58	101
17	1	29	30	34	136	58	194	Total	2170	2335	4505

Elaboration d'une carte positive traduisant le cadre de référence éolien actualisé. Estimation d'un productible minimal par lot

Philippe Leyeune
Claude Feller
Gemboux Agro-Bio Tech
Université de Liège
Février 2013

gemboux agro-bio tech Université de Liège

0 5 10 15 20 25 km

28 février 2013 Sources : SP

FIGURE 1.6: Plan wallon éolien [SPW, 2013a]

Après une recherche bibliographique et une première réflexion sur le sujet, diverses problématiques apparaissent. Ce chapitre recense une partie des problèmes liés au projet. Les défis à relever sont nombreux.

Les problèmes les plus importants seront abordés par la suite de manière plus détaillée.

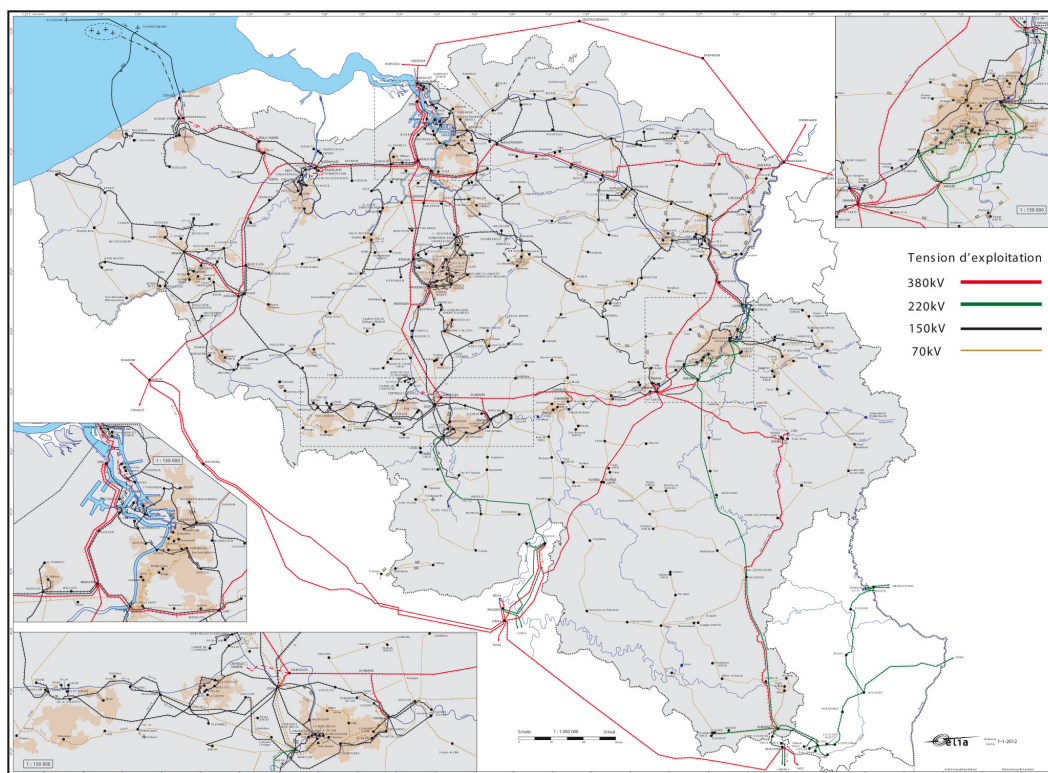


FIGURE 1.7: Carte du réseau haute tension belge [J.-J. Lambin, comm. pers., 2013]

Quel type de cavités souterraines

Le nombre de galeries minières est très important en Belgique. Il est possible de les classer en fonction de leur profondeur, de leur caractère familial ou industriel, de leur volume, de la nature du matériau exploité. Une première étape consiste à recenser les différents types de galeries avec leurs différentes caractéristiques. Ce sera l'objet du chapitre 2.2.

Ensuite, il est important d'estimer quelles puissances sont disponibles pour chaque type de cavité, et de voir si ces STEP miniers pourraient effectivement être un outil intéressant au sein du réseau actuel et futur situé à proximité. Ce point sera abordé au chapitre 2.3.

Et finalement, il faudra comparer les avantages et inconvénients de ces STEP miniers, par rapport aux autres alternatives de stockage, tels les CAES, batteries, etc. On en parlera notamment dans une étude de cas au chapitre 4.1.

Rentabilité économique

Un tel projet à un coût certain. Estimer la rentabilité économique d'un tel système est donc utile, pour la comparer ensuite à celle d'autres projets de stockage permettant les

mêmes services. Un ordre de grandeur de prix sera donné dans l'étude de cas du chapitre 4.2.

Remise en “service” d’anciennes mines

Les travaux miniers ne sont jamais conçus pour durer et nécessitent un entretien permanent et coûteux pour rester en service. Dès qu’un chantier ou un secteur de mine arrive en fin d’exploitation, tout entretien cesse et la mine se détériore vite sous l’effet de la vétusté et de la pression des terrains, celle-ci étant particulièrement importante dans les zones de chantiers de déhouillement.

Il en est de même pour les puits. C’est pourquoi ils sont systématiquement remblayés en fin d’exploitation.

L’état actuel de ces mines n’est pas bien connu, et leur remise en service soulève de nombreuses questions. Par exemple qu’en serait-il du tassement en surface ? Les études techniques considèrent que les effets du tassement en surface consécutif à l’exploitation d’un chantier en mine de houille (chantier accompagné de ses galeries de desserte) cesse dans les 10 ans après l’abandon du chantier, l’écrasement étant acquis. Mais qu’en est-il de la remise en service ? [D. Pacyna, comm. pers. 2013].¹¹

Il faudrait donc creuser de nouveaux puits ou déboucher les anciens, vérifier l’état des galeries qui se sont peut être effondrées, estimer le tassement engendré par la remise en service, etc.

On abordera ce sujet dans diverses parties du travail, et entre autres dans le chapitre 2.5 et lors de l’étude de cas du chapitre 4.1.

Fatigue des mines sous l’effet du vidage / remplissage

Une fois remise en service, la mine sera sollicitée par un cycle de charge/décharge régulier. En effet elle sera remplie et vidée constamment avec de l’eau. La résistance et le comportement des galeries et du massif doivent être étudiés dans cette optique. Ce phénomène est mentionné au chapitre 2.5.

Ecoulement dans les galeries

Comment stocker l’eau dans les galeries ? Deux solutions sont à priori possibles. Soit la galerie est laissée telle quelle, avec ses aspérités, son inclinaison, ses éboulements, etc, soit elle est modifiée (gunitage, installation de tuyaux dans la galerie, étanchement, ...).

11. Echange de courriers électroniques avec un ingénieur du SPW.

Il est évident que la première solution comporte l'avantage d'être nettement moins chère. Il faudra cependant s'assurer que la galerie est bien horizontale, ou légèrement inclinée vers le puits d'accès pour une bonne vidange naturelle. La seconde solution, demandant des investissements beaucoup plus importants, fournira par contre un réservoir plus sûr et de meilleure qualité. L'aspect aléatoire sera dès lors limité.

Une autre question peut aussi se poser. Faut-il noyer entièrement la mine sur plusieurs niveaux de galeries, ou l'eau peut-elle circuler d'une galerie à l'autre à travers les tailles ? Est-il préférable de se limiter à un seul niveau de galerie ?

La première solution permet d'avoir un volume plus important. Mais engendre des pressions plus importantes. De plus, la différence de chute entre le point le plus bas et le plus haut serait plus grande. Or la plupart des turbomachines sont dimensionnées pour une hauteur de chute fixe. Leur rendement serait amoindri si on utilise plusieurs niveaux de galeries.

Ces questions seront abordées également dans le chapitre 2.3, mais aussi, et principalement, dans le chapitre 3.

Gestion de l'eau des nappes phréatiques et impact sur le rendement

Lors de l'exploitation des mines, un pompage d'exhaure continu avait lieu. Par exemple, pour la mine de Blegny (dans la région liégeoise), entre 8.000 et 20.000 litres d'eau d'infiltration étaient pompés par heure . En effet la hauteur naturelle de la nappe phréatique se situe presque toujours au dessus des galeries.

Lors de l'arrêt d'exploitation, l'eau est donc remontée progressivement. Jusqu'à approximativement 100m de la surface. Ces valeurs sont bien sûr propres à chaque site.

Il pourra être nécessaire de rabattre cette nappe d'eau, mais cela implique de s'assurer que les tassements résultants ne seront pas trop importants. Des problèmes annexes pourraient aussi se manifester, telle une pollution due à l'oxydation des sulfates.

De plus, la gestion de cette eau devra être prise en compte sur le rendement de la centrale. En effet, les volumes d'eau percollant naturellement dans les galeries devront être évacués par pompage, mais ne pourront pas être utilisés lors du turbinage.

Ces différents points sont repris dans le chapitre 2.5 ainsi que dans l'étude de cas du chapitre 4.1.

Réservoir supérieur

Dans le cas de centrale plus modeste, il serait peut-être envisageable d'utiliser un fleuve ou une rivière comme réservoir supérieur. Ce choix engendre cependant des difficultés supplémentaires.

Tout d'abord, la gestion d'une quantité plus importante de flottants et de sédiments en suspension. Les STEP conventionnels, fonctionnant avec deux bassins en circuit fermé, ne sont pas confrontés à ce problème. Remarquons cependant que, dans le cadre de STEP minier, si les galeries ne sont pas traitées préalablement (voussoirs/gunitage/...), le risque d'érosion augmente. Ce problème de particules en suspension est donc aussi de mise pour le réservoir inférieur.

Ensuite, il faudra coupler production d'énergie et gestion hydraulique du cours d'eau. En période d'étiage, la centrale pourra-t-elle toujours monopoliser l'eau du fleuve pour son fonctionnement ? En période de crue en revanche, la centrale pourrait être mise à contribution en tant que zone passive. Mais les volumes mis en jeux sont-ils vraiment significatifs ?

L'utilisation d'un cours d'eau comme réservoir supérieur ne sera pas étudiée dans le cadre de ce travail. Elle est mentionnée ici pour mémoire. Nous nous focaliserons principalement sur le réservoir inférieur et les problèmes relatifs à un réservoir de type cavité souterraine.

Gestion de la température

A 1000m sous la surface de la terre, on peut retrouver, en Belgique, des températures avoisinant les 30°C. Sans parler du dégagement de chaleur des machines situées dans la caverne, du frottement dans les conduites et galeries, ...

C'est pourquoi l'énergie sous forme de chaleur n'est peut être pas négligeable. Et il serait intéressant d'étudier la possibilité d'utiliser cette énergie à la surface, soit pour générer de l'électricité, soit pour chauffer un quartier de maisons aux alentours. On parle donc ici d'un couplage avec de la géothermie à basse enthalpie.

Cet aspect ne sera pas étudié dans le cadre de ce travail, il est repris ici pour mémoire. Cependant, nous gardons en mémoire cet aspect qui pourrait augmenter le rendement de la centrale.

Éléments relatifs aux centrales par accumulation par pompage-turbinage

Divers éléments propres à une centrale par accumulation par pompage-turbinage doivent être dimensionnés. Dans le cadre de l'utilisation des cavités souterraines, certains d'entre

eux doivent faire l'objet d'une attention toute particulière, alors que d'autres pourraient être dimensionnés comme pour une centrale classique.

Classiquement, les machines sont placées dans une caverne¹², elle-même située à une altitude inférieure au bassin inférieur, du moins lorsque la turbine doit fonctionner en mode immergé. La façon classique de construire ce type de centrale est-elle adaptée aux galeries souterraines ?

On verra dans le chapitre 3 que, dans certains cas, d'autres approches peuvent être intéressantes, et méritent une attention particulière.

Appareils électromécaniques

Voici une liste non-exhaustive de machines indispensables à la réalisation du projet :

- pompes et turbines : de plus en plus, c'est une seule et même entité,
- moteurs et alternateurs,
- transformateurs.

Génie civil en surface

Un certain nombre d'ouvrages de génie civil devront être construits en surface : bassin supérieur, prise d'eau, etc.

Ce type d'ouvrages ayant déjà été réalisé de nombreuses fois, et sa technique et son coût étant bien maîtrisés, il n'est pas intéressant de les étudier dans le cadre de ce projet de faisabilité, si ce n'est pour tenir compte du coût.

Génie civil en profondeur

Suivant le choix du type de centrale, du type de cavité souterraine, etc, un certain nombre de travaux devront être réalisés en profondeur. Par exemple renforcer les galeries et les puits, voire en reconstruire pour ces derniers. Ou encore envisager le dimensionnement d'une caverne similaire à celle d'un STEP conventionnel.

Mais dans un projet de STEP minier, la construction d'une telle caverne amène de nouveaux problèmes. Une caverne beaucoup plus profonde, avec une température ambiante plus grande, demanderait une ventilation plus efficace. Mais aussi, et surtout, une caverne entièrement située sous le niveau de la nappe phréatique, demanderait une étanchéité, accouplée éventuellement à une exhaure.

12. Nous parlons de « caverne » lorsqu'on fait référence à la cavité, artificielle ou non, accueillant les différentes machines nécessaires au bon fonctionnement d'un STEP. Nous parlons de « cavité » lorsque nous faisons référence à une cavité souterraine naturelle servant de réservoir inférieur.

La construction d'une telle caverne est coûteuse, et implique nombre de difficultés techniques. C'est pourquoi il serait intéressant de s'en passer, et de trouver une alternative. Nous en reparlerons dans le chapitre 3.

Il faudra aussi déterminer le nombre de puits d'accès nécessaires, car différentes fonctions doivent être assurées. Suivant la conception, il faudra tel ou tel accès, en voici quelques-uns :

- galerie d'amenée (d'eau),
- entrée des hommes et des machines,
- transport de l'électricité par des barres de puissance,
- ventilation.

C'est ainsi que dans le cadre d'un STEP minier constitué autour d'une caverne classique, il faudrait au minimum quatre puits d'accès. Sauf si plusieurs fonctions sont regroupées au sein d'un seul puits.

Chapitre 2

Les cavités souterraines

Une des principales difficultés de ce projet consiste à choisir un site adéquat potentiel possible. De nombreux facteurs, nous l'avons vu, sont à prendre en compte, et la cavité souterraine parfaite n'existe pas. Certaines sont cependant plus adaptées.

En Belgique, la presque totalité des exploitations minières et des carrières sont à l'arrêt depuis déjà un certain temps. Leur état actuel est très rarement connu. Ce chapitre va tenter de poser des critères objectifs, qui permettront de choisir au mieux les futurs sites potentiels.

Nous abordons dans ce chapitre les méthodes de travail utilisées, les types de cavités souterraines et leurs caractéristiques, une estimation des puissances disponibles pour certaines d'entre elles, et ce pour aboutir au choix d'un type de cavité potentiellement intéressant.

2.1 Trouver un site adéquat : méthode de travail

Des mines en Belgique, il y en a eu. Le sous-sol belge est un vrai gruyère ! Les plus connues sont les charbonnages, mais les mines de fer étaient plus nombreuses [Denayer *et al.*, 2011]. Il faut également tenir compte des carrières souterraines qui peuvent avoir une morphologie bien différente de celle des charbonnages.

Un nombre impressionnant de références bibliographiques existent sur le sujet, mais les informations pertinentes sont noyées dans un amas de considérations diverses et variées. Nous recherchons des informations techniques, telles que la profondeur, le volume, les longueurs des galeries, etc. Mais, nous nous retrouvons devant la description d'une vie rude, de morts, de catastrophes, de mouvements de populations,... bref, tout un aspect social qui occulte l'information qui nous est réellement utile.

Quelle méthode de travail utiliser pour obtenir les informations recherchées ? Trois types d'analyse sont abordées ci-dessous. L'analyse des terrils, l'analyse basée sur l'histoire et l'analyse basée sur les informations directes.

2.1.1 Analyse des terrils

Il est plus facile d'analyser ce qui se situe en surface, que ce qu'il y a dans les sous-sols. Une première idée est donc de recenser les terrils. Et, connaissant le volume des terrils, en déduire le volume des galeries, sachant que les terrils étant composés des stérils évacués lors de l'exploitation, ils représentent une fraction du volume total extrait.

Notons d'emblée que cette analyse de terrils est surtout valable pour les charbonnages. En effet, dans les mines de fer, les parties exploitées étaient souvent remblayées par les stérils provenant des nouveaux chantiers. Il n'y avait donc pas de terrils comparables à ceux des charbonnages. Quant aux carrières souterraines, elles étaient exploitées en chambres, avec un volume utile beaucoup plus important. C'est-à-dire que la proportion de stéril par rapport à la roche exploitée était beaucoup plus faible. Les stérils y étaient d'ailleurs également souvent déplacés vers les chambres déjà exploitées.

Ce type d'analyse a vite montré ses limites. En effet :

- la quantité de stéril extrait est connue, mais pas la quantité de charbon vendu correspondant ;
- il est assez difficile de trouver des coefficients de foisonnement ;
- des tassements de terrains ont réduit le volume des galeries, mais pas celui des terrils. Le volume du terril ne correspond donc pas au volume des galeries actuelles ;
- s'il est possible d'estimer le volume total de la mine par l'analyse du terril, ceci ne donne aucune indication sur le nombre de galeries dans la mine. Or, ce qui nous intéresse, c'est le volume d'une partie de la mine, 1 ou 2 étage(s), et non tous les étages (la raison en est expliquée au chapitre 2.3).

Les inconnues sont nombreuses, et l'analyse sera donc très approximative. Cependant, elle peut quand même fournir des informations globales qui peuvent venir en complément d'une autre méthode d'analyse.

L'analyse par terrils ne sera donc pas la méthode d'analyse principale.

2.1.2 Analyse historique

Au fil des siècles, les moyens d'exploitation des mines ont évolué. Alors que tout était fait à mains d'homme à l'origine, l'industrialisation et le progrès technologique ont permis de creuser de plus en plus vite et de plus en plus profondément.

Pendant longtemps, l'eau a été un problème majeur. En effet, lorsqu'elles sont situées en dessous de la nappe phréatique, les galeries se remplissent d'eau. De nombreuses solutions ont été envisagées, mais c'est seulement en 1712, lorsque Thomas Newcomen mit au point une machine à vapeur activant une pompe, que le problème d'exhaure fut réellement réglé. Toutes les mines précédant cette date seront donc peu profondes, ou du moins pas beaucoup plus basses que le niveau d'eau de la nappe phréatique naturelle de l'époque.

L'industrialisation a aussi amené des nouvelles manières d'exploitation, comme la dynamite (inventée par A. Nobel en 1863 et commercialisée à partir de 1867) et le marteau-piqueur pneumatique (1908). L'excavation se fait dès lors plus rapidement, mais implique aussi une fragilisation plus grande de la roche. Celle-ci est donc moins résistante et plus fissurée.

Lors de la fermeture définitive d'une mine, l'administration obligeait les derniers exploitants à remblayer les puits afin d'éviter les catastrophes [Pacyna et Denayer, 2010]. Mais surtout, à peine les pompes d'exhaure arrêtées, l'eau commençait à reprendre son niveau naturel. De plus, des effondrements pouvaient aussi avoir lieu dans les galeries après leur fermeture. Tant que la mine était en exploitation, son état était suivi, mais une fois fermée et les puits rebouchés, son évolution n'est plus connue.

Plus la fermeture de la mine est ancienne, plus son état est incertain. Connaître l'année de fermeture d'une mine, donne donc une indication. Plus la fermeture de la mine sera récente, plus les dernières données connues seront fiables. On peut souligner que, indépendamment de ce fait, les dernières mines fermées, en Campine, sont celles qui possèdent les plus grands volumes et profondeurs.

Tout comme pour l'analyse des terrils, ces données historiques donnent des informations approximatives sur l'état actuel. Elles permettent cependant de se diriger vers les charbonnages les plus propices, et de faire une première sélection de sites potentiellement intéressants.

Il est clair que, vu le caractère aléatoire de l'état actuel des cavités souterraines, tous les éléments sont à prendre en compte pour approcher au mieux la cavité la plus appropriée.

2.1.3 Analyse basée sur des informations directes

De nombreuses archives existent sur les mines. Les exploitants étaient tenus de faire des plans et des relevés régulièrement. Ces archives minières sont toujours disponibles. On

peut en retrouver à la SPW¹ (pour le territoire de la Région wallonne) ainsi que dans diverses bibliothèques ou centres d'archives, comme celui de Belgny-Mine par exemple.

Il n'est cependant pas simple de trouver les plans adéquats. Le nombre d'archives est très impressionnant, et surtout, leur qualité très variable. Certains plans sont pour ainsi dire illisibles. De plus, le système métrique n'est apparu qu'à la révolution française, d'autres systèmes de mesure étaient utilisés auparavant. Une unité ne valant pas toujours nécessairement la même chose suivant les régions et les époques ! Il est donc parfois difficile d'avoir une échelle précise.

Deux grandes pistes ont, entre autres, été exploitées lors de ce travail.

Tout d'abord, les informations de type spéléologique. De nombreux passionnés et spéléologues visitent régulièrement des mines et puits toujours accessibles. Ces informations descriptives et photographiques sont d'un grand intérêt car ce sont des informations actualisées. Dans ce travail, les informations de type spéléologique proviennent principalement d'un ouvrage littéraire [Caubergs, 1991], et de nombreux reportages photos disponibles online [Duseigne, n d]. Ces photos permettent dans de nombreux cas d'estimer les diamètres des galeries, les personnes présentes sur les photos faisant office d'échelle.

Ensuite, le SPW possède une base de données importante. Une partie de ces données sont informatisées, d'autres sont stockées en format papier dans des centres d'archives. Les dossiers informatisés concernent surtout les puits et leurs principales caractéristiques, telles que la profondeur, le type de section (circulaire, rectangulaire), leur diamètre, leur localisation, s'ils ont été remblayés ou non, etc. La figure 2.1 montre une fenêtre de ce programme. En sélectionnant un ensemble de puits sur la carte, les informations les concernant apparaissent dans une fenêtre annexe.

Ces informations ne sont disponibles qu'en partie au public, via le portail online « CI-GALE » de la Région wallonne [SPW, 2013b]. Il est donc indispensable de prendre rendez-vous au SPW pour obtenir toutes les informations utiles.

Ces informations informatisées permettent de faire une première sélection de puits. Il est alors possible de se focaliser uniquement sur quelques puits d'une seule concession, afin de retrouver les archives papiers correspondantes. L'information la plus intéressante de ces archives papiers, sont les plans de différentes veines d'exploitation et bouveaux². On peut ainsi avoir un aperçu géométrique des galeries de la concession, et en estimer au mieux leur volume. A titre d'exemple, j'ai photographié, scanné puis reconstitué une

1. Service Public de Wallonie

2. Galeries, aussi appelées bacnures dans la région liégeoise.

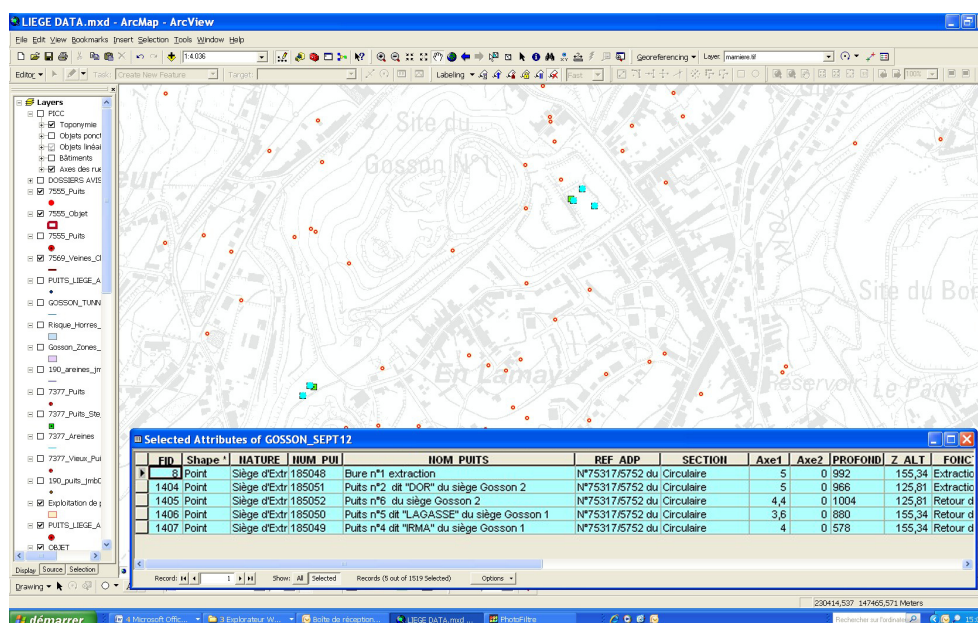


FIGURE 2.1: Logiciel : informations sur les puits en Région wallonne [J.-M. Bomboneyho, comm. pers, 2013]

partie du plan de la mine de Gosson-Kessales (commune de Saint-Nicolas) à la figure 2.2. En bleu sont représentés les bouvoux, et en noir les tailles et chantiers. En connaissant, ou en estimant, le diamètre des galeries, il est possible dès lors d'avoir une idée du volume total des galeries, comme nous le verrons au chapitre 4.1.

La recherche d'un site adéquat sera donc surtout menée à partir de documents d'archives sélectionnés depuis des données informatisées sur les puits. Ces informations seront complétées, d'une part par des informations de type spéléologique, et d'autre part par des données historiques, voire géographiques et géologiques au besoin.

2.2 Types de cavités souterraines et leurs caractéristiques

Il existe donc plusieurs types de cavités souterraines en Belgique. Chacune d'elles possède des caractéristiques propres liées au minerai ou à la roche exploités. Leurs caractéristiques sont plus ou moins intéressantes pour les projets de stockage par pompage-turbinage. Les types principaux sont ici analysés et commentés pour pouvoir faire le choix le plus judicieux possible.

De plus, avec le nouveau plan éolien (pour rappel, voir figure 1.6 page 17) et la carte du réseau électrique national (pour rappel, voir figure 1.7 page 18), il est possible de



FIGURE 2.2: Vue en plan de la mine de Gosson - Archive du SPW après reconstitution

comparer les zones minières exploitables, avec les zones dans lesquelles le stockage local d'électricité est le plus intéressant.

A noter que ce chapitre contient des généralités permettant de se faire une idée globale pour diriger la recherche. Chaque cavité est cependant unique. Les généralités doivent donc être confirmées pour chaque cas particulier.

Sont abordés ci-dessous les charbonnages, les carrières souterraines et, pour mémoire, les mines métalliques.

2.2.1 Les charbonnages

En Belgique, il existe cinq régions dans lesquels la houille a été exploitée. Le Borinage, la région du Centre, le pays de Charleroi, la région de Liège et finalement la Campine. La figure 2.3 localise ces différents gisements.

Nous pouvons séparer les charbonnages en deux types. D'une part des charbonnages peu profonds qui possèdent une galerie d'exhaure qui débouche dans la vallée adjacente. D'autre part, des charbonnages plus profonds qui descendent plus bas que la vallée adjacente.



FIGURE 2.3: Gisements charbonniers - position géographique [Erren, 2011]

Avant l'invention de la pompe à vapeur, permettant l'assèchement des galeries les plus profondes par exhaure, seules les mines peu profondes existaient, ou des mines comportant une galerie d'exhaure qui débouchait sur une vallée adjacente (voir figure 2.4). La profondeur maximale des mines était alors déterminée, soit par le niveau de la nappe phréatique, soit par la topographie, c'est-à-dire par la différence d'altitude entre le plateau et la vallée. Cette différence d'altitude peut atteindre jusqu'à 200, voire 300 mètres. La position de la mine va alors jouer un rôle important, suivant qu'elle est située en haut, au milieu ou en bas de la colline. Si on veut exploiter ce type de mine, il faut en effet utiliser, soit le dénivelé entre le plateau et la mine, soit le dénivelé entre la mine et la vallée.

La vallée étant souvent urbanisée, il sera difficile d'y installer de grandes étendues d'eau. Cependant il serait possible d'utiliser un fleuve ou une rivière en guise de bassin.

Dans ce type de charbonnages, la galerie d'exhaure est souvent scellée par un mur, afin d'en bloquer l'accès, et/ou d'en faire un captage d'eau. Le remplissage de la mine peut engendrer une surpression sur ce mur de scellement. Il est donc important de vérifier le dimensionnement de ce mur afin qu'il puisse reprendre ces pressions.

De plus, dans cette configuration, il est possible d'avoir un dénivelé plus important en exploitant le dénivelé total entre deux réservoirs placés dans la vallée et sur le plateau. Le

seul intérêt du STEP minier par rapport au STEP conventionnel serait ici de n'utiliser aucune place à la surface.

Ce type de mine n'est donc pas très intéressant.

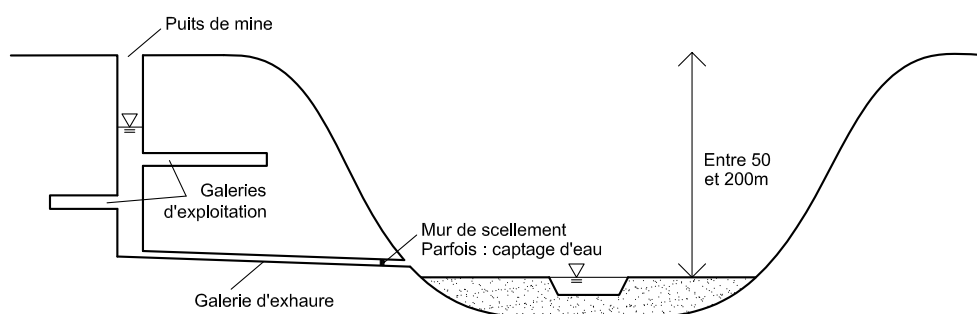


FIGURE 2.4: Charbonnage à une altitude supérieure à la vallée adjacente

L'autre type de charbonnages (voir figure 2.5), est indépendant de la topographie. Des pompes d'exhaure permettent d'évacuer l'eau d'infiltration. Ils peuvent donc atteindre des profondeurs beaucoup plus importantes, de 200 à 1000m, et même 1200m pour certaines mines en Campine, dans le Limbourg flamand. Cependant l'accès y est plus délicat, la descente se fait obligatoirement par un puits, vu qu'il n'est plus envisageable d'arriver par une galerie à flanc de vallée.

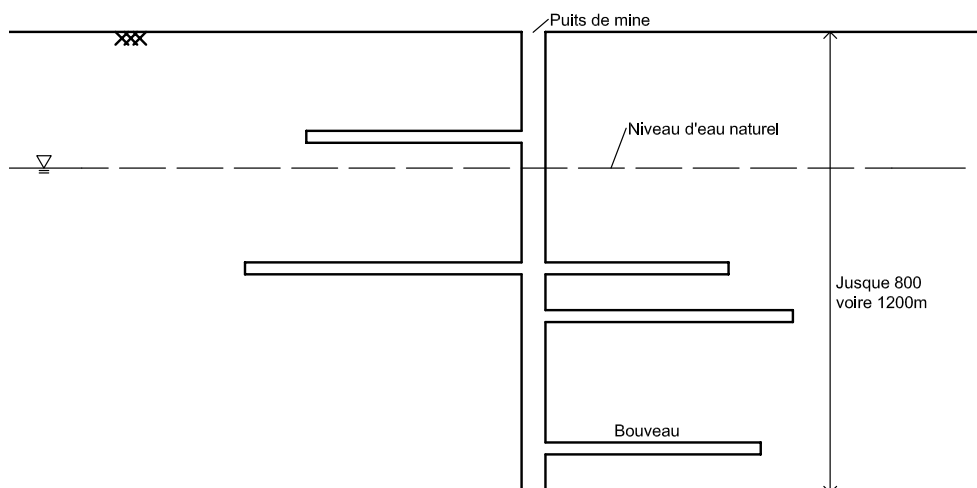


FIGURE 2.5: Charbonnage profond nécessitant une pompe d'exhaure

Ces charbonnages disposent donc de puits, qui ont été, à quelques exceptions près, tous rebouchés lors de la fermeture de la mine. De ces puits partent les bouveaux dans une ou plusieurs directions suivant la localisation des veines de charbons. Ces bouveaux

possèdent une faible pente dirigée vers le puits, afin que les eaux ruissellent vers celui-ci pour être ensuite pompées vers la surface. Cette pente est dans notre cas la bienvenue étant donné que les turbomachines doivent se situer au point convergent du réservoir. Lorsque qu'une galerie croise une veine de charbon, on arrive dans le chantier, zone où s'effectuent les opérations d'exploitation. Dans ces chantiers se retrouvent les tailles, zones d'abattage du charbon. Ces tailles suivent les veines de charbon, et ne sont donc pas horizontales. La figure 2.6 représente un charbonnage profond organisé autour de deux puits.

Dans les mines, deux types de galeries existent. D'une part les « galeries au rocher », aussi appelées « bouveaux », notées « grande galerie » sur le schéma, qui forment les voies d'ossature d'une mine. Elles ont une durée de vie très longue, de 20 à 100 ans. Elles permettent d'accéder aux différentes zones d'exploitation.

D'autre part les voies de chantiers et les tailles, qui ont, elles, une vie beaucoup plus courte. Une fois le charbon exploité, le soutènement de ces galeries est récupéré. Elles ne durent donc que quelques années tout au plus. [Stassen, 1986]

C'est pourquoi, ne connaissant pas l'état actuel des galeries, seuls les bouveaux seront pris en compte lors du calcul des volumes disponibles.

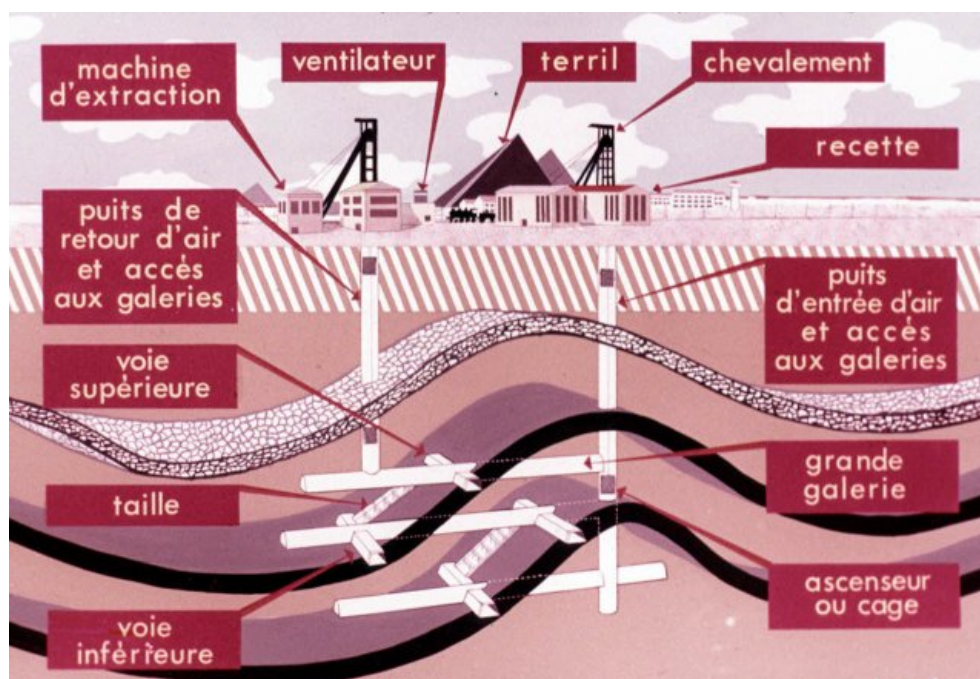


FIGURE 2.6: Schéma d'un charbonnage [Demarles, 2009]

A noter qu'un charbonnage possède toujours au minimum deux puits. Il est en effet

important de ventiler l'entièreté des galeries ; il faut donc un puits pour l'amenée d'air, et l'autre pour la sortie. Un système de portes est d'ailleurs disposé dans les boueux pour obliger l'air à passer dans toutes les galeries (voir figures 2.7 et 2.8). A noter que, si ces portes existent encore, elles pourraient être un frein à l'écoulement des eaux dans la galerie. Surtout que ces portes sont conçues pour se refermer toute seule sous l'effet de la gravité. Le niveau le plus bas est le plus susceptible de ne pas comporter ce type de porte, étant donné qu'il constitue le chemin le plus long pour le trajet de l'air.

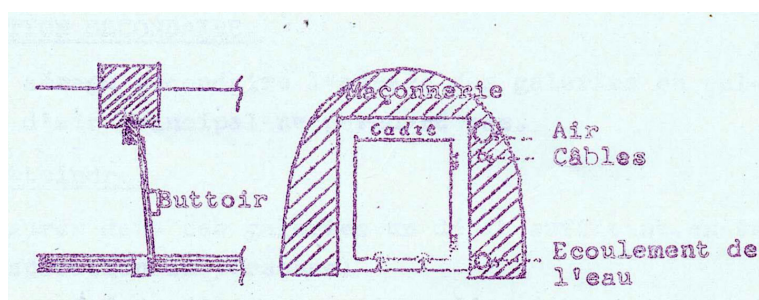


FIGURE 2.7: Schéma d'une porte d'aérage [Stassen, 1966]

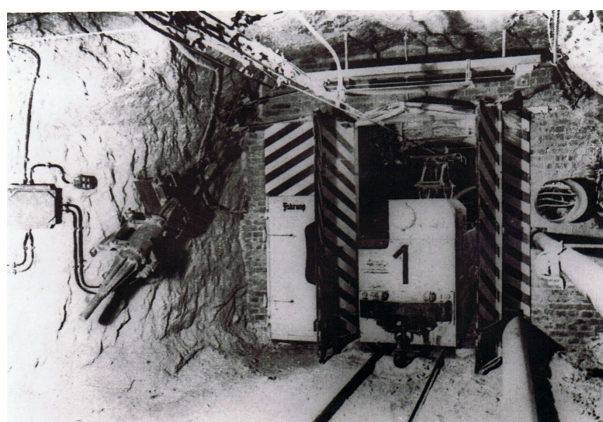


FIGURE 2.8: Photo d'une porte d'aérage [Stassen, 1966]

En ce qui concerne la dimension des galeries, celles-ci devaient permettre au minimum le passage des hommes. En fonction des époques, des chevaux ou des petites locomotives, permettant le transport de berlines (petits wagonnets), devaient également les emprunter. On peut dès lors estimer le diamètre des galeries entre 1,5 et 4m, ce qui correspond à une aire de 2 à 12m², ce qui est conforme à ce que l'on peut estimer lors d'une visite des anciennes mines de Blegny. D'autre part, dans son livre « exploitation des mines (III) » [Stassen, 1966] , l'auteur réalise des calculs sur des galeries entre 8 et 16m² de section. Dans le chapitre 4.1, la valeur considérée sera intermédiaire entre ces deux approches.

Généralement, les charbonnages sont donc profonds, comportent au minimum deux puits, possèdent plusieurs niveaux de galeries légèrement inclinées convergeant vers un des puits. Ces galeries peuvent atteindre plusieurs kilomètres, et peuvent partir dans toutes les directions, en fonction de la position des veines de charbon.

Les charbonnages des quatre régions situées en Wallonie sont très différents de ceux situés en Région Flammande. En effet, comme le montre bien la table 2.1, les charbonnages du Borinage, du Centre, du Pays de Charleroi et de Liège sont exploités depuis plusieurs siècles. D’abord très petits et peu profonds, ils s’approfondissent avec l’invention de la machine à vapeur de Thomas Newcomen en 1712, puis de la dynamite en 1863 et des marteaux-piqueurs pneumatiques en 1908.

En revanche, les charbonnages de Campine en Région flamande ont été creusés bien après ces inventions. Ils ont donc été conçus de manière beaucoup plus industrielle. Dans ces charbonnages, les galeries étaient construites en utilisant des voussoirs en béton [Loriaux, 1989], alors que dans les charbonnages wallons, elles étaient, la plupart du temps, soutenues par des étauçons ponctuels, d’abord en bois, ensuite en acier.

Les galeries les plus récentes des charbonnages wallons, pourraient cependant se rapprocher plus de celles des mines de Campine.

Charbonnages	Début d’exploitation	Fin d’exploitation	mise en place d’exhaure	Nb de charbonnages
du Borinage	an 1000	1976 (Sartys)	1730	élevé
du Centre	fin XIIe siècle	1973 (Quesnoy)	1766	élevé
du Pays de Charleroi	avant 1250	1984 (Roton)	1735	élevé
de Liège	fin XIIe siècle	1980 (Blegny)	1720	élevé
en Campine	1901	1992 (Zolder)	Dès l’origine	7

TABLE 2.1: Histoire des charbonnages d’après annexe n°1

2.2.2 Les carrières souterraines

Juridiquement, voici la définition d’une mine : « Les mines sont les exploitations de substances définies comme telles par la loi (combustibles fossiles, minerais métalliques, fer, alun,...), uniquement exploitables après obtention d’une concession. [...] La mine est donc définie par rapport aux substances concédées et non par rapport au mode d’exploitation (souterrain ou à ciel ouvert). » [Pacyna et Denayer, 2010]. Les carrières

sont dès lors simplement des exploitations non répertoriées comme mine. Dans notre cas, ce sont les carrières souterraines qui nous intéressent. A noter que les carrières à ciel ouvert pourraient aussi servir de bassin inférieur à un système de pompage-turbinage. Une telle centrale serait plus similaire aux STEP conventionnels, et sort donc du cadre de cette étude.

En Belgique, on exploite dans les carrières différents matériaux [Pacyna et Denayer, 2010] : craie ou marne, sables, argiles, terres réfractaires, grès, calcaires, silex, « marbres », ardoises, coticule, etc.

La morphologie des carrières souterraines est différente de celle des charbonnages. Elles étaient principalement exploitées en chambres plurimétriques, voire décamétriques. Il n'était cependant pas rare que ces chambres, après leur exploitation, soient rebouchées avec les stérils et déchets provenant des nouvelles chambres exploitées, ce qui permettait d'éviter de les remonter à la surface, et donc réduisait la dépense d'énergie. Les volumes disponibles sont donc réduits.

Chaque type de carrière souterraine possède des caractéristiques bien particulières (voir annexe n°1). Certaines sont donc plus adaptées au projet que d'autres. Les deux types les plus intéressants, en ce qui nous concerne, sont tout d'abord les ardoisières, ensuite les carrières de roches cohérentes (grès, calcaire et « marbres »). Elles sont en effet plus profondes et plus volumineuses ; les caractéristiques de ces deux types de carrières, ardoisières et roches cohérentes, sont détaillées ci-dessous.

Notons qu'à partir de 1935, les exploitants étaient tenus de dessiner des plans de leurs carrières, et que le remblayage des puits mis définitivement hors service était de rigueur [Pacyna et Denayer, 2010]. J'ai entendu dire qu'ils existaient bel et bien, par exemple chez les derniers propriétaires des lieux. Il m'a été cependant impossible de retrouver le moindre plan.

Les ardoisières

Le livre « Inventaire de quelques anciennes mines et carrières souterraines de Wallonie, essai d'archéologie minière » [Caubergs, 1991], définit bien la morphologie des ardoisières.

« La roche proche de la surface ayant subi diverses altérations, il faut donc pénétrer à une certaine profondeur sous terre.

C'est le pendage parfois important des bancs de schiste qui déterminera la forme générale de la cavité.

On trouvera ainsi : soit une simple galerie horizontale avec chambres d'exploitation, soit plusieurs galeries horizontales avec chambres d'exploitation, soit plusieurs galeries horizontales étagées à flanc de vallée et communiquant parfois par des puits obliques, soit enfin une exploitation par puits menant à différents niveaux de galeries.

Certaines chambres d'exploitation ont laissé des vides impressionnants. Mais le plus souvent, après leur abandon, elles étaient bourrées de remblais destinés à soutenir les voûtes. »

La figure 2.9 illustre le cas de plusieurs galeries horizontales étagées à flanc de vallée et communiquant par un puits oblique. La figure 2.10 schématise, quant à elle, l'ardoisière de Martelange dont l'exploitation était organisée par puits menant à différents niveaux.

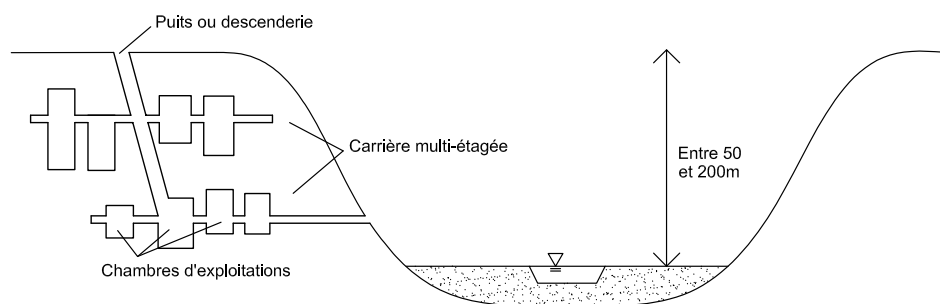


FIGURE 2.9: Carrière souterraine multi-étagée à flanc de vallée

Une chambre peut avoir des dimensions impressionnantes, parfois de plusieurs dizaines de mètres de haut, de long et de large. Lorsque la zone est trop grande, plusieurs chambres sont placées les unes à côté des autres, pour que le toit³ continue à être supporté par les parois entre les différentes chambres.

Les ardoisières sont cependant beaucoup moins profondes que les charbonnages. Les phyllades⁴ de bonne qualité se trouvent en grande quantité non loin de la surface. Inutile donc de rechercher des veines à grande profondeur. La profondeur maximale se situe entre 100 et 200 mètres.

Une autre caractéristique à l'avantage des ardoisières est la bonne étanchéité des phyllades. Il y a donc moins de risques de tassement et de contamination. Le rabattement de la nappe est également plus rapide, et le débit d'eau d'infiltration est également moindre.

3. Terrain situé au dessus des cavités

4. Roches exploitées pour la fabrication d'ardoises

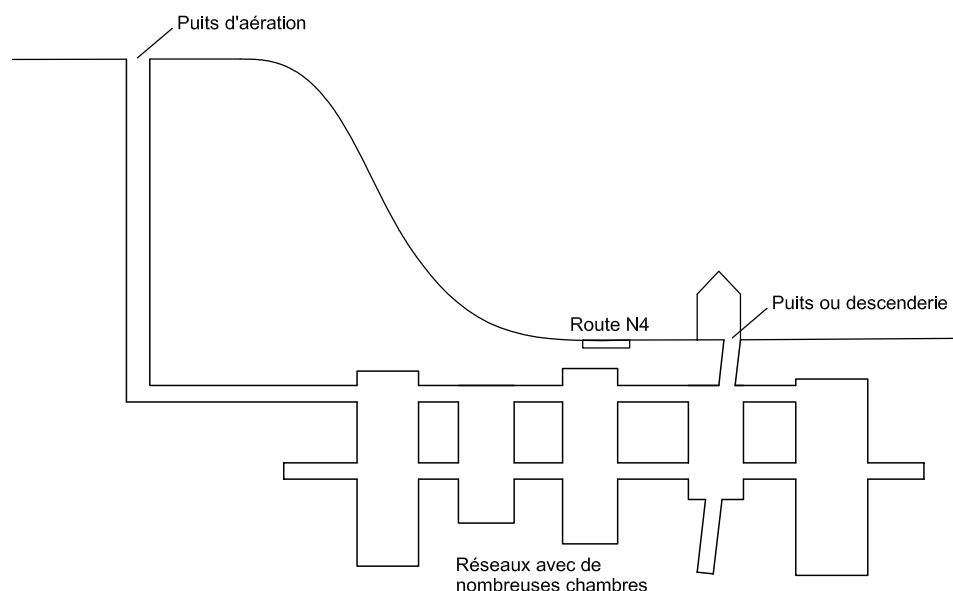


FIGURE 2.10: Ardoisière de Martelange schématisée

En Belgique, on retrouve les ardoisières surtout en Ardenne. J'ai recensé sur Google map (voir figure 2.11), via les informations répertoriées dans l'annexe n°1 quelques ardoisières de Belgique.

En résumé, bien que les ardoisières soient relativement peu profondes (en comparaison avec les charbonnages), leur volume est plus important et plus facilement exploitable. De plus, leur étanchéité est une caractéristique intéressante. Ceci constitue, comme nous le verrons dans l'étude de cas du chapitre 4.2, les conditions de base d'une bonne faisabilité technique et économique.

Les carrières souterraines de roches cohérentes (grès, calcaire et « marbres »)

Les carrières souterraines de roches cohérentes sont principalement situées à flanc de vallée. Cette disposition engendre une hauteur de chute beaucoup plus faible, comme expliqué pour les charbonnages. Ces cavités ne sont donc intéressantes que si leur volume est très important, ce qui est rarement le cas. Des exceptions existent, comme par exemple la carrière « Les Grands Malades » à Beez près de Namur. Cette exploitation de marbre consiste en un vaste souterrain d'environ $71.000m^2$ [Caubergs, 1991]. Au vu des photos de ce lieu [Duseigne, n d], les hauteurs ne sont pas négligeables, et on peut estimer le volume de cette carrière à plus de $200.000m^3$. Mais ces exceptions sont rares ;

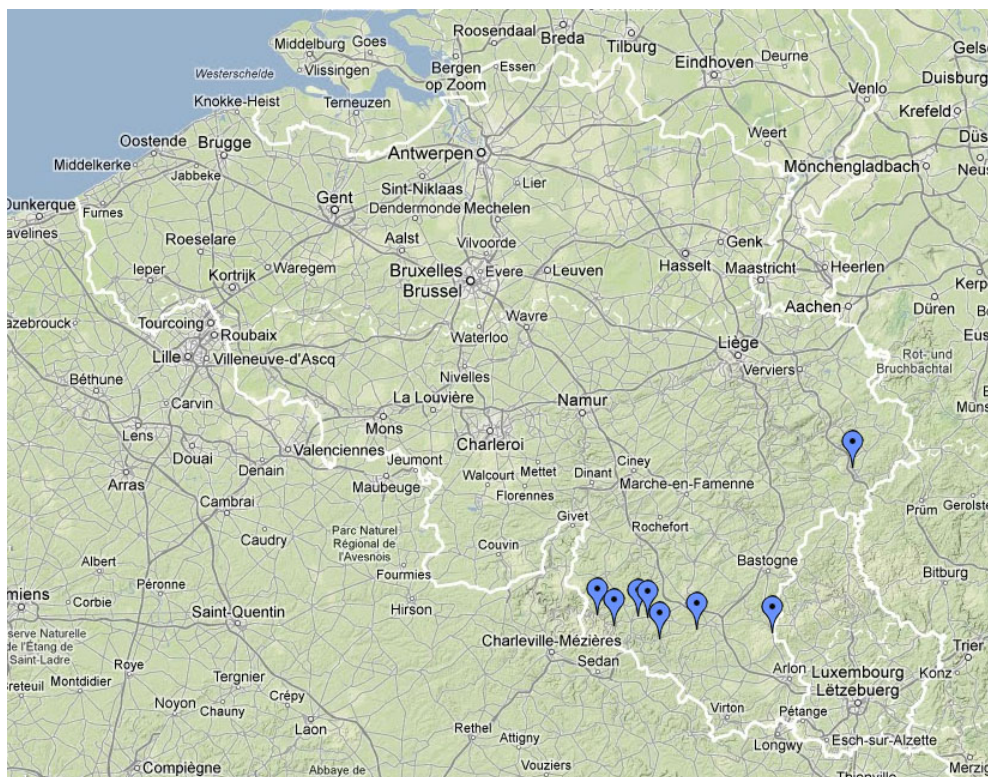


FIGURE 2.11: Ardoisières - position géographique

les autres ne dépassent que rarement les quelques centaines, voir quelques milliers de mètres cubes.

Les carrières souterraines sont souvent exploitées en chambres par piliers abandonnés. Ceci signifie que, au vu du volume des chambres exploitées, il était important de supporter le ciel⁵. Des piliers de roches non exploités étaient dès lors laissés en place pour la bonne stabilité de la cavité.

Le foudroyage était parfois d'application. C'est-à-dire, qu'à la fin de l'exploitation, les piliers abandonnés étaient à leur tour exploités pour récupérer les derniers mètres cubes de roches. La carrière s'effondrait alors sous le poids des terres au dessus d'elle. Après foudroyage, les volumes disponibles sont donc très fortement réduits.

Lorsque le foudroyage n'avait pas lieu, il était d'usage, comme décrit plus haut, de remplir les chambres déjà exploitées par les stérils provenant des chambres en exploitation.

5. Le ciel signifie le plafond de la cavité souterraine.

Dans ce cas de figure, les volumes disponibles sont également fortement réduits.

Remarquons que ces usages de foudroyage et de remblayage pouvaient aussi avoir lieu dans les ardoisières.

2.2.3 Mines métalliques

Quand on parle de mine en Belgique, on pense avant tout au charbon. Les mines de fer étaient pourtant les plus nombreuses [Denayer *et al.*, 2011]. Mais les mines métalliques ne représentent pas un grand intérêt dans le cadre de ce projet, car elles ne sont jamais ni très profondes, ni très spacieuses, dans notre pays.

De plus, le minerai se situe souvent dans des couches de calcaire, peu propice au cycle de remplissage-vidage auquel on voudrait les soumettre. Enfin, la présence de métaux lourds pourrait être source de pollution.

Les mines métalliques sont donc citées ici pour mémoire.

2.2.4 Résumé des caractéristiques de chaque type de cavité

Nous nous retrouvons donc avec deux morphologies possibles. D'un côté les charbonnages, de l'autre les carrières souterraines d'ardoises ou de roches cohérentes.

Caractéristiques des charbonnages :

- jusqu'à 1000 voire 1200m de profondeur,
- réseau de galeries organisé en étoiles s'articulant autour de 2 ou 3 puits,
- galeries entre 2 et 12m² de section,
- galeries très longues, jusqu'à plusieurs kilomètres,
- débit d'eau d'infiltration souvent élevé.

Caractéristiques des ardoisières :

- jusqu'à 200m de profondeur,
- chambres parfois pluridécamétriques,
- descenderie souvent inclinée suivant le pendage,
- bonne étanchéité naturelle.

Caractéristiques des carrières souterraines de roches cohérentes :

suitant le type de roche exploitée, ces données peuvent être précisées

- jusqu’à 100m de profondeur,
- chambres pluri- voir déca-métriques,
- chambres à piliers abandonnés.

Il est important de rappeler que ces données sont générales, et qu’aucune cavité n’est parfaite. La nature géologique implique des accidents et des irrégularités dans le terrain. De plus, toutes les exploitations sont différentes, et leur morphologie s’est dessinée en fonction des ressources disponibles ainsi que des moyens de l’époque de leur exploitation. Il est donc nécessaire de préciser ces données lors de l’étude de chaque cas particulier.

2.3 Puissances et cycles des STEP miniers

Posons-nous maintenant la question de l’ordre de grandeur de l’énergie emmagasinable dans les différents types de cavités, ainsi que la puissance mobilisable.

Pour ce faire, estimons le volume et la profondeur des différents types de cavité. Sont ajoutés, en guise de comparaison, quelques projets de stockage existants. Ces projets serviront de référence, pour situer au mieux la gamme de puissances disponibles pour chaque type de cavité, par rapport aux autres projets de stockage.

Des projets fictifs, basés uniquement sur le dénivelé topographique de certains lieux, ont aussi été ajoutés, ce qui permet de comparer les puissances disponibles à celles de projets conçus uniquement en surface.

Les volume et profondeur des cavités étudiées sont estimés sur base bibliographique, mais surtout spéléologique. Certaines dimensions, tels les diamètres, sont souvent estimés à partir de photos. Les cavités choisies sont très variées. Elles n’ont parfois pas du tout les caractéristiques nécessaires à la réalisation du projet. Le but est d’avoir un échantillon assez diversifié, afin de se faire une idée des puissances mobilisables.

Les tables 2.2 page 50 et 2.3 page 51 reprennent les différents sites étudiés, et spécifient le type de site. La prise en compte de la topographie, signifie que la cavité souterraine est située près d’une colline, sur laquelle peut être placé le réservoir supérieur. La topographie nous permet donc d’augmenter la hauteur de chute.

L’ensemble des données et résultats des calculs, ainsi que les sources utilisées, sont repris dans l’annexe n°2. Les résultats sont aussi présentés, sur deux graphiques (figures 2.14 et 2.15), l’un reprenant les sites offrant une grande puissance, l’autre reprenant ceux offrant une petite puissance. Ces deux graphiques sont également repris dans l’annexe n°2.

Il est important de noter qu'il n'est pas toujours opportun de stocker l'eau le plus profondément possible. La profondeur du puits détermine la hauteur maximum disponible, mais pas nécessairement la hauteur que l'on doit exploiter. La hauteur doit être choisie en fonction de ce qui est disponible, mais aussi suivant la puissance désirée (une trop grande puissance pourrait demander des turbomachines bien trop complexes à mettre en oeuvre à grande profondeur), ou encore suivant le niveau de la nappe phréatique (voir le chapitre 2.5).

Dans le cas des charbonnages, différentes veines de charbon ont été exploitées, et il existe des galeries à différents niveaux. L'eau ne doit pas nécessairement être stockée dans les galeries les plus profondes. Deux possibilités se présentent. Stocker l'eau uniquement dans un niveau de bouveau (voir figure 2.12), ou stocker l'eau entre plusieurs niveaux de bouveaux en considérant que l'eau circule par les tailles (voir figure 2.13). La première possibilité semble la plus facile à mettre en oeuvre, mais présente un volume moins conséquent.

De même pour les ardoisières et autres carrières souterraines, il n'est pas toujours nécessaire d'utiliser tout le volume à disposition.

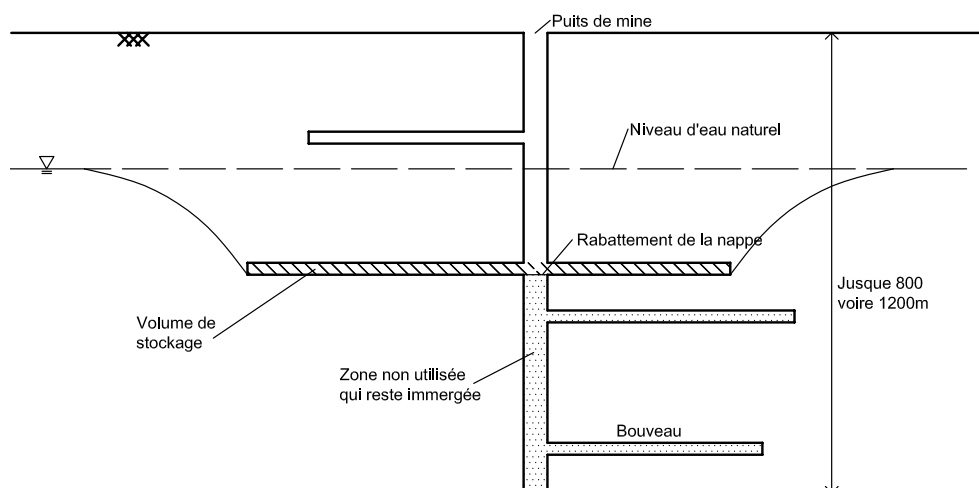


FIGURE 2.12: Stockage sur un seul niveau de galerie

Pour une même cavité, plusieurs estimations ont donc parfois été faites, suivant les hypothèses considérées (voir table 2.2).

Une fois le volume et la profondeur estimés, il est nécessaire de calculer la puissance, ce qui nécessite de calculer la capacité de stockage énergétique brut, grâce à la formule suivante :

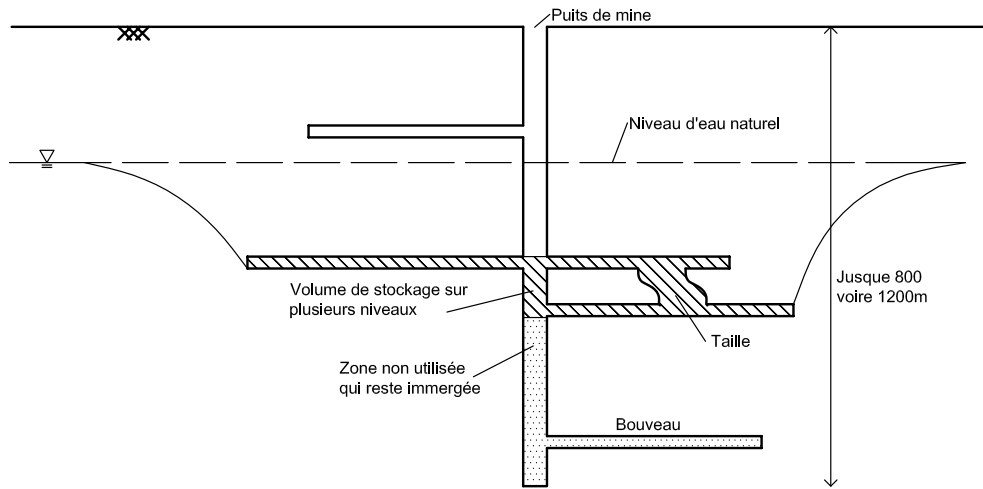


FIGURE 2.13: Stockage sur plusieurs niveaux de galerie

$$E = \frac{V \cdot \rho \cdot g \cdot H}{3,6 \cdot 10^9}$$

Avec :

- E : l'énergie maximale que la cavité peut emmagasiner en MWh ;
- V : le volume en m^3 ;
- $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$: la masse volumique du fluide ;
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$: l'accélération gravitaire terrestre ;
- H : la hauteur de chute moyenne ;
- $3,6 \cdot 10^9$: le changement d'unité entre les joules $[J]$ et les MégaWatts heure $[MWh]$.

Cette énergie correspond à l'énergie stockable dans le bassin supérieur. C'est ainsi qu'au vu du rendement de la partie pompage (environ 88%, nous en reparlerons au chapitre 3.2), une plus grande quantité d'énergie sera nécessaire pour remonter l'eau dans le bassin supérieur. De plus, le rendement de la partie turbine (environ 88%) ne permettra pas de récupérer l'entièreté de cette énergie potentielle en énergie électrique. Nous en reparlerons dans le chapitre 3.2.

La puissance peut alors être calculée pour un temps de turbinage donné. Plus le temps sera court, et plus la puissance sera élevée. Et vice-versa. La puissance est donnée par :

$$P = \frac{E \cdot \eta}{t}$$

Avec :

- P : la puissance en MW ;
- E : l'énergie en MWh ;
- η : rendement de la partie turbine ;
- t : la durée de turbinage en h.

Il est également possible de calculer les débits d'eau nécessaires pour développer cette puissance. Estimer ces débits permet d'avoir un premier ordre de grandeur des tuyautes qui devront être mises en place. Ils s'obtiennent par la formule :

$$Q = \frac{V}{3600.t}$$

Avec :

- Q : le débit en m^3/s ;
- V : le volume en m^3 ;
- t : le temps en h ;
- 3600 : le coefficient pour passer d'heures [h] en secondes [s].

Pour rappel, les résultats complets sont présentés dans l'annexe n°2. Ils sont repris à la figure 2.14 pour les sites offrant de plus grandes puissances, et à la figure 2.15 pour ceux offrant de plus petites puissances. A noter que des commentaires sur les estimations et hypothèses faites sont disponibles directement dans l'annexe.

Le lieu « ardoisière de Martelange (Estimation 1) » a été volontairement mis sur les deux graphiques afin d'établir un lien de comparaison. Comme on peut le remarquer, seules les mines en Campine, telle la mine du Zolder, peuvent rivaliser avec les centrales actuelles, en terme de puissance développée. Ces mines sont , comme déjà dit, les mines les plus récentes et donc fortement industrialisées. Leurs profondeur et volume sont impressionnants. Notons toutefois, que l'estimation des volumes faite par [Loriaux, 1989] semble fort optimiste.

Au vu des volumes et hauteurs d'eau disponibles, la gamme de puissance se situerait donc entre 1 et 50 MW.

A noter qu'une étude de « smart grids⁶ » est nécessaire sur le réseau actuel mais surtout sur le réseau futur pour déterminer les temps de turbinage et de pompage optimaux. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, c'est une étude très complexe, qui sort du cadre de ce travail. Dès lors nous ferons les hypothèses simplificatrices suivantes :

6. Réseau électrique « intelligent » utilisant des technologies informatiques pour optimiser la production, la distribution, la consommation.

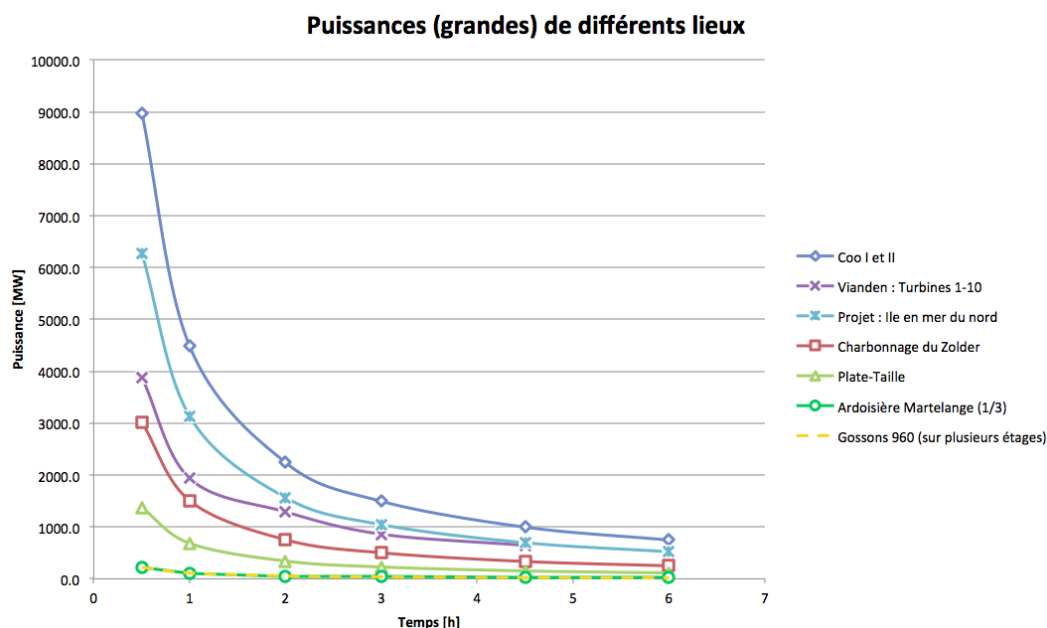


FIGURE 2.14: Puissances disponibles pour les sites les plus puissants

- le temps de turbinage sera équivalent à la durée des pics de consommation, c'est à dire 3h ;
- le temps de pompage, lui, sera utilisé pour éviter les congestions, c'est à dire absorber le surplus de l'électricité éolienne. Nous nous baserons sur une durée de 6h.

Autant la durée des pics de consommation est relativement connue et stable, autant la durée des congestions est, elle, plus aléatoire. La valeur de 6h représente un ordre de grandeur permettant de garder une puissance raisonnable sur un temps relativement long. De plus, cette valeur présente l'avantage d'être le double du temps de turbinage. Or nous verrons dans le chapitre 3, que certaines turbines, dites réversibles, ont approximativement la même puissance en turbinage qu'en pompage. Dès lors, en disposant d'un système avec deux turbomachines de ce type, il est possible de les utiliser toutes les deux lors du turbinage, permettant alors de turbiner la totalité du volume en 3h, alors qu'en pompage, une seule turbomachine peut être utilisée, et ainsi pomper la totalité en 6h.

2.4 Choix d'un type de cavité souterraine

Les carrières souterraines de roches cohérentes semblent être, à très peu d'exceptions près, trop petites et pas assez profondes pour accueillir des centrales de pompage-turbinage. Leur potentiel de stockage énergétique est trop faible. Il en est de même pour les mines métalliques.

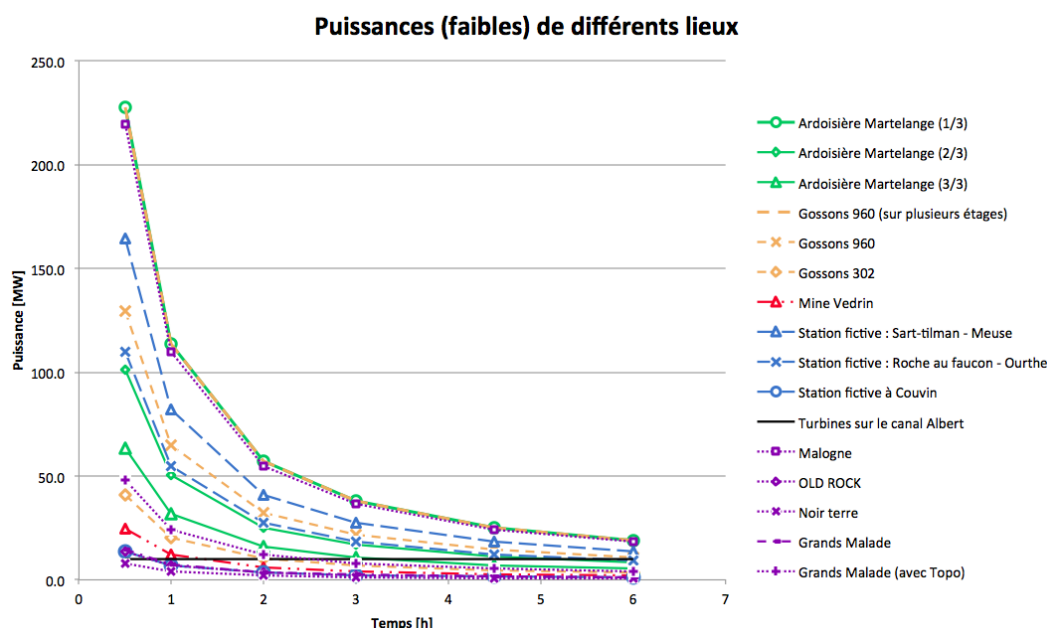


FIGURE 2.15: Puissances disponibles pour les sites les moins puissants

Les grandes ardoisières par contre semblent les plus appropriées. Leur volume important et leur profondeur respectable sont susceptibles de convenir. Cependant il n'en existe pas beaucoup. Après recherches, les ardoisières de Martelange et celles de Warmifontaine semblent être deux possibilités intéressantes.

Les charbonnages semblent moins appropriés que les ardoisières. Leur volume, composé de très longues galeries est moins compact, ce qui pose problème pour l'écoulement hydraulique, nous y reviendrons plus tard dans le chapitre 3.1. En revanche il y en a beaucoup. Le choix du site est donc plus facile, et de telles centrales pourraient être multipliées sur le territoire. De plus, il est possible de choisir le lieu en fonction des demandes du réseau électrique, et non pas uniquement en fonction de l'existence d'un site potentiel.

Les charbonnages de Campine sont les plus susceptibles d'être en bon état. Ils permettraient aussi les plus grandes puissances étant donné leurs profondeurs et volumes.

Dans le chapitre 4, deux cas particuliers seront étudiés. Une ardoisière située à Martelange, et le charbonnage de Gosson-Kessales situé en région liégeoise. Rappelons que la gestion du sous-sol étant régionale, nous concentrons notre étude sur la Région wallonne.

2.5 Gestion de l'eau et conflits d'utilisation

Trois problèmes majeurs apparaissent concernant la gestion de l'eau. Premièrement les conséquences du rabattement de la nappe pour arriver au niveau de galerie souhaité. Ensuite les effets de la fluctuation du niveau d'eau suite aux remplissages et vidages réguliers. Enfin les conflits qui peuvent naître entre différents acteurs pour l'utilisation des eaux souterraines, des mines et cavités.

2.5.1 Rabattement de la nappe

Dans le cas où la cavité choisie est située sous le niveau d'eau naturel, il sera nécessaire de la vider pour accéder au volume de stockage. Il faudra donc rabattre la nappe. D'un point de vue technique, cela ne devrait pas poser de problème, l'exhaure étant pratiqué abondamment depuis le XVIII^e siècle dans les mines. Par contre, le rabattement peut induire différents phénomènes d'importance variable.

La première conséquence à envisager concerne la stabilité, et plus spécifiquement le tassement à la surface engendré par le rabattement de la nappe. De manière générale, comme les cavités ont déjà été asséchées lors de leur exploitation, des tassements ont déjà eu lieu. Les terrains peuvent dès lors être considérés raisonnablement comme déjà consolidés. Les tassements résultant d'un nouveau rabattement constituent un risque assez faible.

A noter que le rabattement des nappes peut avoir des aspects bénéfiques sur les inondations. L'assèchement du terrain est susceptible d'augmenter le taux d'infiltration.

Plus problématique est la question posée par la remontée des nappes lors de l'arrêt d'exploitation. Les centrales auront en effet une durée de vie limitée, et il est important d'anticiper les problèmes pouvant provenir en fin d'exploitation. La nappe reviendra alors à son niveau naturel. Or, lors de l'exploitation, les galeries auront régulièrement été mises en contact avec de l'air. Les sulfates en présence auront donc eu tout le temps de réagir et de s'oxyder. Lors de la remontée de la nappe, ces oxydes, comme par exemple du $FeSO_4$ ou même du $AsFeSO_4$ remonteront à la surface. Ces oxydes sont sources de pollution. Ce phénomène est déjà apparu lors des fermetures des mines. [A. Dassargues, comm. pers., 2013]⁷. Il est illustré à la figure 2.16

Une solution envisagée pour réduire ces effets, consiste à limiter au maximum le rabattement de la nappe. A la place d'utiliser les volumes les plus bas disponibles, on peut

7. Professeur et géohydraulicien, à l'Université de Liège.

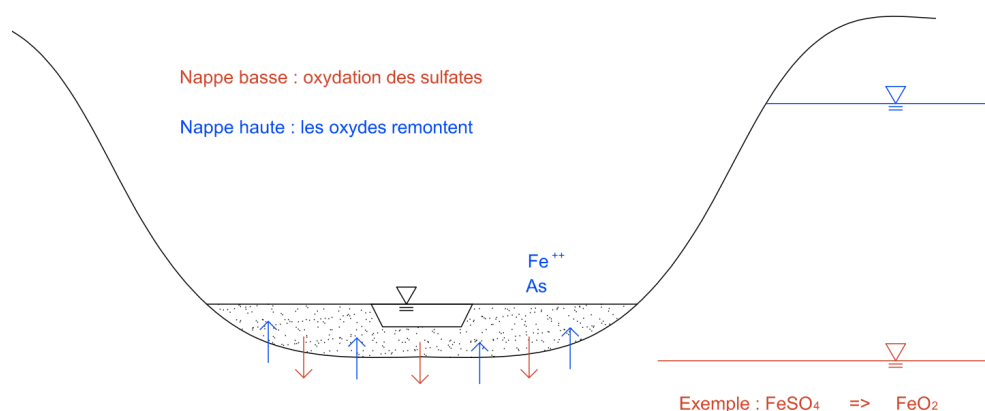


FIGURE 2.16: Pollution possible lors de la remontée d'une nappe phréatique

rabattre la nappe jusqu'à un niveau plus haut et utiliser une tranche supérieure. Cette solution implique cependant une hauteur de chute plus faible, et donc une capacité de stockage inférieure. Cette configuration a déjà été évoquée au chapitre 2.3 concernant l'estimation des puissances disponibles (figure 2.12 page 41).

Le réservoir inférieur sera donc constitué par la fluctuation du niveau de la nappe, les galeries étant là pour assurer une vitesse d'adaptation rapide de ce niveau. Cependant, l'équilibre du niveau de la nappe sera artificiel. La nappe aura constamment tendance à essayer de retrouver son niveau naturel. Des infiltrations sont donc à prévoir. Il est important de les quantifier, car cette amenée d'eau constante devra être ramenée à la surface par pompage, et ne pourra pas être turbinée. Le rendement du système en sera donc affecté.

Pour donner un ordre de grandeur des débits d'exhaure, on parle de 8.000 à 20.000 l/h pour Blegny Mine. Mais ces données sont propres à chaque exploitation et dépendent de la nature de la roche en présence et des caractéristiques hydrogéologiques des sols.

Le fait de moins limiter le rabattement de la nappe diminuera aussi ces infiltrations. En effet, celles-ci sont fonction de la différence de niveau entre le niveau réel et le niveau d'équilibre (naturel) de la nappe [Bossut, 2002].

Une solution radicale consisterait à rendre les galeries totalement étanches. Toutefois le coût prohibitif d'une telle opération nous a poussé à ne pas étudier cette possibilité.

2.5.2 Effet cyclique de remplissage-vidage

L'étude de l'effet régulier de charge et décharge sur la roche en présence est une étude à part entière assez complexe. Deux problèmes principaux se posent. D'une part, une sollicitation cyclique peut entraîner des problèmes de fatigue au sein des terrains alentours qui risquent de ne pas supporter ces cycles réguliers. D'autre part, un phénomène d'érosion peut avoir lieu. Dans ce cas, des particules sont donc enclines à circuler en suspension dans l'eau, ce qui peut poser problème pour les turbomachines qui seront fortement sollicitées. Il est donc important de quantifier ces particules en suspension, en connaître leur granulométrie, pour en limiter la quantité au maximum.

Dans le cas des charbonnages, une possibilité consiste à n'utiliser qu'un seul niveau de galerie en guise de volume de stockage. Dans cette configuration, l'effet de charge et décharge aura moins d'incidence sur le massif. Les problèmes d'érosion seraient toujours d'actualité, mais la variation des sollicitations sur les parois serait moins importante, au vu de la différence de pression plus faible (voir configurations figures 2.12 page 41 et 2.13 page 42).

Dans le cas des ardoisières, ou plus généralement des cavités composées de chambres, la différence de hauteur d'eau du cycle sera plus importante. Les terrains alentours seront donc plus sollicités. De plus, les chambres sont souvent, par leur forme, moins stables que les galeries. D'ailleurs il n'est pas rare, dans les ardoisières, que lorsqu'une chambre s'effondre, un ensemble de chambres alentours soient emportées avec, comme ce fut le cas à Warmifontaine en 1912 [Santinelli, 1994].

En revanche, le volume étant plus compact, les vitesses de l'eau sont moins importantes et l'érosion moins importante également.

2.5.3 Conflits d'utilisations

L'eau souterraine est utilisée à différentes fins, citons par exemple le captage d'eau potable et la géothermie. Ces utilisations de l'eau peuvent entrer en conflit avec un projet de stockage par pompage-turbinage.

D'autre part, les cavités souterraines peuvent être utilisées d'autres manières. Notons par exemple les sites protégés par intérêt chiroptérologique (protection des chauves-souris), les sites touristiques telle la mine de Blegny, ou encore, la récupération du grisou. Une priorité devra parfois être fixée (pour mémoire).

On rentre là dans un problème qui peut s'avérer politique. De plus ces questions sont très locales, et dépendent du site choisi. Elles ne seront donc pas prises en compte dans ce présent travail, mais sur le terrain, ne seront pas à mésestimer, car un excellent projet d'un point de vue constructif ou économique peut parfois être débouté pour des raisons politiques, sociétales ou d'intérêt général.

La gestion de l'eau est donc un élément inhérent au projet. Cet élément ne sera pas pris en compte pour le choix du type de cavité, mais devra être étudié pour chaque site choisi.

	Nom	Type	Source utilisée pour l'estimation	Volume [m^3]	H [m]
1	Coo I et II	STEP en fonctionnement	Visite personnelle (20/02/2013)	8.500.000	250
2	Vianden : turbines 1-10	STEP en fonctionnement	Visite personnelle (26/02/2013)	6.800.000	270
3	Projet : Ile en Mer du nord	Projet d'une île artificielle de faible chute mais avec un très grand volume	[Ploye, 2013, Huart (dir.), 2013c]	100.000.000	15
4	Mine du Zolder	Charbonnage en Campine (Limbourg flamand)	[Loriaux, 1989]	1.020.000	700
5	Plate-Taille	STEP en fonctionnement au lac de l'Eau d'Heure	[région wallonne, n d]	6.500.000	50
6	Ardoisière Martelange (1/3)	Ardoisière entièrement remplie + topographie	[Duseigne, n d] et [M. Nahant, comm. pers., 2013]	300.000	180
7	Ardoisière Martelange (2/3)	Ardoisière entièrement remplie sans la topographie		300.000	80
8	Ardoisière Martelange (3/3)	Ardoisière partiellement remplie + topographie		100.000	150
9	Gossons 960 (sur plusieurs étages)	Charbonnage (commune Saint-Nicolas) descendant à 960m de profondeur. Prise en compte de plusieurs niveaux de galeries	Estimation sur base de « Gossons 960 »	60.000	960
10	Gossons 960	Charbonnage (commune Saint-Nicolas) descendant à 960m de profondeur. Prise en compte d'un seul niveau de galerie	voir chapitre 4.1	32.000	960
11	Gossons 302	Charbonnage (commune Saint-Nicolas) descendant à 302m de profondeur	Estimation sur base de « Gossons 960 »	32.000	130

TABLE 2.2: Sites étudiés pour l'estimation des puissances mobilisables (1/2)

	Nom	Type	Source utilisée pour l'estimation	Volume [m^3]	H [m]
12	Mine Vedrin	Mine de pyrite et de plomb	[Duseigne, n d]	45.000	130
13	Station fictive : Sart-Tilman - Meuse	STEP conventionnel en surface (n'existe pas)	Altitude donnée par Google Earth. Volume : fonction du débit d'étiage de la Meuse : $30m^3/s$.	300.000	130
14	Station fictive : Roche-au-faucon - Ourthe	STEP conventionnel en surface (n'existe pas)	Altitude donnée par Google Earth. Volume : fonction du débit d'étiage de l'Ourth : $8m^3/s$	100.000	260
15	Station fictive à Couvin	STEP conventionnel en surface (n'existe pas)	[Hendrick <i>et al.</i> , 2011]	40.000	80
16	Turbines sur le canal Albert	Vis d'archimède sur le canal Albert permettant de générer de l'électricité	[Huart (dir.), 2013b]	-	10
17	Malogne	Carrière souterraine près de Mons	[Duseigne, n d]	1.300.000	40
18	OLD ROCK	Carrière souterraine de coticule à flanc de vallée	[Caubergs, 1991]	40.000	80
19	Noir-Terre	Carrière souterraine de marbre noir près de Dinant	[Caubergs, 1991]	52.000	35
20	Grands Malades	Carrière souterraine de marbre à Beez	[Caubergs, 1991, Duseigne, n d]	227.200	15
21	Grands Malades (+ topographie)	Carrière souterraine de marbre à Beez	[Caubergs, 1991, Duseigne, n d]	227.200	50

TABLE 2.3: Sites étudiés pour l'estimation des puissances mobilisables (2/2)

Chapitre 3

Ecoulement hydraulique et système de pompage turbinage

L'utilisation de galeries souterraines, en lieu et place de réservoirs conventionnels, influence fortement la conception de la centrale. Dans les galeries souterraines, en effet, il est primordial d'étudier l'écoulement, ainsi que l'érosion des parois lors du cycle de charge et décharge.

Différentes technologies peuvent être mises en place, et nous verrons dans ce chapitre que de nouvelles alternatives sont peut-être à prévoir pour permettre la rentabilité d'un tel projet.

3.1 Ecoulement en galerie

Les mines comportent un réseau de galeries assez complexe. Celui-ci n'a pas été prévu pour accueillir des écoulements importants. Il est indispensable d'étudier le comportement hydrodynamique des écoulements au sein des galeries, de manière à mieux évaluer la répartition du débit entre les différentes galeries, en estimer les vitesses et les turbulences, afin de calculer l'érosion et le remplissage des galeries.

Une étude sur le sujet a été réalisée par la RWTH Aachen University et a été présentée lors de la conférence annuelle de l'IWASA (International Symposium on Hydraulic Engineering Aachen) [Pummer, 2013].

Dans le cadre de cette étude, une galerie idéalisée a été étudiée ; elle est représentée aux figures 3.1 et 3.2. L'étude ne se base donc pas sur une galerie réelle.

Ont d'abord été analysés les processus hydrodynamiques régissant le comportement de l'écoulement d'eau dans les galeries ; ensuite, ont été étudiés les différents paramètres géométriques de la galerie permettant d'optimiser ces processus hydrodynamiques.

Notons que cette étude a été réalisée en parallèle sur des modèles numériques, et dans des laboratoires sur des modèles réduits, afin d'en comparer les résultats. Notons également que l'analyse est purement géométrique, et ne prend pas en compte les interactions avec la roche, ni par conséquent les pertes de charges, ou l'érosion. Des recherches en ce sens sont cependant en préparation à la RWTH Aachen University.

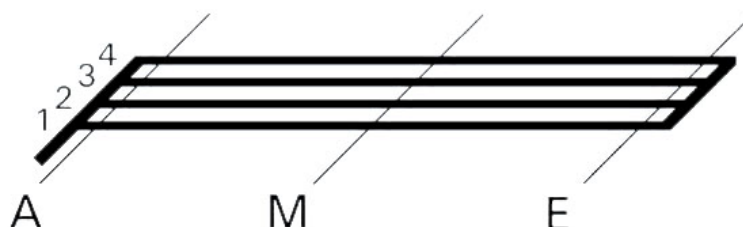


FIGURE 3.1: Galerie idéalisée - schéma [Pummer, 2013]



FIGURE 3.2: Galerie idéalisée - photo du modèle réduit [Pummer, 2013]

L'analyse de ces processus hydrodynamiques a fait apparaître, comme on pouvait s'y attendre, un problème d'oscillation des niveaux d'eau lors d'un changement brusque de débit (voir figure 3.3).

A alors été déterminée la géométrie optimale permettant d'éviter au maximum les phénomènes d'oscillations et leur amortissement. C'est le cas lorsque :

- le nombre de canaux est important ;
- l'espacement entre les canaux est petit ;

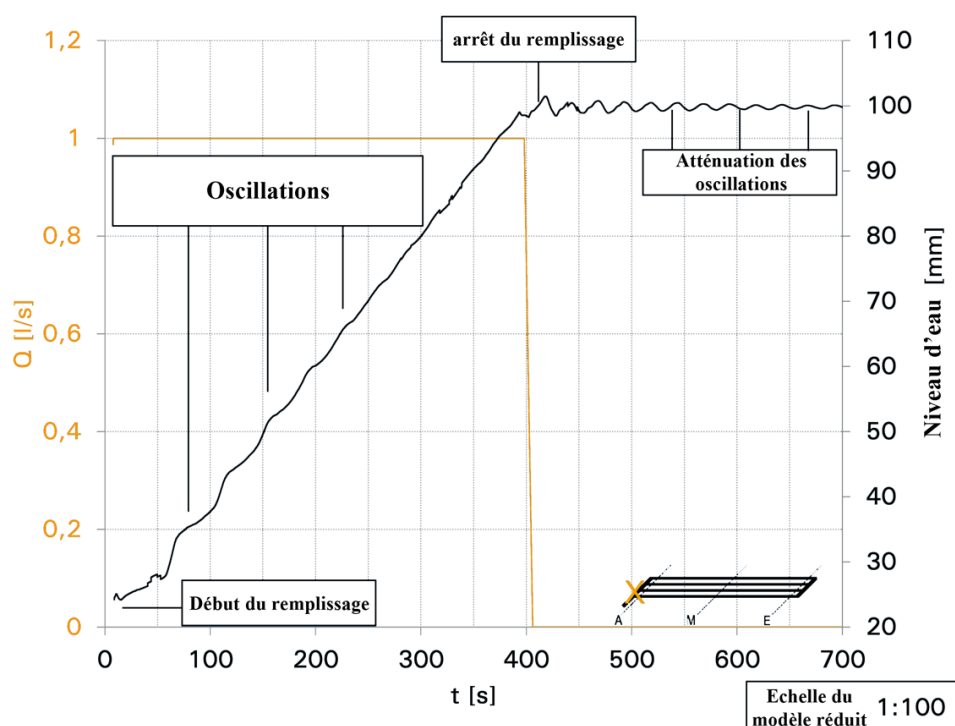


FIGURE 3.3: Niveau d'eau de la galerie principale, d'après [Pummer, 2013]

- la longueur des canaux est petite ;
- la longueur du canal de distribution est petite.

La pente, elle, ne joue, aucun rôle sur les oscillations. Cependant elle a une grande influence sur le remplissage. La figure 3.4 schématise le type de réseau vers lequel il faut se diriger.

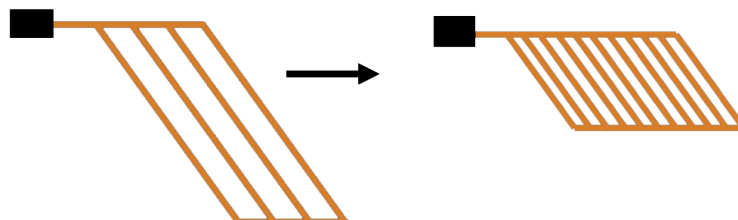


FIGURE 3.4: Le réseau de galerie à droite est moins sensible aux phénomènes parasites d'oscillations que celui de gauche [Pummer, 2013]

De cette étude, nous retiendrons que, plus le réseau de galeries est dense et proche du puits, moins les phénomènes hydrodynamiques parasites seront présents. En outre, les

vitesses seront plus faibles, et dès lors l'érosion sera moins grande.

3.2 Rendement d'un système de pompage-turbinage

Il est important de connaître le rendement du système de stockage. Ce rendement global sera égal, dans un cycle complet de pompage-turbinage, à l'énergie électrique produite par le turbinage, divisée par l'énergie électrique de pompage utilisée :

$$\eta = \frac{E_{turbine}}{E_{pompage}} \text{ sur un cycle complet}$$

La rentabilité du projet en dépend directement. Dans le cadre d'un STEP conventionnel, le rendement global varie entre 75 et 80% , comme on peut le voir à la table 3.1. Ces rendements correspondent à une utilisation du système de stockage optimale, c'est à dire que chaque élément est utilisé à son point de fonctionnement nominal. Il est cependant impossible de faire fonctionner constamment tous les éléments à leur point nominal, ne fût-ce que parce que le niveau d'eau au sein des réservoirs varie, et donc modifie la hauteur de chute. C'est ainsi qu'un rendement opérationnel a été ajouté. [Hendrick *et al.*, 2011]

	Faible (%)	Elevé (%)
<u>Stockage (pompage)</u>		
Canalisations	97,60	98,50
Pompes	91,60	92,50
Machine électrique	98,70	99,00
Transformateur	99,50	99,80
<i>Sous-total</i>	87,80	90,02
<u>Déstockage (turbinage)</u>		
Canalisations	97,40	98,50
Turbines	91,50	92,00
Machine électrique	98,50	99,00
Transformateur	99,50	99,70
<i>Sous-total</i>	87,35	89,44
Opérationnel	98,00	99,50
Total	75,15%	80,12%

TABLE 3.1: Rendements des éléments pour un STEP conventionnel [Hendrick *et al.*, 2011]

Comme on peut le voir dans la table 3.1, aucun rendement ne dépend du réservoir utilisé. Il n’y a en effet pas de pertes de charge au sein du réservoir. Cependant, la morphologie d’un réservoir a de l’importance sur le rendement « opérationnel ». En effet, à volume constant, plus la superficie du réservoir est faible, plus sa hauteur est importante. La différence de hauteur entre le moment où le réservoir est plein et celui où il est vide est donc plus grande. C’est ainsi qu’on s’écarte irrémédiablement plus de la hauteur de chute nominale de dimensionnement des turbomachines, le rendement s’en voit donc diminué.

Dans le cadre des STEP miniers, il y a donc lieu de diminuer ces rendements suivant le type de réservoir rencontré. Pour les charbonnages, dans le cadre de l’utilisation d’un seul niveau de galerie, le volume est très étendu sur une hauteur restreinte, donc les rendements proposés devraient rester similaires. Par contre, les ardoisières, au volume plus compact, risquent de voir leur rendement légèrement baisser. D’autre part, le ratio entre la distance horizontale entre les bassins et la hauteur qui les sépare est habituellement de 4 [Hendrick *et al.*, 2011]. Ce ratio joue directement sur le rendement des canalisations suite aux pertes de charges. Dans le cas de réservoirs souterrains, certaines configurations devraient permettre d’avoir des réservoirs un au dessus de l’autre. Ce qui augmenterait le rendement.

Nous verrons par la suite que de nouvelles technologies pourraient être nécessaires dans le cadre de STEP minier. Dans ce cas, les rendements devraient aussi être recalculés pour prendre en compte, par exemple, un nouveau type de transmission d’énergie.

Notons que certains auteurs indiquent un rendement bien plus faible (entre 27 et 52%) pour les systèmes de stockage souterrain [Barnes, 2011]. Ces valeurs font référence à des systèmes souterrains basés sur la variation du niveau des nappes phréatiques, et pas du tout à l’utilisation de volume de type « caverne », comme nous l’étudions ici. On peut donc espérer des rendements beaucoup plus élevés que les 27 à 52%. Cependant, suite aux infiltrations d’eau dans les galeries, il est possible que le rendement calculé pour les STEP miniers soit considérablement revu à la baisse. Nous en reparlerons lors de l’étude d’un cas particulier dans le chapitre 4.1.

3.3 Différents systèmes de mise en place

Les STEP conventionnels comportent toujours deux réservoirs et une caverne¹. Cette caverne doit répondre à certaines contraintes qu’il serait bon de supprimer dans le cadre

1. Pour rappel, le terme « caverne » désigne l’endroit dans lequel se trouvent les machines.

de STEP miniers.

Un rappel sur les cavernes des STEP conventionnels est fait ci-dessous, suivi de propositions alternatives n'ayant encore jamais fait sujet d'étude et de recherche. Certaines de ces propositions peuvent paraître irréalisables, voire farfelues. Cependant, je pars du principe que toute idée est bonne tant que des critères objectifs ne l'écartent pas. Ces alternatives énoncées proviennent de réflexions et d'idées spontanées suite aux rencontres avec diverses personnes tout au long de mon travail. Chacune de ces idées nécessite de relever des défis technologiques importants, qui sortent du cadre de ce travail d'étude de faisabilité, mais qui mériteraient une réflexion plus approfondie.

3.3.1 Caverne classique

La caverne d'un STEP conventionnel est située à une altitude inférieure à celle du réservoir inférieur (voir figure 3.5), et cela pour éviter la cavitation au sein des pompes. Cette caverne a des dimensions parfois très impressionnantes. Par exemple, la caverne contenant les 9 premières pompes-turbines ($9 \times 100MW$) à la centrale de Vianden mesure $300 (L) \times 17 (l) \times 30 (H)$ mètres. La caverne doit en effet accueillir un nombre important d'équipements qui peut varier en fonction du choix des turbomachines. En guise d'illustration, la centrale de Coo accueille entre autres : les pompes turbines avec leur alternateur, un poste de commande, des moteurs de lancement des groupes, des compresseurs permettant le dénoyage des roues, des tableaux électriques, des ventilateurs, des zones servant d'aire de montage, un pont roulant permettant la manutention des différents équipements, etc [Loriaux, 1989]. Bien sûr, les centrales de Coo et Vianden sont nettement plus importantes en terme de puissance, mais tous ces équipements doivent aussi apparaître dans les STEP miniers, même si leurs tailles et leur nombre sont réduits.

Construire une telle caverne, même réduite, dans le cadre de STEP minier ne relève pas de l'évidence. Tout d'abord, devant se situer en dessous du réservoir inférieur, elle se trouvera en dessous du niveau de la nappe phréatique. Il faudra dès lors assurer son étanchéité, ou du moins limiter les arrivées d'eau. De plus, de nombreux accès seront nécessaires : galerie d'amenée (d'eau), entrée des hommes et des machines, transport de l'électricité par des barres de puissance, ventilation, issues de secours,... ce qui implique d'avoir plusieurs puits d'accès, ou un puits relativement large.

Il paraît évident que la construction d'une telle caverne engendre un coût important, difficilement amortissable vu les puissances de l'ordre de la dizaine de MW mobilisables par les STEP minier.

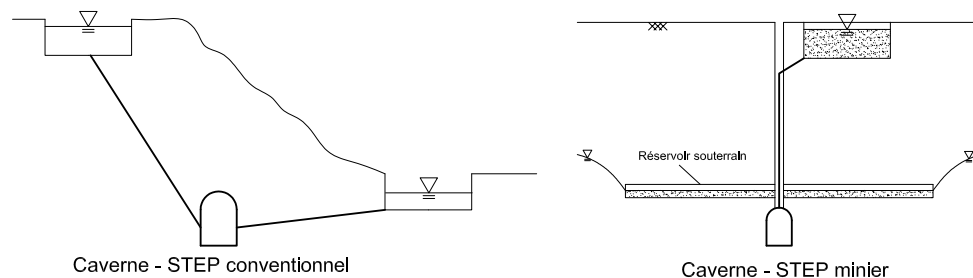


FIGURE 3.5: Schéma de positionnement d'une caverne

Il est cependant possible que, dans certaines situations, une caverne se justifie malgré tout. Par exemple si on peut réhabiliter à cet usage une cavité déjà présente.

3.3.2 Large puits

Pour les STEP miniers, la taille de la caverne peut être limitée, vu les puissances mobilisées. Considérant par ailleurs la nécessité de déboucher l'ancien puits de mine ou d'en creuser un nouveau pour accéder au réservoir inférieur, une alternative à la caverne classique consisterait à utiliser une caverne ayant une surface identique à celle du puits. La caverne serait en quelque sorte le fond d'un puits, celui-ci étant élargi pour l'occasion.

La caverne n'aurait plus un profil horizontal, c'est à dire une grande longueur pour une faible hauteur, mais plutôt une faible superficie pour une hauteur plus importante. Il n'y aurait dans ce cas, plus aucune terre à soutenir au dessus de la caverne.

Le surcoût par rapport à la caverne traditionnelle réside dans l'augmentation du diamètre du puits sur toute sa hauteur.

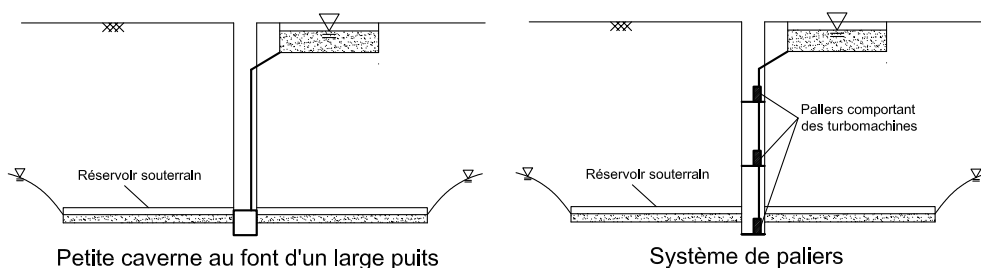


FIGURE 3.6: Système par puits large

Dans cette configuration, serait-il envisageable, pour les hauteurs de chutes importantes, de diviser la hauteur de chute en plusieurs parties afin de disposer plusieurs centrales en série, comme représenté à la figure 3.6 à droite ? L'idée peut paraître séduisante, car le

volume de chaque palier serait réduit puisqu'il correspondrait à des puissances moindres et, dès lors, le diamètre nécessaire du puits serait inférieur. A l'analyse, cette idée s'avère toutefois peu intéressante. En effet, des turbulances et des remous se formeraient sous chaque palier, rendant indispensables des réservoirs tampons à chaque palier, ce qui diminuerait la hauteur de chute exploitable. De plus le nombre de pompes et turbines serait plus important, ce qui grèverait le coût de maintenance. [S. Verraes, comm. pers., 2013]².

3.3.3 Système compact

Une deuxième alternative consiste à délocaliser le maximum d'équipements en surface, et ainsi limiter les travaux en profondeur. Poussée à son maximum, cette alternative permettrait d'éviter la descente des hommes pour la maintenance. Toutes les dépenses nécessaires liées à la sécurité des travailleurs seraient alors évitées, ce qui réduirait fortement les coûts et constituerait un atout certain de ce système compact.

Dans ce cas, si la reconstruction d'un puits reste indispensable, celui-ci peut être d'un diamètre nettement inférieur. Des travaux ponctuels peuvent être entrepris dans les galeries pour les réhabiliter ; mais une fois la centrale construite, on ne descend plus, et tout se fait à partir de la surface. Un système compact de pompes turbines est installé au fond ; il est remonté pour la maintenance.

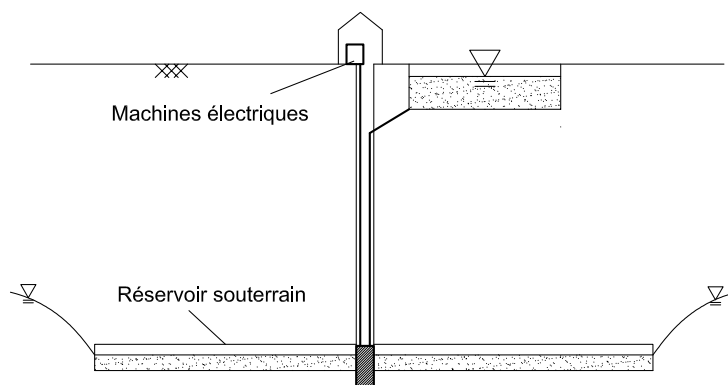


FIGURE 3.7: Système compact

Cette solution implique de délocaliser l'alternateur en surface. Dans ce cas, il est alors nécessaire de trouver un moyen de transférer l'énergie des turbomachines vers la surface. Différentes solutions peuvent être envisagées :

- système pneumatique,

2. Entrevue du mercredi 15 mai 2013 avec Stéphane Verraes, ingénieur chez Merytherm.

- système (oléo)hydraulique (huile comprimée),
- via un arbre de transmission,
- via une courroie de transmission.

Notons que ces systèmes de transmission d'énergie diminueraient le rendement global du système, et nécessiterait une certaine maintenance.

A ma connaissance aucun projet de ce type n'a été imaginé, mais il pourrait faire l'objet d'une étude spécifique. Notons qu'une recherche très rapide sur le système pneumatique tend à indiquer qu'il serait compliqué de transférer une grande quantité d'énergie (de l'ordre du MW) avec un système relativement compact. Concernant l'arbre de transmission, nous conseillons aux personnes intéressées de diriger les recherches vers le secteur pétrolier, dans lequel des arbres de transmission de grande longueur sont utilisés.

Une alternative au système « compact » serait un système « tout en un ». C'est à dire d'avoir un alternateur directement connecté à la turbomachine et immergé avec celle-ci. Le tout devant être étanche et possible à remonter pour la maintenance. Ce système serait donc totalement immergé dans la conduite. De tels systèmes existent déjà. Par exemple, le système utilisé pour la centrale hydroélectrique accompagnant la nouvelle écluse de Lanaye (commune de Visé). Cependant la limite de ce système est rapidement atteinte. Il faut en effet prévoir des câbles électriques reliant l'alternateur immergé dans le fond du puits à la surface. Ces câbles sont situés dans la conduite d'amenée d'eau, étant donné que le système compact immergé doit pouvoir être retiré pour la maintenance. Ces câbles sont donc directement soumis à l'écoulement présent dans la conduite, ce qui engendre des vibrations. La hauteur de chute est limitée à la suite de ces vibrations, et il semblerait difficile qu'un tel système soit réalisable pour une chute supérieure à une vingtaine de mètres. [V. Herbillon, comm. pers., 2013]³ De plus ces systèmes « tout en un » où la turbine et l'alternateur sont immergés, sont principalement réalisés avec des turbines de type Bulbe, qui comme nous le verrons plus tard, ne permettent pas non plus d'utiliser des hauteurs de chute supérieures à 20 mètres. L'utilisation de ce système peut donc se faire pour une petite hauteur de chute. Dans d'autres cas, une adaptation de la technologie est nécessaire, c'est-à-dire changer le type de turbine, et trouver un moyen pour limiter les vibrations sur les câbles, ou les faire passer autre part que dans le conduit.

3. Echanges avec un ingénieur du SPW s'occupant de l'écluse de Lanaye, lors d'une réunion le 12 avril 2013.

3.4 Les différentes turbomachines

Dans le cadre d'une étude de faisabilité, comme celle-ci, il est prématuré de dimensionner une turbine. Il est cependant indispensable de connaître les différentes technologies existantes, leurs avantages et inconvénients, leurs dimensions, etc, et ce afin de pouvoir concevoir des systèmes cohérents. C'est dans cette optique que les différents modèles de turbines ont été répertoriés dans la table 3.2. Cette liste n'est bien sûr pas exhaustive, mais reprend les principales turbines utilisées sur le marché du stockage par pompage-turbinage.

Dans ce cadre, les turbomachines peuvent se classer en fonction de leur technologie. Elles sont soit ternaires, soit réversibles, soit isogyres.

- Les groupes ternaires ont comme particularité que les fonctions de pompage et de turbinage sont assurées par des machines distinctes.
- Les groupes réversibles, sont, eux, constitués d'un seul rotor, fonctionnant soit dans un sens pour pomper, soit dans l'autre pour turbiner.
- Le groupe isogyre est constitué d'un rotor unique, mais qui est divisé en deux parties, chacune d'elles étant spécialisée soit pour le pompage, soit pour le turbinage. C'est donc une seule machine, mais qui comporte deux parties distinctes.

Quelque soit le groupe choisi, il est raccordé au réseau électrique par une machine synchrone unique, qui joue le rôle de moteur dans le cas du pompage, et le rôle d'alternateur dans le cas du turbinage. Remarquons que les turbines à réaction doivent automatiquement faire partie d'un groupe ternaire. Il n'est en effet pas possible de les utiliser en tant que pompe. Les turbines de type réversible peuvent, elles, être utilisées dans les trois types de groupe. La table 3.3 reprend les avantages et inconvénients des différents groupes. [Hendrick *et al.*, 2011, Megnint *et al.*, 2008] Nous renvoyons le lecteur intéressé vers les références citées pour plus d'informations.

Le choix du type de turbine peut se faire à l'aide d'un graphique, comme par exemple celui représenté à la figure 3.8. En reportant le débit et la hauteur de chute, on peut avoir une idée des différents types de turbines envisageables. Ce graphique indique aussi directement l'ordre de grandeur de la puissance disponible.

Une fois les caractéristiques d'un site bien déterminées, il sera possible d'utiliser ces différentes méthodes pour définir le type de turbine le plus adéquat. On voit que dans le cas de charbonnage profond, seul les Francis ou les Pelton seront utilisables. Pour des hauteurs de chutes moins importantes, le choix sera plus large.

Modèles	H [m]	vit. de rotation [tr/min]	Rendement [%]	Réversible	Immergée	Axe	Type	Q [m^3/s]	n_s
Pelton	200-2000	500-1500	89	non	non ?	VERT entre 3 et 6 jets HORIZ si 1 ou 2 jets	Action	4-15	2-70 suivant le nombre de jets
Francis	10-700 idéalement 20-100	70-1000	93	oui	oui	fréquent : VERT possible : HORIZ	Réaction	4-55	60-400
Kaplan	peut s'adapter 0-60	50-250	93	oui	oui ?	VERTICAL	Réaction	peut s'adapter 1-350	300-1000
Bulbes	< 20	< ?? >	91	oui	oui	HORIZ ou légèrement inclinée	Réaction	grand (jusque 400)	1000-1200
Deriaz	peut s'adapter 30-100	< ?? >		oui	oui	VERTICAL	Réaction	peut s'adapter	< ?? >
Pompes inversées	rendement plus faible (75-90%) et nécessite un moteur électrique à vitesse variable => pas très adéquat								

Attention : les valeurs données sont des ordres de grandeur, permettant de se faire une idée, et de se diriger vers tel ou tel type de turbine. Un calcul précis doit ensuite être effectué.

TABLE 3.2: Caractéristiques de différentes turbines d'après [Hendrick *et al.*, 2011, SHEMA, 2010, Megnint *et al.*, 2008, Oury et Oury, 1990]

Type	Avantages	Inconvénients
Tertiaire	<ul style="list-style-type: none"> -permet d'obtenir une puissance plus grande en mode turbinage qu'en mode pompage -excellent rendement (optimisation séparée des pompes et turbines) -souplesse de fonctionnement (évite les pointes de courant lors du démarrage électrique) 	<ul style="list-style-type: none"> -coûteux et encombrants : multiples vannes et conduits
Réversible	<ul style="list-style-type: none"> -installation simple et peu encombrante -moins coûteux 	<ul style="list-style-type: none"> -perte de rendement énergétique due à la roue réversible -temps d'opération plus long entre le mode pompage et le mode turbinage -le démarrage en pompe doit être assuré par un intermédiaire externe -puissance identique en turbinage et pompage (sauf si pales variables) -difficultés en mode pompe créées par le distributeur diffuseur nécessaire au réglage du fonctionnement en mode turbine (entraîne de fortes vibrations)
Isogyre	<ul style="list-style-type: none"> -peu encombrants -moins coûteux 	<ul style="list-style-type: none"> -ne convient pas aux applications de grandes puissances -très peu développé

TABLE 3.3: Avantages et inconvénients des différents groupes pompe-turbine [Hendrick *et al.*, 2011]

3.5 Dimensionnement de la conduite

Le dimensionnement d'une conduite consiste à combiner la maximisation du rendement, c'est à dire la minimisation des pertes de charges, et la minimisation des investissements. Ces deux points de vue sont contradictoires. En effet, pour minimiser les pertes de charges, il faut augmenter le diamètre, tandis que pour minimiser les investissements il faut diminuer le diamètre.

Des formules permettent de calculer les dimensions de la canalisation les plus intéressantes du point de vue économique. Elles dépendent de la puissance et de la hauteur de

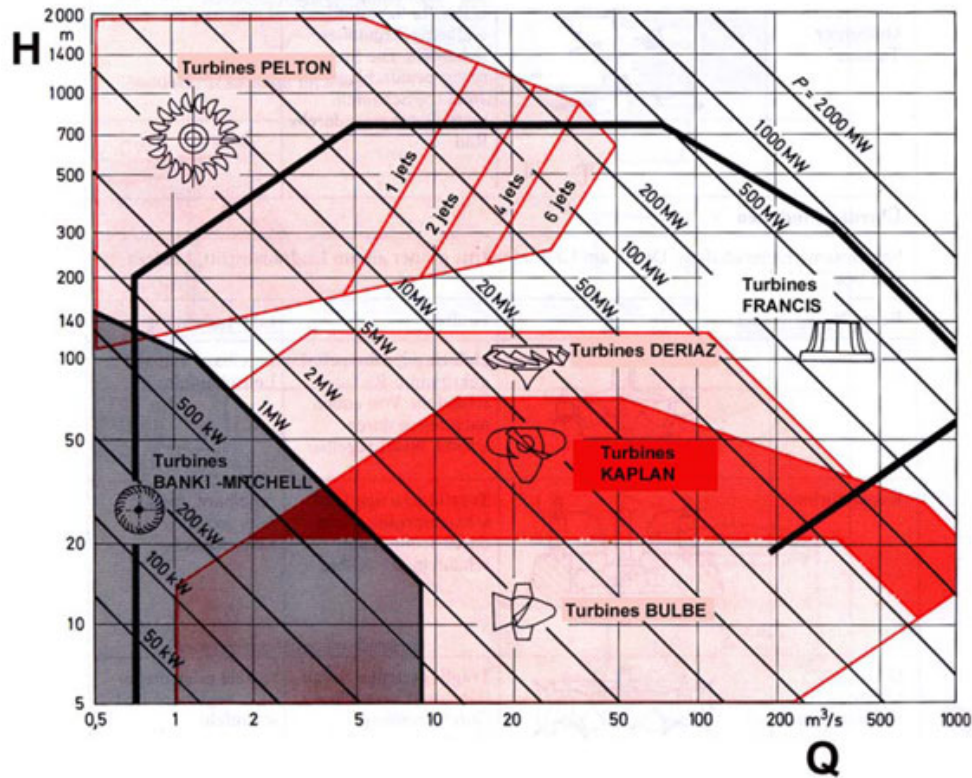


FIGURE 3.8: Choix d'un type de turbine [Groussier, 2012]

chute [Hendrick *et al.*, 2011] :

$$D = 4,44 \frac{p^{0,43}}{H^{0,65}} (\text{pied})$$

Avec :

- D, le diamètre en pied ;
- P, la puissance en hp (horse power) ;
- H, la hauteur d'eau en pied.

Ce qui, remis en unités du système international (mètre et Watt) donne :

$$D = 0,0366 \frac{p^{0,43}}{H^{0,65}}$$

Grâce à cette formule, il est donc possible d'avoir un ordre de grandeur du diamètre de la conduite à utiliser.

Chapitre 4

Deux études de cas

Dans les trois premiers chapitres, une approche générale a été menée. Des outils décisionnels ont été proposés, ainsi que des critères permettant de choisir au mieux les cavités les plus adaptées. Appliquons ces généralités à deux cas particuliers caractéristiques.

Le premier lieu étudié est le charbonnage de Gosson-Kessales, situé dans la commune de Saint-Nicolas en région liégeoise ; le second est l'ardoisière de Martelange, située à la frontière luxembourgeoise.

Pourquoi ces choix ? Nous l'avons vu au chapitre 2, les informations directes sont les plus pertinentes pour choisir un site. Or les sites disposant d'informations suffisantes sont très rares. La collecte d'informations complémentaires est très lente (des mois, voire des années) ; des inspections supplémentaires de type spéléologiques sont onéreuses... dans le cadre strict d'un travail de fin d'études, je me suis donc tourné vers des sites pour lesquels existaient des sources d'informations minimales, comme je le décris au chapitre suivant.

Toutefois, il était intéressant d'analyser deux types de cavités différentes correspondant, comme nous l'avons vu, à des caractéristiques spécifiques. C'est pourquoi j'ai retenu d'une part un charbonnage et d'autre part une ardoisière.

4.1 Le charbonnage de Gosson-Kessales

Pourquoi le charbonnage de Gosson-Kessales ?

J'ai examiné, avec l'aide du SPW de Liège, une vingtaine de puits situés en région liégeoise. Par une localisation sur carte complétée par des données de profondeur et

de topographie (voir annexe n°1 concernant les charbonnages de la région de Liège), 4 à 5 sites se sont révélés intéressants. L'étude des documents disponibles de ces sites permet de mettre en évidence que la mine de Gosson-Kessales est décrite par des plans de bonne qualité. De plus, deux des puits d'accès sont recensés en détail, ce qui permet une plus grande flexibilité pour l'organisation de la future centrale. Enfin, il existe en surface une zone libre permettant d'envisager l'installation d'un réservoir supérieur (voir annexe n°3). Les éléments d'une étude réaliste étaient donc réunis.

4.1.1 Volume disponible

Première étape : déterminer le volume disponible. Le calcul du volume disponible n'est pas trivial ! En effet, les turbomachines seront positionnées à un endroit précis. Or les galeries ne sont pas nécessairement horizontales, il peut donc exister des zones mortes dont l'eau ne peut pas s'évacuer uniquement par gravité. La figure 4.1 représente trois tronçons de galerie, illustrant différentes configurations du volume disponible.

La méthode utilisée pour le calcul du volume au sein de chaque galerie, est reprise dans l'annexe n°4.

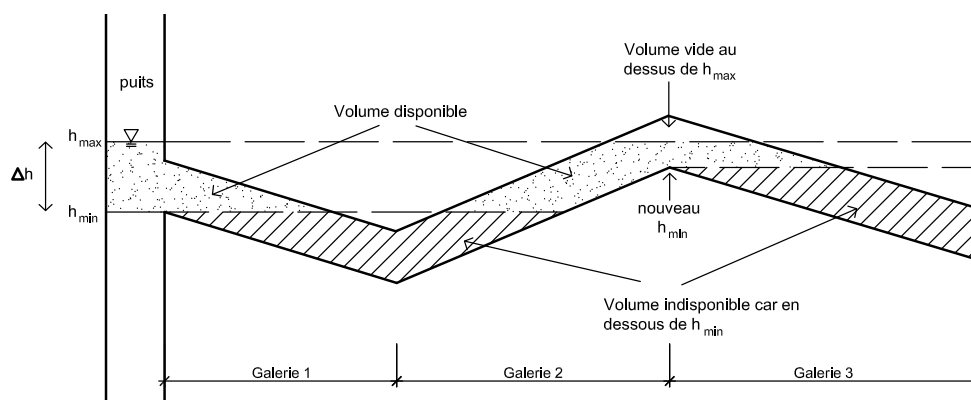


FIGURE 4.1: Volume disponible au sein d'un réseau de galeries

4.1.1.1 Méthodologie

Une procédure a été réalisée pour calculer ces volumes :

- analyse et compréhension des plans,
- copie et traitement des plans,
- élaboration d'un système d'encodage des paramètres des boueaux dans l'ordinateur,
- hypothèses diverses sur les éléments manquants,

Copie et traitement des plans

Les plans disponibles au SPW font environ la taille d'un A0. Le scanner mis à ma disposition était, lui, prévu pour des A3. J'ai donc photographié les plans, et scanné les parties les plus intéressantes. J'ai ensuite reconstitué les plans en superposant les scans et les photos (voir annexe n°3). Les plans comportent un nombre important d'informations. Cependant seuls les boueux nous intéressent. J'ai donc effectué une extraction de données, afin d'isoler l'information intéressante. Tous ces plans ont été repositionnés les uns à côté des autres pour avoir une représentation globale de la mine (voir annexes n°3).

A noter que les boueux sont représentés sur les plans de plusieurs couches de charbon. Dans mon cas, j'ai principalement utilisé les plans de la couche Stenaye. Cependant pour trois des plans, les plans pour la couche Stenaye n'existaient pas. J'ai donc dû utiliser les plans d'une autre couche dénommée « Malgarnie ». Au vu du changement de couches, des incohérences entre les différents plans se sont manifestées. C'est ainsi qu'entre les plans 124/18 et 124/23, des galeries apparaissent de nulle part (voir figure 4.3). Elles n'ont donc pas été prises en compte, bien que leur altitude correspondait avec celle de l'étage étudié.

Nous sommes dans une étude de faisabilité. Dans le cadre d'un projet à réaliser, cette incohérence devrait être résolue.



FIGURE 4.3: Incohérence entre plans

Elaboration d'un système d'encodage des paramètres des boueux

Pour pouvoir calculer le volume disponible assez précisément avec une routine Matlab, il était indispensable d'encoder ces plans sous forme numérique. C'est naturellement une méthode par noeuds/éléments qui s'est imposée.

Les noeuds correspondent aux carrefours entre plusieurs galeries, tandis que les éléments correspondent aux galeries.

Chaque noeud possède une altitude, et chaque élément possède une longueur. La numérotation sur les plans est représentée sur l'annexe n°3. Les données ont été encodées sur Excel (annexe n°5) avant d'être importées sur Matlab.

Hypothèses diverses sur les éléments manquants

Sur ces plans, une information cruciale manque pour déterminer le volume : le diamètre des galeries ! En effet, aucune information à ce sujet n'est disponible. Il faut donc trouver un moyen pour évaluer ce diamètre.

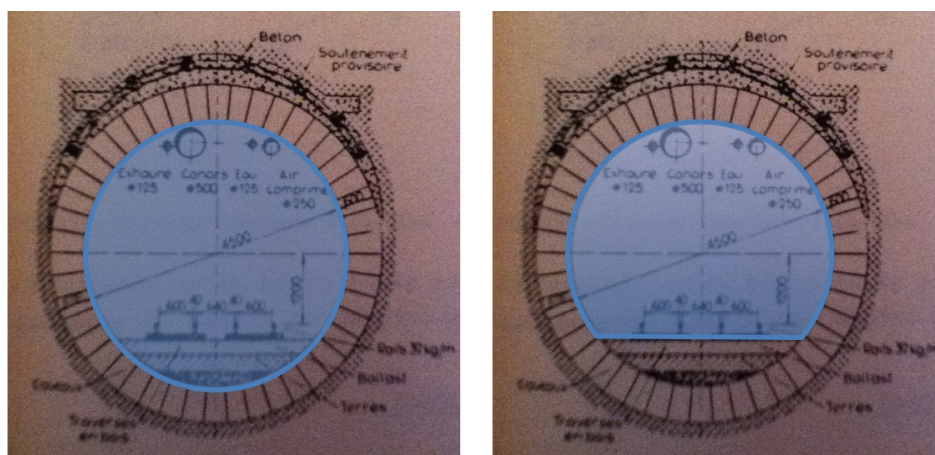
Comme vu dans le chapitre 2.2.1, les diamètres varient entre 2 et $16m^2$. On exclura les plus petits diamètres, qui sont réservés aux voies de chantier dont on ne tient pas compte ici. Il est évident qu'une erreur sur le diamètre se reporte sur le volume. Dans un projet à réaliser, une recherche spécifique à la mine étudiée est nécessaire, voire une inspection sur place s'impose. Dans le cas d'une étude de faisabilité, il m'a paru raisonnable d'utiliser une valeur moyenne plutôt faible. Dans la suite de ce travail, le diamètre sera pris égal à 3,25m, ce qui correspond à environ $8m^2$ de section.

Une autre hypothèse concerne l'altitude. En effet, l'altitude n'est pas systématiquement donnée en chaque noeud. Une altitude arbitraire a alors été choisie en fonction des altitudes disponibles pour les galeries adjacentes.

Dernière approximation, la routine Matlab considère des sections rectangulaires de galerie, ce qui facilite grandement les calculs de volume. Or les galeries les plus récentes des charbonnages sont principalement circulaires. Elles peuvent être partiellement circulaires, ou totalement si on décide d'enlever le remblai utilisé pour applatir le bas des galeries (voir figure 4.4). Sans information à leur sujet, nous considérerons que les galeries sont circulaires. Parfois nous comparerons les valeurs obtenues par rapport à des sections partiellement circulaires.

Il faut donc utiliser une section équivalente. Les trois caractéristiques de la section réelle ne pourront pas toutes être conservées dans la section équivalente, à savoir :

1. avoir une surface identique,
2. avoir une hauteur de galerie identique,
3. pour une hauteur donnée, avoir des volumes identiques.



Section complètement circulaire

Section partiellement circulaire

FIGURE 4.4: Sections types de galeries d'après [Stassen, 1986]

L'objectif étant de calculer le volume disponible, la surface est le paramètre le plus important à conserver. Ce sont donc sur les deux autres paramètres que nous allons jouer.

Un coefficient de forme a donc été appliqué à la hauteur de la galerie pour la diminuer et ainsi tenir compte du point 3 ci-dessus. Ce coefficient de forme doit être choisi entre 0,8 et 1, de telle manière que, ni la largeur équivalente, ni la hauteur équivalente ne soit supérieure au diamètre de la galerie réelle, et que la hauteur équivalente ne soit pas supérieure à la hauteur réelle de la galerie (voir figure 4.5). Il a été pris égale à 0,9. Cette valeur sera commentée plus loin dans ce chapitre.

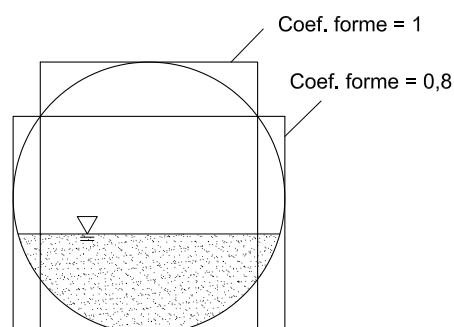


FIGURE 4.5: Bornes du coefficient de forme

Routine Matlab permettant d'estimer le volume

Une fois toutes les données encodées et les hypothèses faites, il est alors possible d'estimer le volume disponible.

L'organisation des galeries n'est pas parfaitement étoilée, ce qui signifie que des boucles sont possibles, comme illustré à la figure 4.6. Etant donné que la valeur de h_{min} (comme illustré à la figure 4.1) change en fonction de l'altitude des galeries parcourues, le volume accessible peut être différent suivant le chemin choisi. C'est pourquoi il faut parcourir tous les chemins possibles pour connaître le volume effectivement disponible.

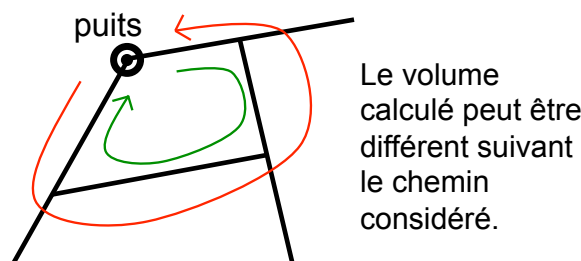


FIGURE 4.6: Réseau de galeries comportant des boucles

La routine Matlab repose sur une fonction récursive qui demande aux galeries adjacentes de calculer leur volume. Ces galeries demandent, elles-mêmes, à leur voisine de faire de même, etc. Le principe de la routine est représenté à la figure 4.7.

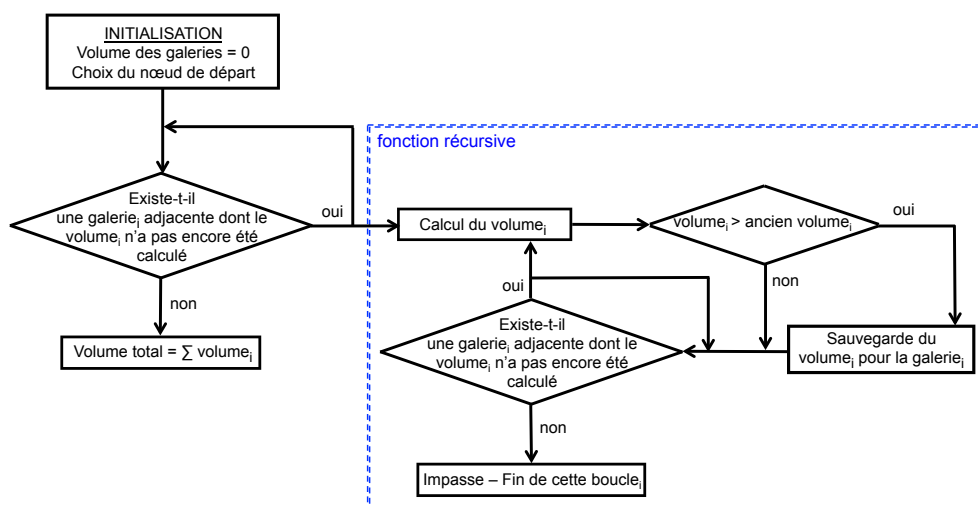


FIGURE 4.7: Principe de la routine Matlab pour calculer le volume total disponible

4.1.1.2 Résultats et analyse paramétrique

Comme nous l'avons vu, l'hypothèse sur le diamètre des galeries est assez incertaine. L'analyse paramétrique du diamètre montre en effet que le volume peut varier du simple au triple suivant l'hypothèse faite. Les résultats de cette analyse sont représentés à la figure 4.8.

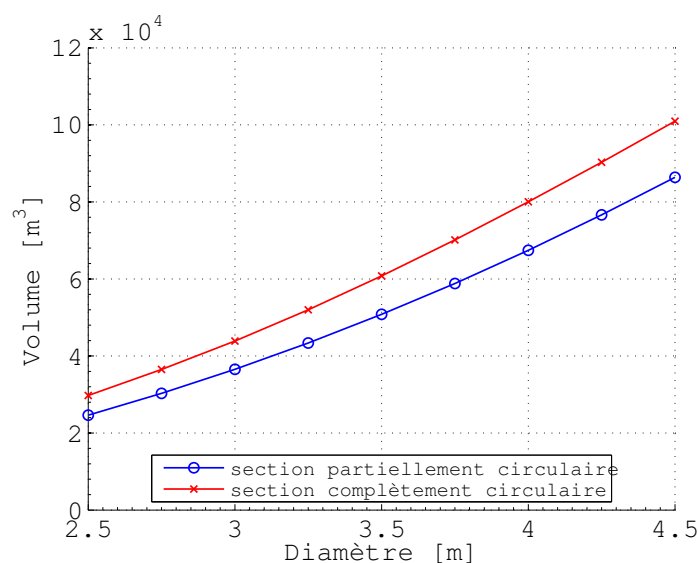


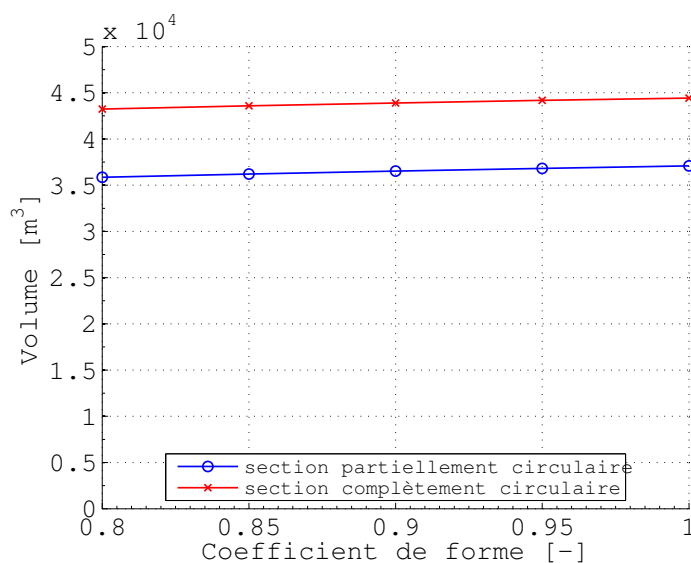
FIGURE 4.8: Influence du diamètre sur le volume disponible (Coef. forme = 0,9)

Une étude paramétrique a été faite sur le coefficient de forme choisi à 0,9. Comme on peut le voir à la figure 4.9, l'impact sur le volume est minime. Il est en effet de 3%, ce qui est négligeable, surtout par rapport à l'hypothèse faite sur le diamètre des galeries.

Grâce à cette routine Matlab, il est aussi possible d'estimer les volumes disponibles en fonction du noeud de départ, c'est-à-dire de l'endroit où l'on décide de positionner les turbomachines. Six noeuds ont été choisis (voir figure 4.10), soit pour leur position centrale, soit parce qu'un ancien puits existe à cet endroit. Les volumes disponibles ont été calculés, mais aussi l'éloignement des volumes par rapport aux puits. Paramètre important, comme nous l'avons vu dans le chapitre 3.1.

Considérant l'éloignement des volumes par rapport aux puits (voir figure 4.11), la courbe pour le noeud numéro 45, qui correspond à l'ancien puits numéro 2 de la concession Gosson-Kessales, est le plus approprié. En effet, 80% du volume se situe à moins de 1km pour le noeud 45, alors que pour les autres, ce pourcentage tombe à moins de 60%.

Les volumes disponibles restent, eux, dans une fourchette assez serrée, comme on peut le voir dans la table 4.1.

FIGURE 4.9: Influence du coefficient de forme ($D = 3m$)

Numéro du noeud	1	45	86	95	96	97
Volume (section partielle) [m^3]	42600	43400	44200	45000	45300	46100
Volume (section complète) [m^3]	51300	52000	53300	54000	51700	53700

TABLE 4.1: Volume disponible en fonction du noeud choisi

L'ancien puits numéro 2 (noeud 45) de l'exploitation est donc le plus propice à l'installation des turbomachines. De plus, en surface de ce puits, de la place est disponible pour installer un réservoir supérieur (voir le plan de surface de l'annexe n°3). Nous considérerons, suite au calcul effectué, un volume disponible de $50.000 m^3$ dans la suite du travail.

4.1.2 Volume exploitable (érosion)

Ce volume disponible n'est pas entièrement exploitable. Comme vu au chapitre 2.5, pour la préservation des systèmes, il est primordial de limiter l'érosion au sein des galeries, et pour ce faire, de limiter la vitesse d'écoulement. C'est dans cette optique qu'il est indispensable de laisser une hauteur d'eau minimale, afin que, pour un débit fixé, les vitesses restent acceptables. En effet, pour une hauteur d'eau minimale donnée, la section d'écoulement minimale est connue et correspond, pour un débit fixé, à une vitesse maximale.

La vitesse maximale dans les galeries est atteinte au niveau du puits, étant donné que

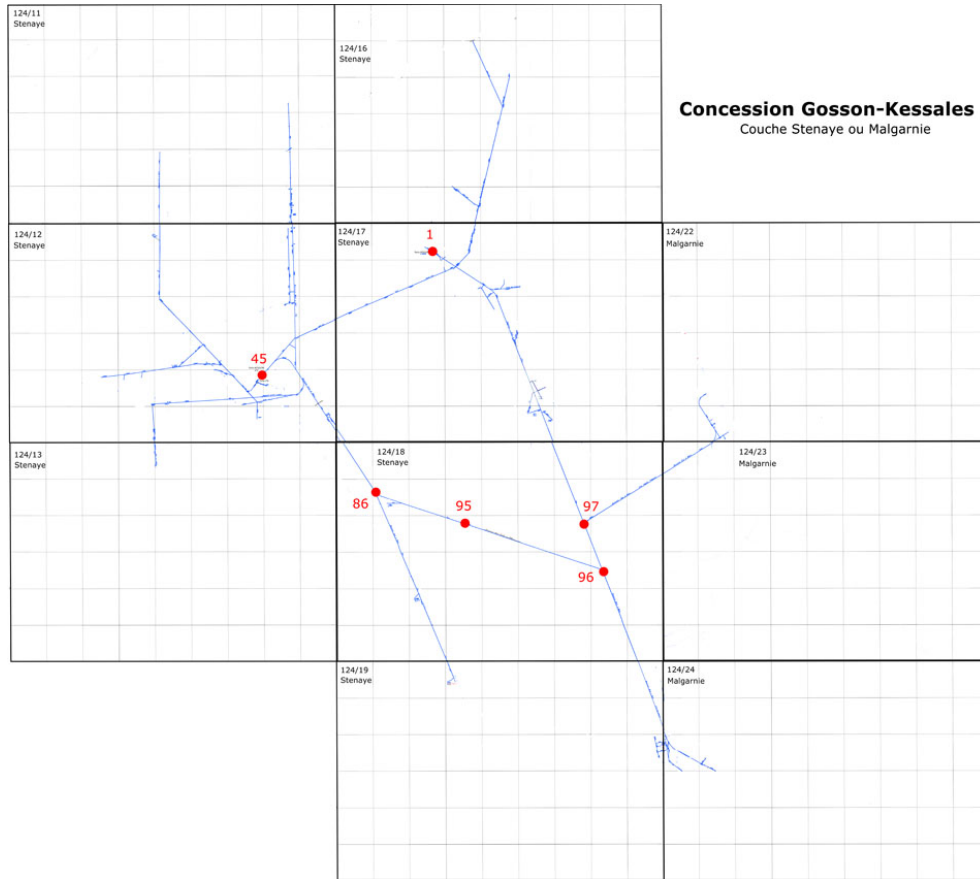


FIGURE 4.10: Noeuds étudiés pour placer les turbomachines

c'est à cet endroit que l'entièreté du volume d'eau doit passer. Une galerie cul de sac, par exemple, ne verra, elle, passer que la quantité d'eau qu'elle peut contenir.

Cette section minimale d'écoulement est illustrée à la figure 4.12.

On retrouve sur cette figure les différentes variables qui vont nous servir au calcul de cette vitesse maximale :

- S_{brute} et V_{brute} , respectivement la section et le volume bruts, qui correspondent au volume disponible calculé précédemment ;
- S_{net} et V_{net} , respectivement la section et le volume nets, qui correspondent au volume exploitable ;
- S' et V' , respectivement la section minimale et le volume minimal fictif.

Pourquoi parle-t-on de volume fictif ? Nous allons prendre en compte une galerie fictive équivalente, pour calculer la section minimale. Cette galerie rectangulaire, de section identique à celle utilisée pour déterminer le volume disponible, est en plus horizontale.

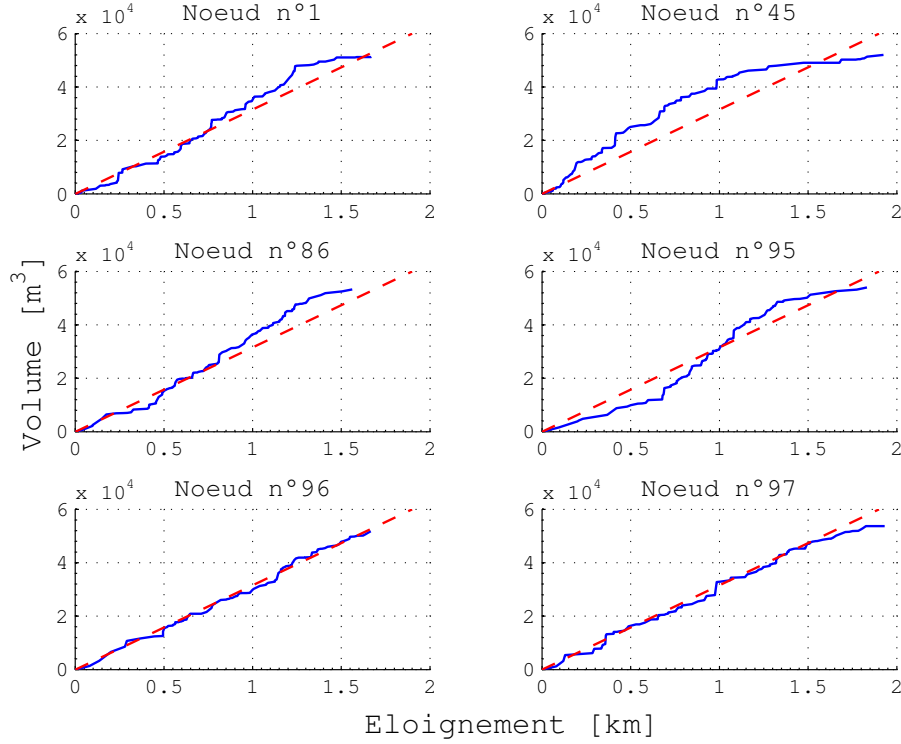


FIGURE 4.11: Eloignement des volumes en fonction du noeud choisi

Cette hypothèse d'horizontalité n'est pas sans conséquence, nous la commenterons par la suite. Notons cependant qu'elle permet une approche rapide et simplifiée, ce qui est recherché dans une étude de faisabilité. L'ensemble du réseau de galeries est donc matérialisé par une unique galerie horizontale, dont la longueur est :

$$L' = \frac{V_{brute}}{S_{brute}} [m]$$

La galerie équivalente est considérée horizontale ; dès lors, le volume minimal fictif vaut :

$$V' = S' . L' [m^3] \quad (4.1)$$

On comprend bien ici que ce volume est fictif puisque la galerie équivalente est horizontale. En effet, dans la galerie réelle, les galeries étant inclinées, la section minimale d'eau ne sera pas présente dans toutes les galeries.

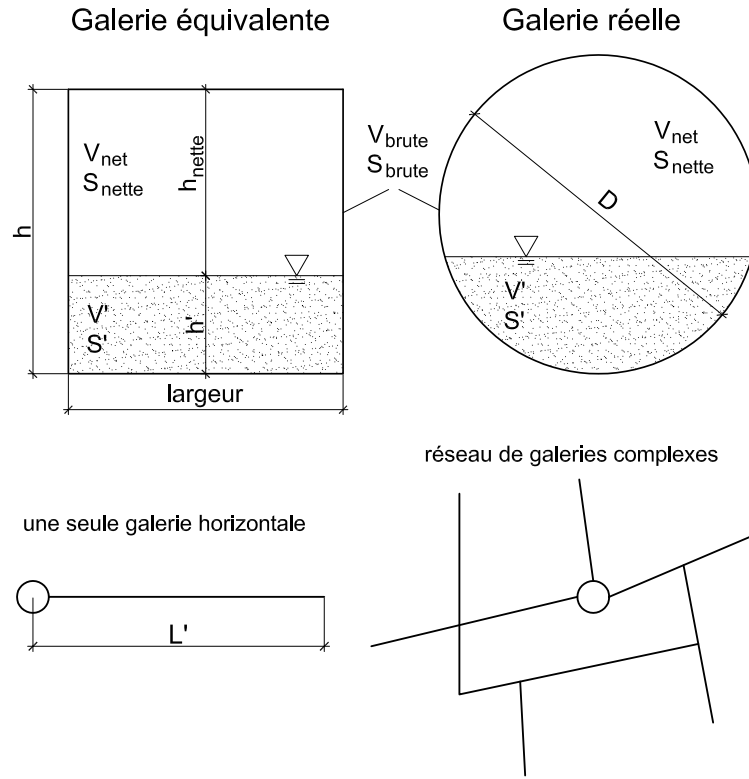


FIGURE 4.12: Hauteur minimum d'eau dans les galeries au niveau du puits

En partant du principe qu'on connaît le temps de turbinage minimum, correspondant à la durée classique du pic de consommation d'électricité en soirée, c'est à dire 3h, il est possible de lier le débit au volume net :

$$Q = \frac{V_{net}}{3600.t} \quad (4.2)$$

Avec Q le débit en m^3/s , t le temps en heures. La vitesse maximum doit donc être inférieure à la vitesse critique. Elle vaut :

$$v_{max} = \frac{Q}{S'} < v_{lim} [m/s] \quad (4.3)$$

Exprimons maintenant le volume net en fonction du volume brut et du volume fictif :

$$V_{net} = V_{brute} - V'$$

Ou encore en y substituant l'équation 4.1 :

$$V_{net} = V_{brute} - S'.L'$$

En substituant les Q des équations 4.2 et 4.3, et en exprimant la valeur de V_{net} , la vitesse maximale peut alors s'exprimer par :

$$v_{max} = \frac{V_{brute} - S'.L'}{3600.t.S'} = \frac{V_{brute}}{3600.t.S'} - \frac{L'}{3600.t}$$

Et en isolant S' , il vient :

$$S' = \frac{V_{brute}}{v_{max}.3600.t + L'}$$

La hauteur minimale se calcule alors simplement par :

$$h_{lim} = \frac{S'}{largeur}$$

Nous venons d'établir la relation entre la section minimale d'écoulement et la vitesse maximale.

En se référant à la littérature, on peut trouver des valeurs de vitesses critiques d'érosion. La figure 4.13 nous montre que les valeurs peuvent aller de $0,3\text{ m/s}$ pour des sables très fins, jusqu'à plus de $1,2\text{ m/s}$ pour des enrochements. Nous choisirons de limiter la vitesse maximale à $0,7\text{ m/s}$, correspondant à des graviers. Dans le cadre de galeries à même la roche (donc non bétonnées ni soutenues par des voussoirs en béton), nous pourrions envisager de considérer les valeurs pour les enrochements. Nous préférons prendre une valeur plus sécuritaire, c'est-à-dire moins grande.

Dans le cadre d'un projet à réaliser, il est indispensable de connaître le type de soutènement des galeries, pour permettre une étude plus précise. Il est aussi important d'utiliser des valeurs plus précises et plus adaptées au type d'application. En effet les vitesses critiques utilisées ici n'ont pas été établies dans le cadre de galeries souterraines. Une étude plus précise, prenant en compte la nature de la roche est donc indispensable. Dans le cadre d'une étude de faisabilité, ces valeurs nous permettent cependant d'avoir un ordre de grandeur.

Avec l'ensemble de données : $V_{brut} = 50.000\text{ m}^3$, $S_{brute} = 8\text{ m}^2$, $t = 3\text{ h}$ et $v_{max} = v_{lim} = 0,7\text{ m/s}$, il vient :

– $L' = 6200\text{ m}$

	Granulométrie	Cohésion	Angle de frottement interne	Module d'Young	Perméabilité	Vitesses critiques d'érosion sur sol humide	
						sol nu	sol engazonné
Argile compacte	$d < 2\mu\text{m}$	15 à 25 kPa	20 à 25°	7 à 18 Mpa	$< 10^{-9}$ m/s	1.2 m/s	2.5 m/s
Silt	$2\mu\text{m} < d < 0.2\text{mm}$	0	34°	7 à 18 Mpa	$< 10^{-7}$ m/s	0.6 m/s	1.5 m/s
Sable fin	$0.02\text{mm} < d < 0.2\text{mm}$	0	30 à 40°	7 à 20 Mpa	$\sim 10^{-5}$ m/s	0.3 m/s	0.3 m/s
Sable grossier	$0.2\text{mm} < d < 2\text{mm}$	0	30 à 38°	10 à 25 Mpa	1.10^{-5} m/s à 1.10^{-4} m/s	0.45 m/s	1.7 m/s
Gravier	$2\text{mm} < d < 20\text{mm}$	0	40°	50 à 100 Mpa	1.10^{-3} m/s à 0.1 m/s	0.7 m/s	-
Cailloux	$20\text{mm} < d < 200\text{mm}$	0	45°	100 à 200 Mpa	1.10^{-2} m/s à 1 m/s	1.2 m/s	-
Enrochements	$200\text{mm} < d$	0	$> 45^\circ$	100 à 200 Mpa	> 0.1 m/s	> 1.2 m/s	-

FIGURE 4.13: Ordre de grandeur de vitesses critiques d'érosion [Couret, 2011]

- $S' = 3,7 \text{ m}^2$
- $V_{net} = 27.000 \text{ m}^3$
- $Q = 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$
- $h_{lim} = 1,2 \text{ m}$

On voit donc que le volume exploitable est légèrement supérieur à la moitié du volume disponible. Cependant, ce raisonnement est basé sur une galerie équivalente horizontale, ce qui ne correspond pas à la réalité. Dans quelle mesure cette hypothèse modifie-t-elle les conclusions? Le réseau réel comporte des galeries non horizontales. Dès lors, si on laisse une certaine hauteur au niveau du puits pour éviter l'érosion, cette hauteur ne sera pas la même dans toutes les galeries. Le volume exploitable serait plus grand, mais on risquerait d'avoir une érosion accrue dans certaines galeries où la hauteur d'eau limite ne serait pas respectée. Cependant, le lieu critique de l'érosion se situe près du puits. C'est en effet à cet endroit que le débit y est maximal. Comme le montre la figure 4.14, le réseau de galeries est assez dense au niveau du puits, et une répartition des débits s'effectue entre les différentes galeries. Le débit au sein d'une galerie étant diminué, la hauteur d'eau nécessaire pour limiter l'érosion, aussi.

C'est ainsi qu'on peut conclure que l'hypothèse d'horizontalité de la galerie équivalente sous-estime fortement le volume exploitable, mais n'influence pas réellement le raisonnement fait sur la limitation de l'érosion.

Notons par ailleurs que, comme on peut le voir à la figure 4.14, deux galeries sont directement connectées au puits. Dès lors les débits sont divisés en deux, et la hauteur d'eau limite est aussi divisée en deux. On arrive donc à une hauteur d'eau minimum de

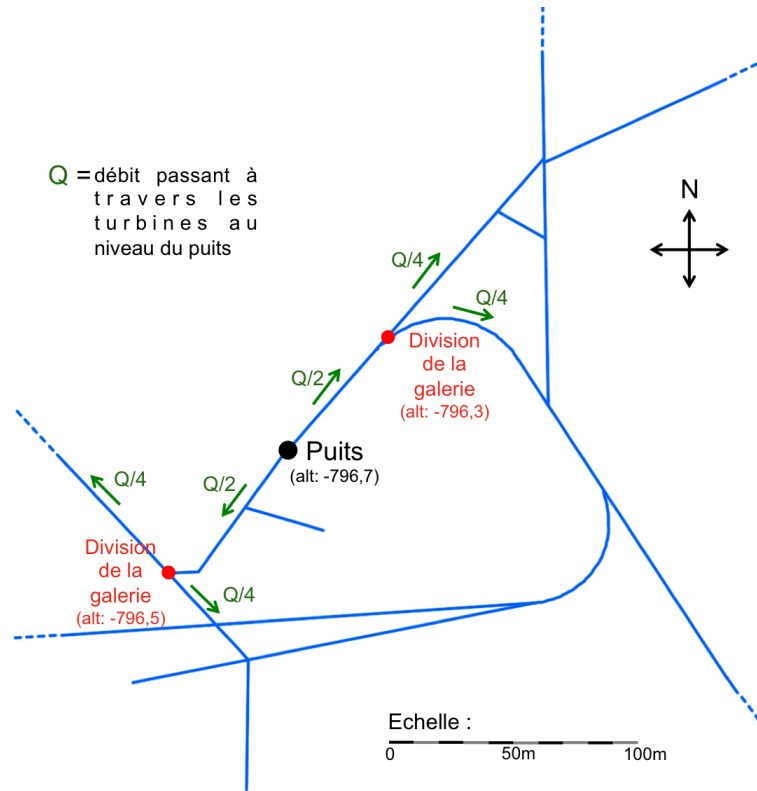


FIGURE 4.14: Organisation des galeries aux alentours du puits

60cm. Remarquons que ce principe n'est valable que dans le cas d'une galerie de section rectangulaire. En effet, dans une section circulaire, le fait de diviser la hauteur d'eau par deux, implique une diminution de la section d'un facteur plus important. Dans le cadre de l'étude de faisabilité, nous ne prenons néanmoins pas cette erreur en compte.

Cette hauteur limite doit être assurée pour le point le plus défavorable à ce niveau de débit. C'est à dire le point le plus élevé entre le puits et les 2 divisions des débits représentées en rouge sur le dessin. On voit que c'est le point de division au Nord-Est le plus élevé. Il se situe à -796,3m. La hauteur d'eau minimum au niveau du puits vaut donc :

$$h_{min} = 0,60 + (796,7 - 796,3) = 1m$$

En appliquant la valeur de $h_{min} = 1m$ au niveau du puits dans la routine Matlab, on arrive à une différence de volume de l'ordre de 10% par rapport au volume total disponible. C'est à dire que pour nos 50.000 m^3 disponibles, 45.000 sont exploitables et non 27.000 comme calculé ci-dessus dans le cas d'une galerie horizontale équivalente.

Ce processus doit être mené itérativement. En effet, plus le volume est grand, plus les débits peuvent être importants pour un temps de turbinage donné, plus la section minimale doit être importante pour limiter l'érosion, et plus le volume est petit. On sait cependant que cette valeur se situe entre 27.000 et $45.000m^3$. Par simplicité, ce calcul itératif a été remplacé par le calcul des volumes exploitables à partir de différentes valeurs de débit. Lorsque le débit fixé par les turbines est équivalent au débit maximum autorisé pour limiter l'érosion, c'est à dire à l'intersection des deux graphiques représentés à la figure 4.15, on obtient le volume exploitable. Il est donc de $38.000m^3$, ce qui correspond à un débit de $3,5m^3/s$ pendant 3h durant la phase de turbinage.

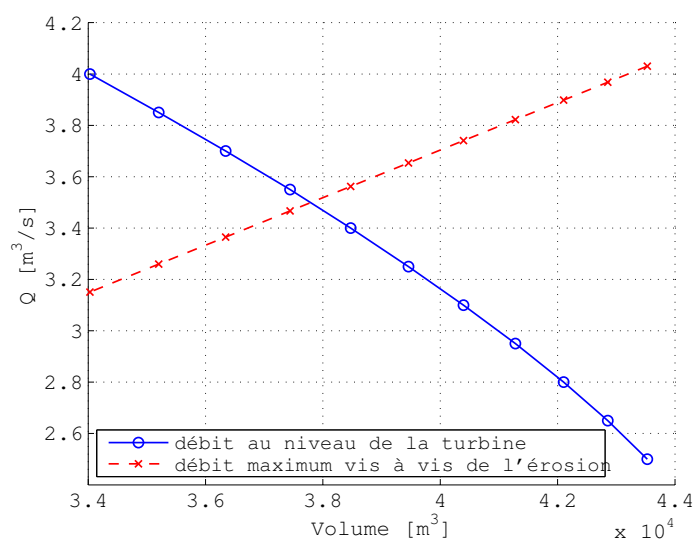


FIGURE 4.15: Solution du processus itératif

4.1.3 Effet d'un éboulement sur le volume disponible

L'état actuel des galeries n'est pas connu. Jusqu'ici on a fait l'hypothèse que les galeries étaient dans un état identique à celui de l'époque de la fermeture. Cette hypothèse est confortée par le fait que les boueux sont conçus pour une période de retour de 20 à 100 ans [Stassen, 1986]. Cependant aucune maintenance n'a été réalisée depuis la fermeture, et il n'est donc pas exclu que des éboulements aient eu lieu. C'est pourquoi il semble pertinent d'étudier l'impact d'un éboulement sur l'accessibilité des différents volumes.

4.1.3.1 Méthodologie

L'effet de l'éboulement est étudié sur un modèle idéalisé de galerie unique horizontale, similaire à celui fait précédemment. Il est représenté à la figure 4.16 dans le cadre du turbinage, et à la figure 4.17 dans le cadre du pompage.

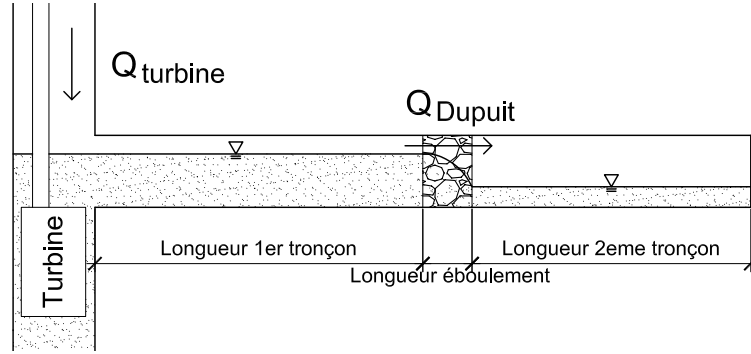


FIGURE 4.16: Ecoulement à travers un éboulement (turbinage)

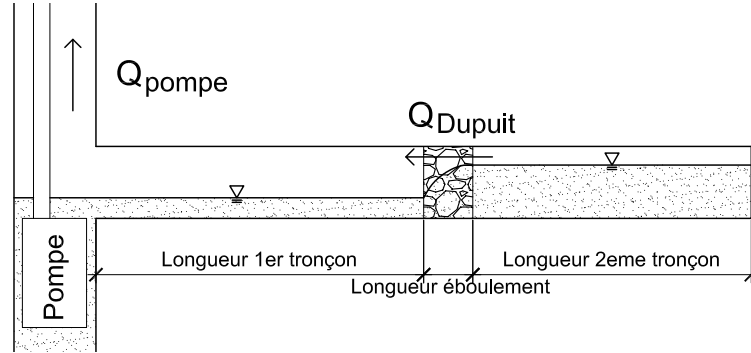


FIGURE 4.17: Ecoulement à travers un éboulement (pompage)

Nous allons utiliser la loi de Dupuit. Cette loi est la particularisation de la loi de Darcy pour un écoulement à surface libre [Laforest et Jalliffier-Verne, n d], et est souvent utilisée pour calculer l'écoulement à travers un barrage poreux. L'expression de cette loi est :

$$q_v = K \frac{h_1^2 - h_2^2}{L_{eblmt}} \quad (4.4)$$

Où :

$$K = \frac{k}{\mu} \rho g$$

avec

- q_v = le débit à travers l'éboulement $[m^3/s/m']$;
- K = le coefficient de perméabilité du milieu $[m/s]$;
- k = perméabilité intrinsèque du milieu $[m^2]$;
- ρ = la masse volumique du fluide, prise égale à 1000 $[kg/m^3]$;
- g = l'attraction terrestre, prise égale à 9,81 $[m/s^2]$;
- h_1 = la hauteur d'eau en amont de l'éboulement $[m]$;
- h_2 = la hauteur d'eau en aval de l'éboulement $[m]$;
- L = la longueur de l'éboulement.

Le principe de calcul repose sur les différences finies. Le domaine a été découpé spatialement en uniquement deux mailles. Une première maille modélise le tronçon de galerie avant l'éboulement, et la seconde maille modélise le tronçon de galerie après l'éboulement. Ce maillage restreint ne permet pas une étude instationnaire de l'écoulement au sein de la galerie, mais bien vis-à-vis de l'éboulement. Il n'y a donc aucun processus hydrodynamique pris en compte. Ce choix est motivé par le but de l'étude, qui est l'effet d'un éboulement, et non pas l'écoulement au sein d'une galerie.

A chaque itération temporelle, les hauteurs d'eau sont calculées grâce à l'équation de continuité, c'est-à-dire en fonction du volume disponible et des débits d'entrée et de sortie, comme représenté sur la figure 4.17. L'équation de continuité peut s'écrire :

$$h^{t+\Delta t} = h^t + \frac{\Delta q}{L_{tronçon}} \Delta t \quad (4.5)$$

Avec h la hauteur d'eau au sein de la maille, $L_{tronçon}$ la longueur de portion de galerie correspondant à la maille, Δq le bilan des débits au sein de la maille et Δt le pas de temps. Le débit au sein de l'éboulement est alors recalculé en fonction des nouvelles hauteurs d'eau, via l'équation 4.4.

Afin d'éviter les instabilités numériques, nous avons fait le choix d'un pas de temps dynamique, c'est-à-dire qui change à chaque itération. Il est alors indispensable de définir le critère de stabilité. Nous avons une équation du type :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = K \frac{\partial^2}{\partial x^2} (h^2)$$

Je n'ai trouvé aucun critère de stabilité pour ce type d'équation dans la littérature. Cependant, après avoir linéarisé l'équation, il est possible de trouver un tel critère dans [Hirsch, 2007]. Il s'exprime comme ceci :

$$\alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \leq 0,5$$

En exprimant et en linéarisant l'expression des débits :

$$q_{i-1/2} = K \frac{h_{i+1}^2 - h_i^2}{L_{eblmt}} = K.h_0 \frac{h_{i+1} - h_i}{L_{eblmt}}$$

$$q_{i+1/2} = K \frac{h_{i+1}^2 - h_i^2}{L_{eblmt}} = K.h_0 \frac{h_{i+1} - h_i}{L_{eblmt}}$$

En prenant la moyenne des hauteurs comme valeur d' h_0 et en substituant ces équations dans l'équation 4.5, il vient :

$$h_i^{t+\Delta t} = h_i^t + \frac{K h_0 \Delta t}{L_{trouçon}} \left(\frac{1}{L_{eblmt}} \right) [h_{i+1}^2 - h_i^2 - h_i^2 + h_{i-1}^2]$$

La stabilité numérique est alors assurée lorsque :

$$\frac{K h_0 \Delta t}{L_{trouçon}} \left(\frac{1}{L_{eblmt}} \right) \leq 0,5$$

En mode turbine, le niveau d'eau dans le puits peut être supérieur au niveau de la galerie. Dès lors une hypothèse supplémentaire doit être formulée. Elle est représentée à la figure 4.18, et consiste à dire que la loi de Dupuit est toujours valable lorsque la galerie en amont de l'éboulement est en charge. Cette hypothèse part du principe, que si éboulement il y a eu, le toit de la galerie s'est effondré, et que sa perméabilité augmente. Dans ce cas, la loi de Dupuit sera appliquée, en considérant une hauteur d'eau égale à la pression, c'est à dire à la hauteur d'eau dans le puits.

4.1.3.2 Résultats et analyse paramétrique

L'éboulement est caractérisé par deux paramètres. Sa longueur, qui sera choisie arbitrairement étant donné que l'état actuel des mines est inconnue, et sa perméabilité intrinsèque, qui peut être estimée en fonction des valeurs trouvées dans la littérature. Au vu de la table 4.2, un éboulement étant principalement composé de gros granulats, il est raisonnable de se placer dans la gamme des graviers, c'est à dire entre 10^{-0} et 10^{-3} . En tout cas, il devient difficilement imaginable de descendre sous la barre des $10^{-5}/10^{-6}$.

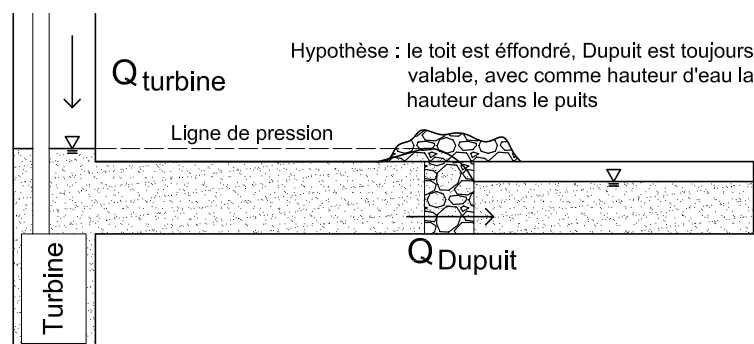


FIGURE 4.18: Hypothèse supplémentaire faite lors du cas de la turbine

Type de sol	Gravier	Sables	Limons (silts)	Argiles
$k [m/s]$	$10^0 \rightarrow 10^{-3}$	$10^{-3} \rightarrow 10^{-6}$	$10^{-6} \rightarrow 10^{-9}$	$10^{-9} \rightarrow 10^{-11}$

TABLE 4.2: Ordre de grandeur de perméabilité intrinsèque d'après [Magnan, 1999, Magnan, 2004]

Nous nous plaçons dans le cas, très défavorable, d'une perméabilité de l'ordre d'un sable fin $k = 10^{-5}$ et d'une longueur d'éboulement de $L = 100m$. Le tout pour un volume total de $38.000m^3$ et un débit de $3,5m^3/s$. La hauteur de la galerie considérée est de $1,9m$, ce qui correspond à $h_{equiv}(= 2,8m) - h_{lim}$.

Les résultats sont présentés, dans le cas du turbinage, à la figure 4.19. Comme on peut le voir sur le 3ème graphique, le fait d'autoriser une hauteur d'eau dans le puits, supérieure à celle de la galerie, permet d'augmenter très fortement la différence de pression entre les deux côtés de l'éboulement. Cette pression augmente très rapidement, car l'eau, pendant un bref instant, n'a d'autre alternative que de se stocker dans le puits, le premier tronçon de la galerie étant entièrement rempli. Suite à l'augmentation de hauteur d'eau dans le puits, les pressions augmentent rapidement, et le débit au sein de l'écoulement s'accélère. On remarque sur le 4ème graphique, que la hauteur d'eau dans le puits, équivalente à la pression dans le premier tronçon, culmine aux alentours de $2.2m$, et non pas $4m$, valeur maximale autorisée. Ceci s'explique par le fait que les turbines ont fonctionné $3h$, et que 98% des galeries sont remplies.

On peut donc conclure qu'un éboulement local n'a pas de réel impact sur l'accessibilité des volumes, dans le mode turbinage.

Les résultats, dans le cas du pompage, sont représentés à la figure 4.20. Ces résultats sont très différents. On ne bénéficie en effet pas du surplus de différence de pression entre les deux côtés de l'éboulement. Après $2h30$ de fonctionnement, les pompes doivent donc

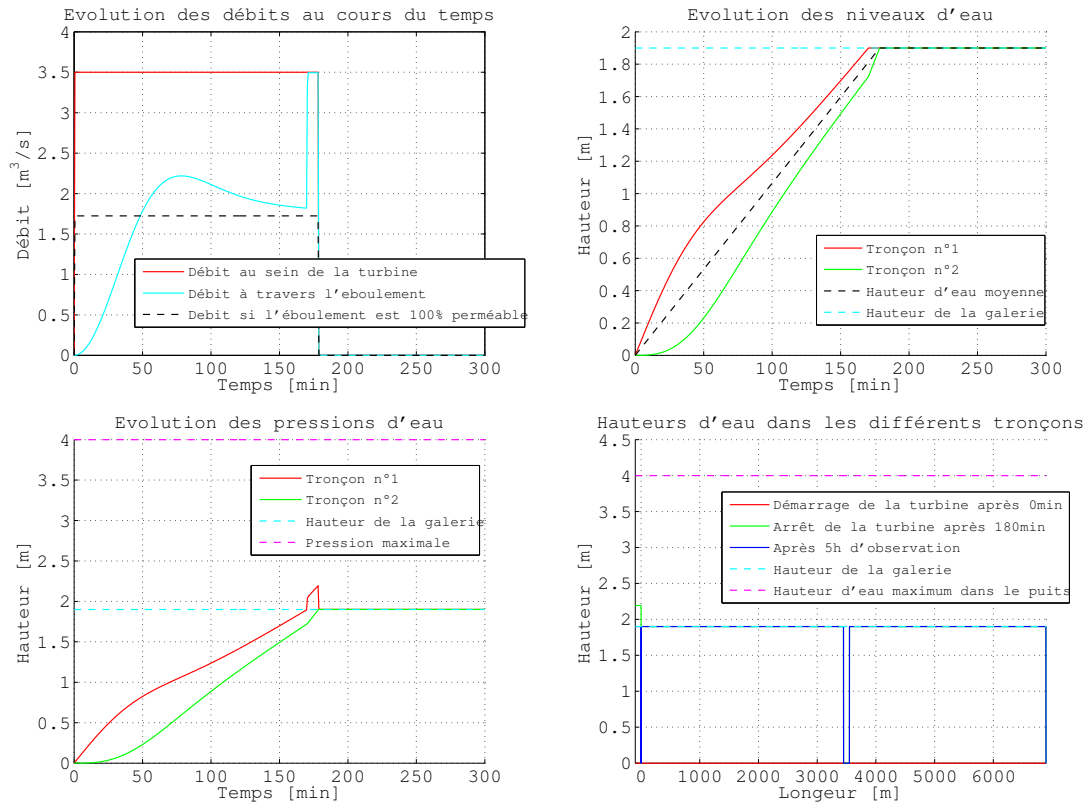


FIGURE 4.19: Résultats de l'étude d'un éboulement dans le cadre d'un turbinage

s'arrêter, sous peine d'entamer la frange d'eau nécessaire à la limitation de l'érosion. Près de 85% du volume a néanmoins déjà été pompé. De plus, comme on peut le remarquer à la figure en haut à droite, le niveau s'égalise relativement vite (environ 1h) après l'arrêt des pompes. Le pompage pourrait reprendre après une heure, pour continuer à vider les galeries. Pomper l'entièreté du volume est donc possible, au dépens d'une gestion plus complexe des pompes.

Notons que les hypothèses formulées sur la perméabilité intrinsèque et la longueur de l'éboulement sont très strictes. C'est pourquoi, nous allons étudier leur influence pour se persuader que le problème n'est pas si conséquent qu'il en a l'air. L'étude de ces paramètres se fait avec le même set de données que précédemment ($k = 10^{-5} \text{ m/s}$, $L_{\text{ebmnt}} = 100 \text{ m}$, $Q = 3,5 \text{ m}^3/\text{s}$), excepté celle du paramètre étudié. Nous ferons ces études paramétriques dans le cadre du pompage, puisque nous avons vu que c'est le cas le plus critique.

Le graphique de gauche de la figure 4.21 montre que l'impact du paramètre k est très important. On voit que lorsqu'on choisit des valeurs de perméabilité intrinsèque plus

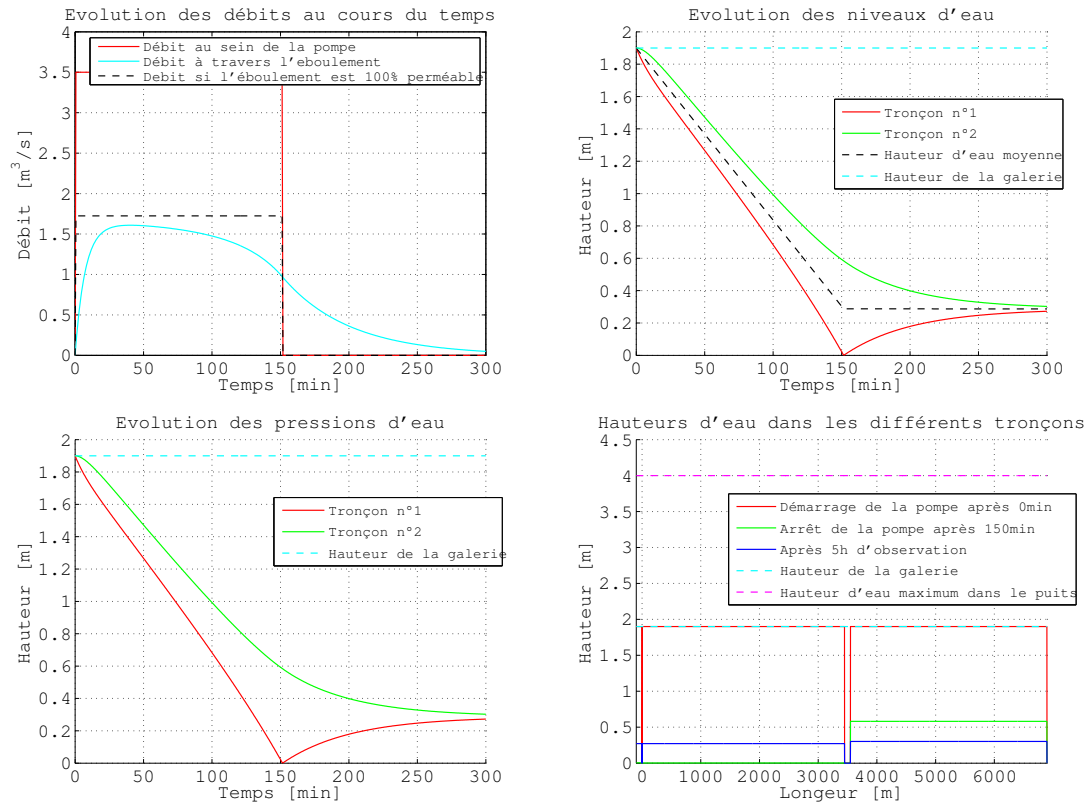
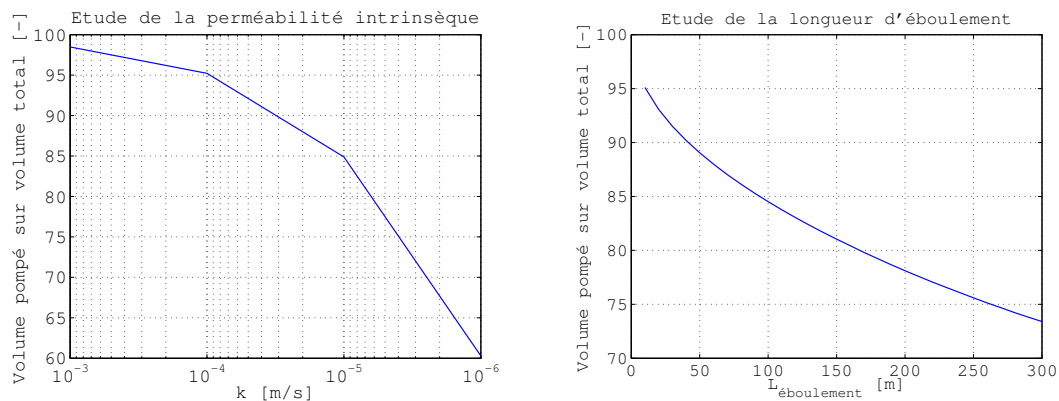


FIGURE 4.20: Résultats de l'étude d'un éboulement dans le cadre d'un pompage

raisonnables, c'est à dire 10^{-3} , le problème de l'éboulement devient négligeable. On peut donc conclure qu'un éboulement aura un impact négligeable sur l'accessibilité des volumes des galeries situées après celui-ci.

FIGURE 4.21: Influence des paramètres k et L_{eblmt}

Le graphique à droite de la figure 4.21 montre que l'impact de la longueur d'éboulement

est un paramètre important. Pour de petits éboulements, il n'y a pas lieu de s'inquiéter. Donc, dans le cas d'un éboulement de 40-50m de long et de perméabilité intrinsèque de $10^{-5} m/s$, 90% du volume serait accessible.

Il reste deux paramètres à étudier, l'effet du débit et la position de l'éboulement. En ce qui concerne le débit, rappelons que le temps de turbinage est calqué sur la durée des pics de consommation. Le pompage, lui, peut être effectué sur une plus longue durée, c'est-à-dire de manière à demander moins de puissance. Le système de pompe-turbine doit bien sûr le permettre. Le graphique de gauche de la figure 4.22 montre que l'effet de ce débit influence effectivement le pourcentage de volume exploitable.

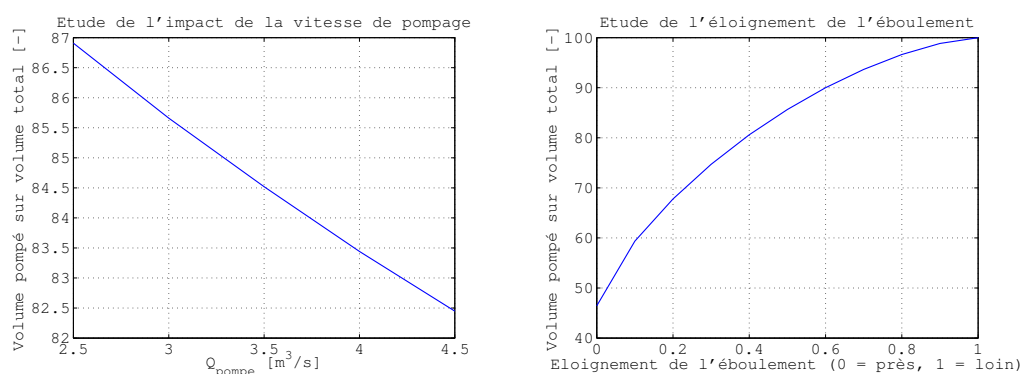


FIGURE 4.22: Influence du débit de pompage et de l'éloignement de l'éboulement

Le graphique de droite de la figure 4.22, montre, quant à lui, l'effet de l'éloignement de l'éboulement. On voit que les valeurs chutent fortement lorsque l'éboulement s'approche de puits, mais restent relativement élevées, 45%. Donc, près d'un puits, il faudrait tenir compte d'un éboulement, mais jusqu'à une certaine distance seulement. A noter que, plus on s'éloigne du puits, plus les chemins suivis par l'eau se multiplient. Il peut exister donc plusieurs chemins pour accéder au volume situé derrière un éboulement.

La présence d'éboulements ne consitue donc pas un problème pour accéder au volume disponible derrière cet éboulement, du moins si les éboulements ne sont pas généralisés à tout le réseau de galeries.

Au dela de vérifier si des éboulements généralisés ne se sont pas produits, il serait intéressant, dans une étude plus poussée, d'étudier deux autres phénomènes : tout d'abord l'éboulement pourrait se colmater avec de petites particules en suspension, ce qui diminuerait sa perméabilité ; ensuite, lorsque l'eau traverse l'éboulement, elle peut se charger de particules par érosion.

4.1.4 Venues d'eau, impact sur le rendement

Il reste à estimer les infiltrations d'eau naturelles pour en estimer l'impact sur le rendement global. Dans le cadre de la concession de Gosson-Kessales, le SPW de Liège possède encore une archive décrivant les différents puits et contenant diverses informations (voir annexe n°6), dont, entre autres, l'exhaure journalière moyenne pour certaines semaines (voir figure 4.23).

Situation de l'exhaure.

Le point de la situation avait été fait pour la dernière fois lors de ma visite du 1er août (rapport n°10).

L'exhaure se poursuit aux étages de 302 et de 500. Voici les moyennes journalières enregistrées depuis le 25 juillet.

<u>Etage de 302</u>	<u>Etage de 500</u>	<u>Total</u>	<u>semaine du .. au</u>
7.744 m3	3.336 m3	11.080 m3	25/7 au 31/7
6.965	3.577	10.482	1/8 au 7/8
7.264	3.428	10.692	8/8 au 14/8
7.087	3.387	10.474	15/8 au 21/8
7.249	3.400	10.649	22/8 au 28/8
7.328	3.415	10.743	29/8 au 4/9
7.915	3.290	11.205	5/9 au 11/9
7.814	3.373	11.186	12/9 au 18/9
7.392	3.332	10.724	19/9 au 25/9
7.383	3.632	11.015	26/9 au 2/10
6.990	3.778	10.768	3/10 au 9/10

Il y a peu d'enseignements à tirer de ces chiffres sinon que la situation est assez stable.

FIGURE 4.23: Valeurs d'exhaure pour la concession de Gosson-Kessales [fait partie de l'annexe n°6]

Plusieurs questions apparaissent pour exploiter ces données. Premièrement, l'utilisation du « . » dans les nombres. Signifie-t-il que les trois derniers chiffres sont des décimales, ou alors est-ce un séparateur de milliers ? Deux éléments permettent de répondre à cette question. Tout d'abord, sur l'autre page de ce document, les diamètres de puits sont donnés avec des virgules (4,3m). Ensuite un débit de $11.000m^3/jour$ équivaldrait à $7m^3/min$ alors que $11m^3/jour$ donnerait un débit de $7l/min$. Cette dernière valeur équivaut au débit d'un robinet ménager, ce qui semble impensable, vu la taille habituelle des salles de pompes (voir figure 4.24). On retrouve d'ailleurs dans la littérature [Stassen, 1966] des valeurs de l'ordre de $100m^3/h$. On parle donc bien d'un débit de $11.000m^3/jour = 450m^3/h$.

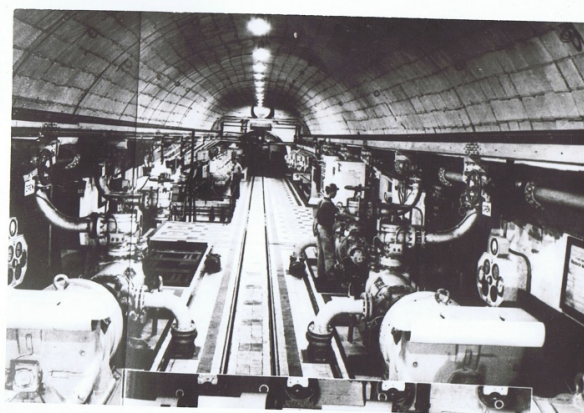


FIGURE 4.24: Salle de pompage d'un charbonnage [Stassen, 1966]

Deuxièmement, les valeurs d'exhaure ne sont pas données pour notre étage (960), mais bien pour les étages 300 et 500. Il n'est pas évident de déduire les débits d'infiltration d'un niveau en connaissant les autres. Les débits des étages supérieurs se retrouvent-ils au niveau de l'étage 960 ? Ou sommes-nous en présence d'une nappe perchée, ce qui pourrait diminuer drastiquement les débits d'infiltration ?

Troisièmement, le document n'est pas daté, il est donc impossible de déterminer si ces débits correspondent à une année forte en précipitations ou pas. Les débits d'infiltration sont en effet directement liés aux précipitations, tout du moins pour les galeries peu profondes (voir figure 4.25).

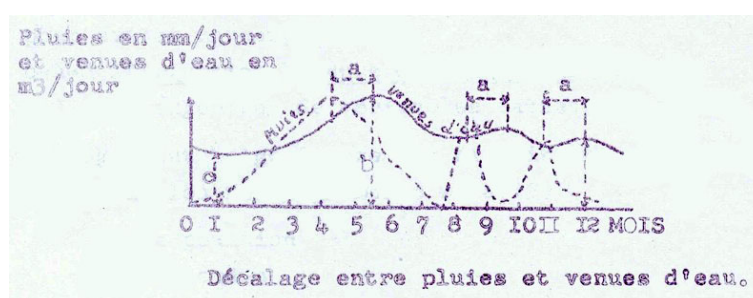


FIGURE 4.25: Lien entre précipitations et débit d'infiltration [Stassen, 1966]

Que déduire dès lors des chiffres de la figure 4.23 ? En faisant l'hypothèse, très réductrice, que les infiltrations de l'étage 960 correspondraient à la totalité des venues d'eau des étages 302 et 500, c'est à dire $11.000 \text{ m}^3/\text{jour}$, ces infiltrations représenteraient plus de 30% du volume de notre réservoir ! A noter que cette valeur concerne les mois de septembre et août, or vu les chiffres communiqués à Blegny (8.000 l/h l'été pour 20.000 l/h

l'hiver) [L. De Bruyn, comm. pers., 2013]¹, les $11.000\text{ m}^3/\text{jour}$ d'eau infiltrée en été pourraient donc doubler en hiver.

Dans le cas du charbonnage de Gosson-Kessales, ces venues d'eau peuvent représenter des valeurs très importantes qui pourraient compromettre fortement la rentabilité de la construction d'une telle centrale. Une des premières vérifications à effectuer avant d'élaborer un quelconque projet, consiste à définir avec plus de précisions les débits d'infiltrations réels auxquels s'attendre. Remarquons que toutes les mines ne sont pas soumises à des valeurs d'infiltration si importante. Par exemple, à Blegny, cette valeur valait seulement $480\text{ m}^3/\text{jour}$, c'est-à-dire 20 fois moins. A noter que les galeries les plus profondes de la mine de Blegny se situent à 530m de profondeur [L. De Bruyn, comm. pers., 2013].

Il est donc indispensable de tenir compte de ce critère lors du choix d'un site !

4.1.5 Conclusion

En résumé, nous disposons d'un volume disponible de 50.000 m^3 . Afin de limiter l'érosion, on le considère à 35.000 m^3 , ce qui signifie que 30% de volume disponible est inexploitable. L'effet d'éventuels éboulements est lui par contre négligeable, tout du moins s'ils ne sont pas généralisés. La différence de hauteur d'eau au sein du réservoir inférieur varie de 5m. Dès lors, la pression au sein des galeries varie de $0,5\text{ bars}$ au maximum, ce qui limite les contraintes mécaniques appliquées sur les parois des galeries. Pour ce dernier point, lors de la réalisation d'un projet, une étude plus poussée devrait être menée, en prenant en compte la nature de la roche et le type de soutènement. De plus il faudrait étudier l'emprisonnement de l'air, lorsqu'on remplit totalement une galerie.

Conformément aux explications du chapitre 2.5.1, le rabattement de la nappe phréatique ne devrait pas poser de problème, si ce n'est la pollution lors de la fin de l'exploitation de la centrale, par la remontée des oxydes. Il y aurait juste une seule grosse diminution des pressions d'eau au sein des galeries.

Le problème majeur soulevé proviendrait de la perte de rendement due aux infiltrations d'eau très importantes, en tout cas pour le charbonnage de Gosson-Kessales. Mais comme nous l'avons vu, le choix d'un meilleur site permettrait de limiter ces venues d'eau naturelles.

Continuons l'analyse en faisant abstraction de ces infiltrations d'eau importantes pour en tirer des conclusions transposables à une mine plus adaptée.

1. Employé au Centre d'archives de Blegny, rencontré lors de ma visite de la mine de Blegny (17 février 2013) et au Centre d'archives, puis d'échanges de courriers électroniques.

Nous disposons donc d'un système, disposant des caractéristiques suivantes :

- $V = 38.000m^3$, le volume net ;
- $H = 930m$, la hauteur de chute moyenne ;
- $Q = 3,5m^3/s$, le débit nécessaire à 3h de turbinage.

Le rendement global d'un STEP conventionnel se situe entre 75 et 80% (voir chapitre 3.2). Rappelons qu'un léger gain de rendement pourrait être obtenu quant à la disposition des réservoirs et du rapport L/H (distance horizontale / hauteur de chute) très faible.

Considérons maintenant les pertes de rendement dues :

- aux infiltrations d'eau, noté « x » ;
- aux nouvelles technologies, noté « y » (par exemple par l'introduction d'un système compact nécessitant une transmission de l'énergie entre la turbine et l'alternateur placé à la surface, voir chapitre 3.3.3).

Le rendement « x » influence uniquement la partie pompe du système. C'est en effet de l'eau pompée qui ne peut être turbinée. Le rendement « y », par contre, compte également pour la partie turbine, et pour la partie pompe. La technologie est, en effet, identique pour l'actionnement de la pompe que pour celui de la turbine. Le rendement des différentes parties est repris à la table 4.3

	STEP conventionnel	STEP minier
Partie « pompe »	87-90%	$\eta_{STEP\ conventionnel} + x + \frac{y}{2}$
Partie « turbine »	87-90%	$\eta_{STEP\ conventionnel} + \frac{y}{2}$
Rendement global	75-80%	$\eta_{STEP\ conventionnel} + x + y$

TABLE 4.3: Rendement d'un STEP

En guise d'illustration, calculons l'ordre de grandeur de la puissance pouvant être générée. Cette puissance d'énergie produite concerne la partie turbine de la centrale. Le rendement « turbine » vaut :

$$\eta_{turbine, STEP\ minier} = \eta_{STEP\ conventionnel} + \frac{y}{2} = 88 + \frac{20}{2} = 78\%$$

La valeur de y étant tout à fait arbitraire, mais choisie de façon à pouvoir calculer l'ordre de grandeur de la puissance mobilisable. Cette dernière vaut :

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H = 25\ MW$$

avec :

- $\eta = 78\%$
- $\rho = 1000\text{ kg/m}^3$
- $g = 9,81\text{ m/s}^2$
- $Q = 3,5\text{ m}^3/\text{s}$
- $H = 930\text{ m}$

La gamme de puissances visées rentre donc en compétition avec les systèmes concurrents de stockage par supraconducteur, hydrogène, air comprimé et batteries qui possèdent un rendement dans les alentours de 50% (voir chapitre 1.2.3). Il faudrait donc, pour avoir un rendement similaire à ceux là, que les pertes de rendement « $x + y$ » soient inférieures à 25%.

Le STEP minier, dans le cadre du charbonnage, semble donc intéressant si la perte de rendement due aux infiltrations et à la mise en place d'une nouvelle technologie est inférieur à 25%. Notons que si le choix d'une caverne classique est faite, le rendement « y » devient nul, mais que du coup les prix d'investissement explosent vis-à-vis des stockages alternatifs. A un rendement technique plus élevé serait donc associé un rendement économique plus faible.

4.2 L'ardoisière de Martelange

Comme déjà évoqué, les ardoisières possèdent un volume très différent de celui des charbonnages. Ce volume est en effet beaucoup plus compact, et plus conforme à celui d'un réservoir classique.

Le premier niveau de recherche pour étudier notre cas de figure concerne la recherche de plans existants. Je n'ai trouvé aucune archive concernant les ardoisières. Apparemment des archives existeraient pour l'ardoisière de Martelange, mais éparpillées chez les différents anciens propriétaires. Elles ne sont pas regroupées, comme pour les charbonnages, au SPW.

4.2.1 Volume et situation

Pour ce travail, je me suis basé uniquement sur le dessin représenté à la figure 4.26². Il est important de noter que ce dessin est un dessin 2D en perspective. Il a été réalisé par un membre de l'ISSeP³ en 1991, lorsque l'ardoisière était toujours en exploitation.

2. Figure reçue en main propre lors d'un rendez-vous avec les ingénieurs de l'ISSeP. Cette image sera réutilisée plusieurs fois dans la suite de ce travail.

3. Institut Scientifique de Service Public

L'état de l'ardoisière était bien connu lors de la constitution de ce dessin. En revanche le type du dessin est peu propice à une étude précise. Il utilise des axes inhabituels et demande un peu de gymnastique cérébrale pour bien le comprendre. Pour la suite, j'ai redressé ce dessin pour le remettre dans des axes plus traditionnels, mais ce, au dépens d'une distorsion de l'échelle du système d'axes (voir coin inférieur gauche de la figure 4.31 page 99). Le calcul des volumes se fera donc, quand même, sur le dessin non redressé pour garder une échelle identique dans les différentes directions.

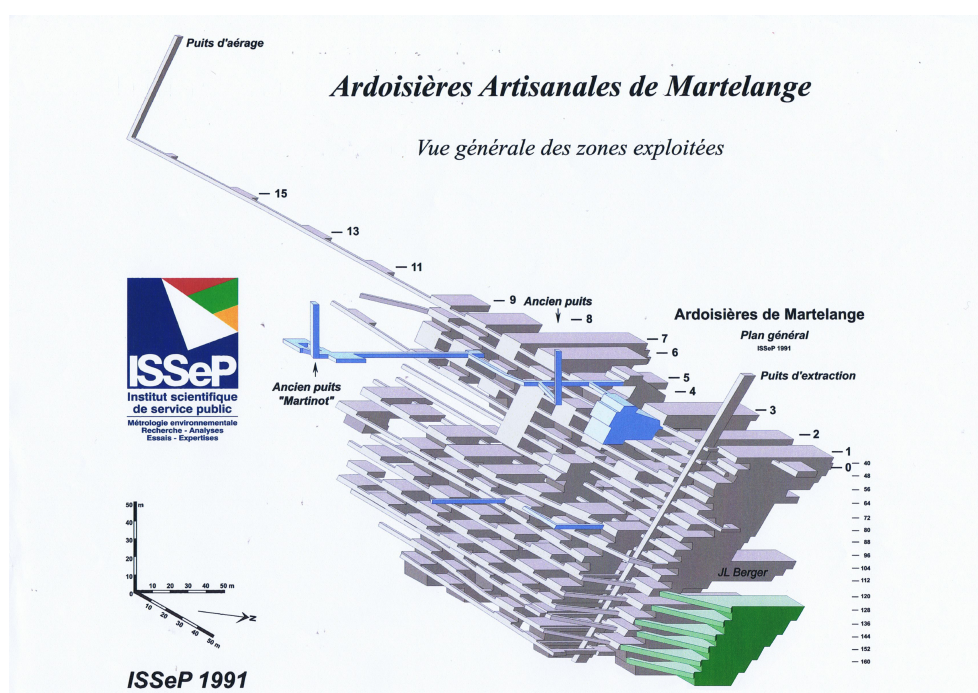


FIGURE 4.26: Ardoisière de Martelange [J.-L.. Berger et J.-P. Drevet, comm. pers. 2013]

Il faut signaler que différentes pré-études de pompage-turbinage ont déjà été réalisées, ou sont en cours de réalisation, sur cette ardoisière. Cependant ces études sont confidentielles, mandatées par des organismes privés, et ne sont donc pas mises à la disposition du public. Je n'y ai pas eu accès.

La première étape consiste à estimer le volume. Au vu de la figure 4.27, le volume englobant l'ardoisière est légèrement supérieur à $1.100.000m^3$. Si l'on considère que le volume exploité est légèrement supérieur au quart du volume total, le volume total de vide peut être estimé à $300.000m^3$.

Cette estimation personnelle de $300.000m^3$ est confortée, d'une part par les contacts pris avec les personnes ayant participé aux études privées, d'autre part par les photos (voir

figure 4.28) prises par des spéléologues [Duseigne, n d] ayant visité l'ardoisière et par leurs commentaires sur la taille et le nombre de chambres [V. Duseigne, comm. pers., 2013]⁴. Dans la suite du travail, nous considérerons un volume total de $300.000m^3$, également réparti entre les niveaux -40 et -160m soit sur 120m de hauteur. Ce qui signifie qu'une tranche de 40m de hauteur comporte $100.000m^3$.

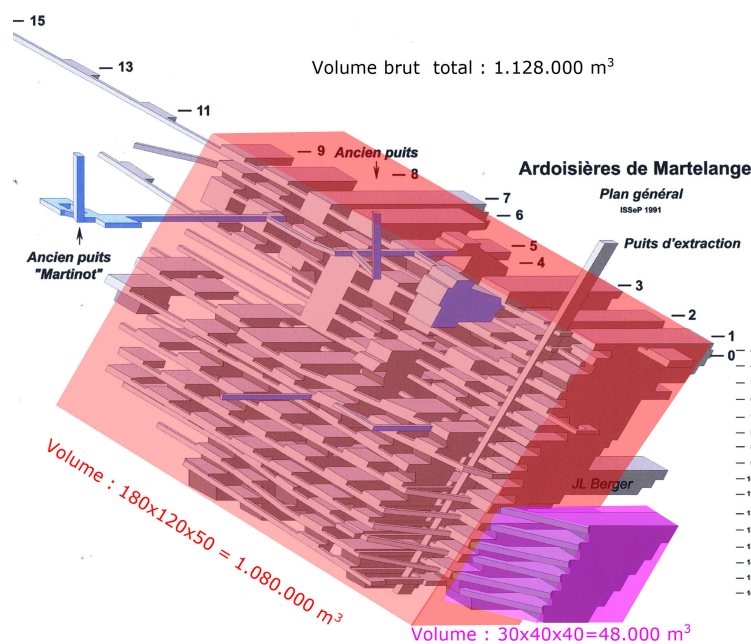


FIGURE 4.27: Volume englobant l'ardoisière



FIGURE 4.28: Photo d'une chambre de l'ardoisière de Martelange [Duseigne, n d]

En plus de disposer d'une profondeur et d'un volume intéressant, l'ardoisière de Martelange se situe non loin d'une colline, permettant d'augmenter le dénivelé d'une centaine

4. Echange téléphonique et de courriers électroniques avec ce spéléologue.

de mètres. Le puits d'aération de l'ardoisière arrive d'ailleurs sur le flanc de cette colline. Une première idée serait donc d'utiliser la galerie d'aération pour accéder au sommet de la colline, ce qui pourrait diminuer le prix d'installation des conduites. Cependant, comme le montre la figure 4.29, le sommet de la colline est presque équidistant du puits d'aération (400m) et du début de la galerie menant au puits d'aération (430m).

Cette analyse montre donc qu'il ne faut pas utiliser la galerie d'aération en guise de conduite d'amenée d'eau. Il est préférable de positionner le réservoir, soit le plus près possible des cavités pour limiter les investissements, soit sur la colline tout en créant une nouvelle galerie d'amenée d'eau, pour utiliser le dénivelé topographique. Des données non techniques (présence de maisons, du village de Martelange, de terrains privés, etc) pourraient aussi être déterminantes pour le choix final du cheminement des conduites ou galeries.

Il est important de noter que la position du puits d'aération n'est pas répertoriée dans les fichiers du SPW [SPW, 2013b] précisément. Sa position est connue à une cinquantaine de mètres près. Même avec cette imprécision, l'analyse précédente reste valable.

Le puits d'extraction de la mine se trouve à une altitude de 370m. Le sommet de la colline culmine lui à 475m. La topographie permet donc un gain de 105m.

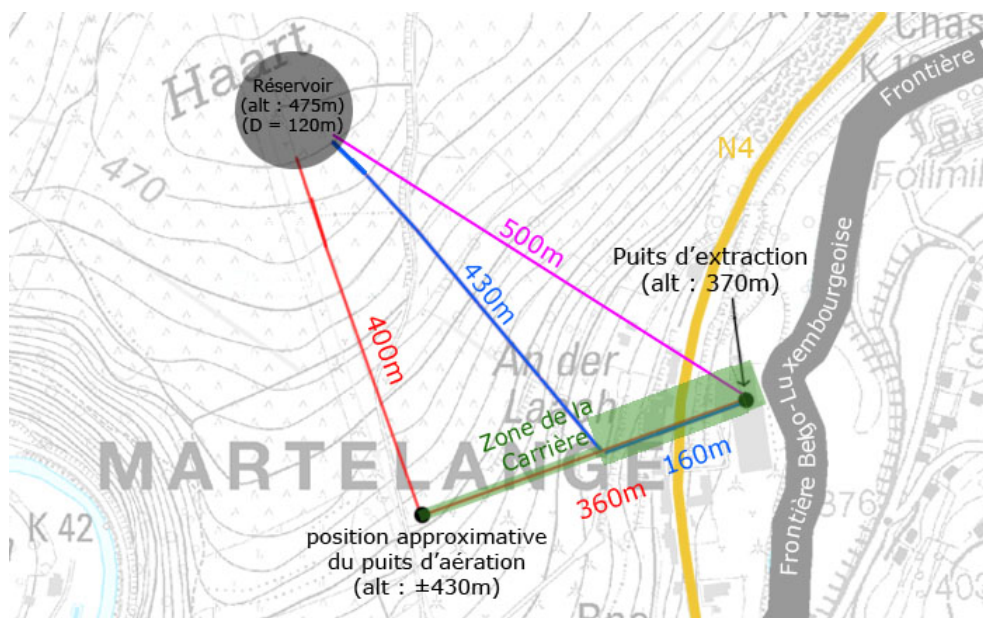


FIGURE 4.29: Localisation de l'ardoisière de Martelange d'après [SPW, 2013b]

Dans la suite, nous travaillerons avec un volume de $100.000m^3$ et non 300.000. Pourquoi

ce choix ? Tout d'abord, le fait de limiter le volume à $100.000m^3$ permet de limiter la variation du niveau d'eau à 40m suivant que le réservoir est vide ou plein. Ensuite, il est important de se souvenir que les turbomachines sont dimensionnées pour une hauteur de chute fixe. C'est ainsi que limiter la variation du niveau d'eau permet aussi d'éviter une perte de rendement importante.

Concernant le réservoir supérieur, situé sur la colline, en choisissant une profondeur de 10m, il vient une surface de $10.000m^2$, ce qui correspond à un disque de 113m de diamètre, ce qui est tout à fait abordable au vu de l'espace disponible sur la colline (voir figure 4.29).

4.2.2 Erosion, hydrodynamique, débits d'infiltration

Vu la documentation lacunaire sur l'ardoisière, il est impossible de réaliser un travail similaire à celui fait pour le charbonnage de Gosson-Kessales. Cependant, vu l'organisation du volume de l'ardoisière en chambres et non en galeries, on peut estimer que les problèmes d'érosion et d'hydrodynamique sont moins importants. En effet, en prévoyant un petit ouvrage de dissipation et de répartition des débits aux alentours des turbomachines, les débits devraient rapidement baisser dans le reste de la cavité. Or, pour le charbonnage, ces problèmes, même si plus importants, ne paraissaient pas critiques pour la faisabilité d'une centrale. Nous pouvons tirer les mêmes conclusions dans le cas de l'ardoisière.

En revanche, les effondrements d'une chambre ou d'une galerie ont des conséquences très différentes. En effet, dans les ardoisières, ou plus généralement dans les cavités exploitées en chambres, ce sont principalement des effondrements de type « domino » qui se produisent. C'est-à-dire que l'effondrement d'une chambre engendre l'effondrement des chambres voisines. Dès lors les effets d'un tel effondrement pourraient être critiques, non pas seulement pour la centrale, mais aussi pour les constructions situées en surface. Une étude de stabilité de l'ardoisière est donc indispensable pour éviter des catastrophes comme il y en a déjà eu dans le passé, à Warmifontaine par exemple [Santinelli, 1994].

Le point critique pour la réalisation d'un STEP minier dans le charbonnage de Gosson-Kessales, est, nous l'avons vu, le débit des eaux d'infiltration. Qu'en est-il dans le cas d'une ardoisière ?

Basons-nous sur le récit de visites spéléologiques [V. Duseign, comm. pers., 2013]. L'exhaure de l'ardoisière a pris fin en novembre 2004. Lors d'une visite un an plus tôt, alors

que l'ardoisière était toujours accessible, la pompe était située à 168m de profondeur. Voici comment le spéléologue la décrit dans un email :

« J'avais été étonné de son [la pompe] très très très très faible dimensionnement, étant habitué aux pompes des mines de fer de Lorraine. Ces dernières, machinerie comprise, font 2 mètres cube. [...] Ce n'était pas ce modèle là [voir figure 4.30, originalement joint à l'email], mais franchement une pompe ayant un aspect "bricolage du dimanche"... ».



FIGURE 4.30: Pompe similaire à celle de Martelange

Tout permet d'espérer des infiltrations d'eau nettement inférieures à celles du charbonnage de Gosson-Kessales, et ce malgré le passage d'une rivière, la Sûre, au dessus même de l'ardoisière. Ceci s'explique par la bonne imperméabilité de la roche en présence.

Suite à l'arrêt des machines d'exhaure, une expédition eu lieu en avril 2005, avant que la mine ne se remplisse considérablement d'eau. Le niveau estimé est alors donné entre 112 et 130m de profondeur.

En 5 mois, entre novembre 2004 et avril 2005, c'est-à-dire en 150 jours, le niveau d'eau est donc remonté d'environ 40m, ce qui correspond à $100.000m^3$. Les venues d'eau moyennes peuvent donc être estimées à :

$$Q = \frac{100.000}{150} = 667 \frac{m^3}{jours} = 30 \frac{m^3}{h}$$

Si la centrale fonctionne à raison d'un cycle par jour, un volume de $700m^3$ est à évacuer en plus chaque jour par cycle. Si elle fonctionne à raison d'un cycle par semaine, ce volume supplémentaire sera de $5000m^3$. Ce qui correspond à une perte de 0,5 à 5% par rapport aux $100.000m^3$ représentés par un cycle de pompage-turbinage. L'objectif de la centrale étant de fonctionner le plus souvent possible, on se rapprochera plus de 0,5% que 5% dans les faits.

Notons qu'en 2012, des spéléo-plongeurs ont effectué un repérage pour une plongée au sein de l'ardoisière [I. Klerks, comm. pers., 2013]⁵. La plongée ne s'est (pas encore) concrétisée à cause d'interdictions communales, mais ils ont constaté que le niveau d'eau actuel se situe à 10m de profondeur. L'ardoisière est donc entièrement remplie d'eau.

4.2.3 Faisabilité économique et conclusion

Malgré une étude plus poussée sur la stabilité des parois indispensable, nous l'avons signalé, un projet de STEP minier semble techniquement rentable sur le site de l'ardoisière de Martelange. C'est pourquoi il est intéressant, maintenant, de se poser la question de la faisabilité économique.

Pour être économiquement intéressante, la centrale proposée doit être compétitive avec les alternatives existantes. C'est-à-dire que le coût d'investissement au MégaWatt installé doit être, au maximum, du même ordre de grandeur que celui correspondant à un système de pompage turbinage de surface. Voici les montants estimés de trois installations :

- Coö : 720-800Mio€ pour 1100MW [Anonyme, 2005] [L. François, comm. pers. 2013] ;
- Vianden : 150Mio€ pour 200MW (11^e turbine en cours de construction) [SEO, 2013] ;
- Project fictif à Couvin : 1,2Mio€ pour 2MW (2011) [Hendrick *et al.*, 2011].

Les montants varient donc entre 0,6 et 0,8 Mio€/MW. Il est donc indispensable de limiter l'investissement en dessous de ces valeurs pour que le projet soit économiquement intéressant.

Comme nous l'avons vu pour le charbonnage de Gossons-Kessales, le rendement d'un STEP minier se distingue de celui d'un STEP conventionnel suite à deux facteurs : les eaux d'infiltration et l'utilisation de nouvelles technologies.

- Pour les systèmes « caverne » ou à « large puits » pour lesquels le facteur « nouvelles technologies » est sans effet, un rendement global de 75% a été choisi. Il correspond à un rendement faible d'un STEP conventionnel. Le fait de choisir la valeur minimale permet de considérer la diminution de rendement due aux infiltrations d'eau. Rappelons que ces infiltrations sont faibles dans le cas de l'ardoisière de Martelange. Le rendement utilisé pour le calcul de la puissance, concernant le mode turbinage, est lui de 88%.
- Pour les systèmes « compact », les rendements peuvent chuter suite à l'utilisation d'une technologie de transmission d'énergie. Ils seront arbitrairement estimés à 65% pour le rendement global, et 78% pour le rendement en mode turbine.

5. Echange de courriers électroniques avec ce spéléo-plongeur.

Notons que l'analyse basée sur la comparaison des prix au MW n'est valable que si les rendements sont identiques. Dans le cas inverse (c'est à dire pour les systèmes compacts), l'étude est plus complexe. Il faudrait en effet étudier la période de retour sur investissement, ce qui implique de connaître les recettes.

La figure 4.31 représente différents cas possibles d'installation d'une centrale. Le nombre de cas possibles est bien sûr très important. Les cas 1 et 2 concernent une caverne classique, les cas 3 et 4 un système compact et le cas 5 un large puits. En ce qui concerne les cavernes classiques et le large puits, nous profiterons de la topographie en positionnant le réservoir supérieur sur la colline. Ce choix se justifie par le fait que pour ces cas, les investissements sont plus grands, et il faut donc maximiser les puissances pour amortir plus rapidement ces investissements.

En ce qui concerne les systèmes compacts, les investissements sont plus faibles, et pour les limiter davantage, il n'est peut être pas judicieux d'utiliser le dénivelé supplémentaire offert par la colline. Le fait d'utiliser la colline augmenterait les puissances mobilisables, mais du coup aussi la taille du système. Pour faciliter l'installation, il est intéressant de garder une petite taille. Cependant il faudra prendre en compte le passage de la Nationale 4, ainsi que des quelques maisons du village de Martelange qui sont situées au dessus de l'ardoisière. Le réservoir supérieur, ne peut donc pas se situer juste au dessus du réservoir inférieur. Une partie de la galerie d'aération peut être utilisée à cette fin.

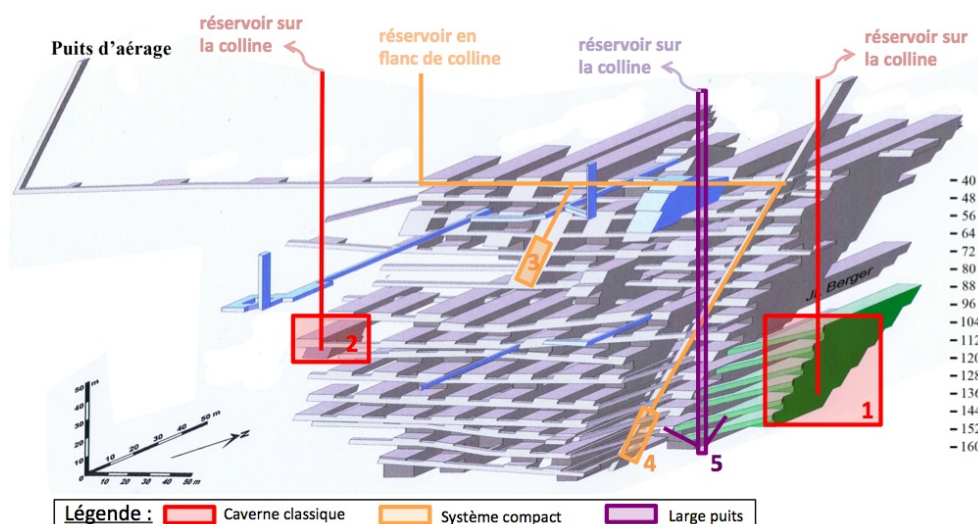


FIGURE 4.31: Différents cas possibles

Les données géométriques de chaque cas sont données dans la table 4.4. En particulier,

s'y retrouve le rapport L/H , c'est-à-dire la distance horizontale entre les réservoirs (L), et la hauteur de chute (H). Pour chacun des cas, l'énergie, ainsi que la puissance et le débit pour une durée de turbinage de 3h, ont été calculés. Ils sont repris dans la table 4.5. Notons que l'altitude du puits d'extraction, c'est-à-dire le point à partir duquel est calculée la profondeur du bassin inférieur, est de 370m.

N°	Volume [m ³]	Bassin supérieur		Bassin inférieur		Hauteur de chute [m]				L/H [-]
		Alt. [m]	H [m]	Prof. [m]	H [m]	max	min	diff	moy	
1	100.000	475	10	150	40	255	205	50	230	2,2
2	100.000	475	10	110	40	215	165	50	190	2,6
3	100.000	390	10	80	40	100	50	50	75	1,1
4	100.000	390	10	150	40	170	120	50	145	1,2
5	100.000	475	10	150	40	255	205	50	230	2,2

TABLE 4.4: Différents cas - données géométriques

Num.	Energie	Puissance (pour t=3h)	Q (pour t=3h)
	[MWh]	[MW]	[m ³ /s]
1	47	13,8	9,3
2	39	11,4	9,3
3	13	3,5	9,3
4	26	6,7	9,3
5	47	13,8	9,3

TABLE 4.5: Différents cas - énergies, puissances et débits

Tentons de donner un ordre de grandeur de prix pour voir si la limite financière est envisageable. Concernant les cas de type compact, il est difficile d'aller plus loin dans la faisabilité économique. En effet, on ne connaît ni le rendement propre au système de transmission et de sa mise en oeuvre, ni les coûts d'investissement d'un tel système. Choisissons dès lors le cas numéro 5, celui reposant sur un puits large. C'est en effet le projet le plus indépendant de l'état de l'ardoisière, et donc le projet le moins aléatoire.

Etant donné que les montants des projets de référence varient entre 0,6 et 0,8 Mio€/MW, l'investissement total ne doit pas dépasser $13,8 * 0,7 \simeq 10 \text{ Mio€}$ pour le cas numéro 5.

Voici différents postes importants auxquels il faut penser dans ce cas :

- construction du réservoir supérieur,
- construction du puits,
- aménagement du puits + jonction avec le réservoir,
- pompes / turbines + machines électriques,

– connexion au réseau électrique.

Le vidage de l'ardoisière avant les travaux peut, le cas échéant, être rajouté, mais la technique utilisée (voir plus loin) pour creuser le nouveau puits pour placer les machines, ne nécessite peut être pas le vidage préalable. La technologie utilisée incluant son propre système de pompe.

Comme nous le verrons plus loin, la construction du puits représente une somme conséquente. Il est donc important de minimiser sa taille. Pour se faire, il faut connaître la taille des turbines que nous allons devoir utiliser. Au vu de la hauteur de chute et du débit et au vu de la figure 3.8 page 64, le choix de deux turbines Francis de 7MW semble intéressant. En utilisant les deux turbines en même temps, on peut ainsi produire une puissance de $2 * 7MW$ pendant 3h, alors qu'en pompage, une seule des deux turbomachines peut être utilisée, nécessitant approximativement (sans prendre en compte le rendement) 7MW pendant 6h. La taille de la roue d'une turbine Francis équivaut environ au diamètre de la conduite [S. Verraes, comm. pers., 2013]. Or, étant donné que la turbine nécessite une bache spirale (voir figure 4.32) on peut estimer la taille totale de la turbine à 2,5 fois le diamètre de la conduite.

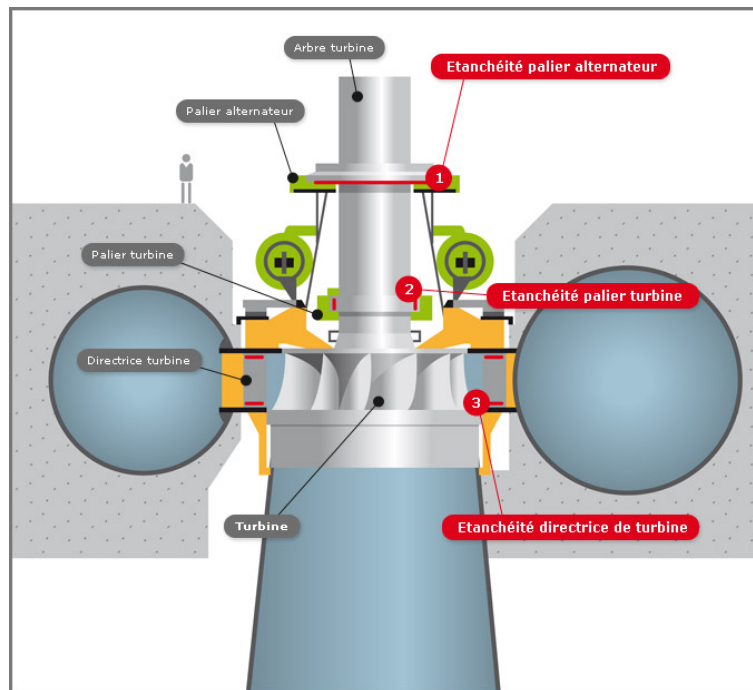


FIGURE 4.32: Turbine Francis [pxl Industries, 2013]

Or, en appliquant la formule vue au chapitre 3.5, il vient : $D = 0,90m$ pour les conduites

de chacune des deux turbines. La place nécessaire aux turbomachines peut donc être estimée à un disque de 2,5m de diamètre. En ajoutant une zone de manipulation et en comptant deux turbines, on peut donc considérer un puits de 8m de diamètre. Les alternateurs et autres machines peuvent être placés à des étages supérieurs.

La table 4.6 reprend les coûts approximatifs du cas 5. Le montant total obtenu de 9,9Mio€, est légèrement inférieur au montant de 10Mio€ calculé précédemment. Ce qui, en première approche, permet de conclure à une rentabilité économique du système. Remarquons cependant que la marge est faible entre la limite de rentabilité théorique et cette approche qui concerne un projet à caractère novateur dont toutes les caractéristiques ne sont pas maîtrisées.

n°	Postes de coût	unité	quantité	Prix unitaire de référence [€/unité]	prix total [€]	Source des informa- tions
1	Réservoir supérieur	m^3	100.000	20	2.000.000	[1]
2	Conduites	m^{ct}	700	150	105.000	[1]
3	Puits					
	installation	fft	1	500.000	500.000	[2]
	réalisation	m^3	8000	350	2.800.000	[2]
4	Pompes/turbines + machines électriques	MW	14	160.000	2.200.000	[1]
5	Connexion au réseau électrique					[3]
	Branchement et comptage	fft	1	100.000	100.000	
	Droit de prélèvement	KVA	14.000	5,7	80.000	
	Câble	m	1600	200	320.000	
6	Aménagements divers	fft	1	500.000	500.000	[4]
7	Acquisition					
	ardoisière	fft			200.000	[5]
	terrain du réservoir supérieur	m^2	20.000	10	200.000	[6]
	Sous-total				9.005.000	
7	Imprévus divers (10%)				900.500	[5]
	Total				9.905.500	

TABLE 4.6: Coûts approximatifs du cas 5

Commentons rapidement les ordres de grandeur de prix et la source des informations de la table 4.6.

- [1] estimation par comparaison avec le document « Le stockage d'énergie par pompage/turbinage en région wallonne » [Hendrick *et al.*, 2011]. Notons que le réservoir supérieur est constitué de plaques de béton préfabriquées ;
- [2] utilisation d'une technologie développée par l'entreprise Herrenknecht (représentée à la figure 4.33). Remise de prix pour un puits de 8m de diamètre et de 160m de profondeur [S. Viroux, comm. pers., 2013]⁶ ;
- [3] estimation du prix de la connection au réseau électrique calculé avec B. Feye, ingénieur chez ORES [B. Feye, comm. pers., 2013]. Ce prix dépend fortement de la distance entre la centrale de pompage-turbinage et le poste électrique auquel il faut se brancher. La distance actuelle est de 16 km, cependant il est fort probable qu'à l'avenir il soit possible de se relier directement au réseau et non au poste. La distance de 1,6 km a été choisie arbitrairement dans ce sens ;
- [4] estimation faite à partir d'informations reçues au bureau Greisch le 23 mai 2013 [C. Counasse, comm. pers., 2013] ;
- [5] estimation à confirmer ;
- [6] prix au m^2 de terrain agricole constaté dans la région.

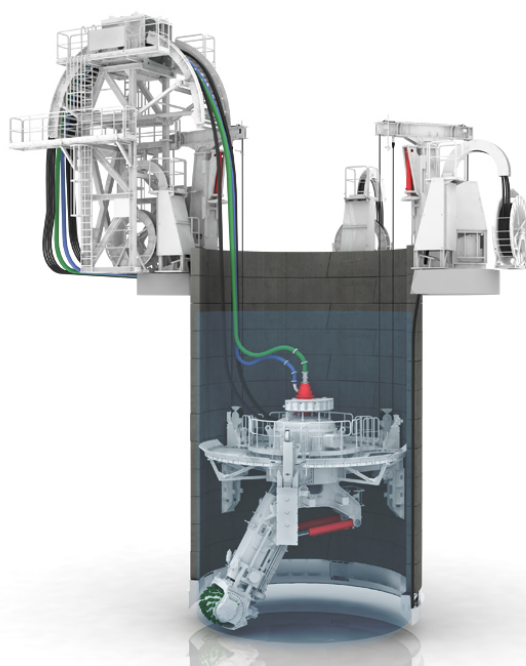


FIGURE 4.33: Vertical Shaft Sinking Machine (VSM) [Herrenknecht, 2013]

Au vu de ces résultats, nous pouvons en conclure qu'il serait intéressant de pousser

6. Remise de prix rapide et sans garantie effectuée avec un ingénieur de chez Galère le 24 mai 2013.

l'étude plus loin. Cette étude approfondie devra autant être d'ordre technique (stabilité des chambres et des phénomènes hydrodynamiques) que d'ordre économique. Dans le cadre de ce travail, nous n'avons effectué l'approche économique que dans l'hypothèse d'un système par puits large. Ce cas n'est peut être pas le plus intéressant financièrement. Les systèmes compacts permettraient peut-être de baisser significativement les coûts d'investissements, au dépens d'un rendement plus faible. Ou encore, un système de type « caverne » avec construction de puits un peu moins profonds et de plus petits diamètres demanderait peut-être moins d'investissement pour des puissances comparables. Rappelons aussi que nous avons considéré un volume de $100.000m^3$ sur un volume total de $300.000m^3$. Une étude plus poussée pourrait déterminer l'optimum, entre perte de rendement des turbomachines due au ΔH du réservoir, et augmentation d'énergie stockable, pour obtenir une plus grande puissance.

Il ne faut pas perdre de vue que chaque cas est différent. Le système par large puits, que nous venons d'étudier, demande un investissement assez lourd. Les puissances mobilisables doivent donc être assez importantes pour pouvoir rentabiliser cet investissement. Cette méthode n'est donc pas transposable à toutes les ardoisières.

Ajoutons enfin, que l'ardoisière de Martelange est unique en Belgique. Elle ne présente pas vraiment la morphologie des autres ardoisières. C'est la plus grande ardoisière belge, et une colline est disponible à proximité. La technique d'exploitation y était légèrement différente. Son puits d'extraction, large, permettait en effet de remonter des blocs entiers de roche ; à l'ardoisière de Warmifontaine (une des plus grandes) par exemple, il était indispensable de déjà effectuer une première découpe au sein de l'ardoisière avant de remonter des blocs plus petits. Ce découpage en profondeur impliquait un certain nombre de déchets, qui étaient stockés dans les chambres déjà exploitées. Les volumes vides y sont donc beaucoup moins importants.

Chapitre 5

Conclusion

Dans le cadre actuel de développement intensif de l'exploitation des énergies renouvelables, la problématique du stockage temporaire d'une énergie produite de façon variable au cours du temps, en déconnection de la demande, est un véritable défi.

Une chose est sûre, le stockage de l'électricité est un enjeu pour l'avenir. Des investissements devront être menés en ce sens. Ceci se confirme par la très récente décision du gouvernement belge, qui vient de donner son feu vert pour la construction d'un atoll énergétique dans la mer du Nord [Belga, 2013], permettant de gérer la fluctuation de production des éoliennes offshore et dont j'ai parlé dans la table 2.2 page 50.

Mais quelle technologie faut-il utiliser ? Quelle sera la période de retour sur investissement ? De combien de MWh parle-t-on ? Faut-il des systèmes locaux, globaux, ou les deux ? De nombreuses questions sont posées, et il va falloir y répondre très vite.

Le marché de l'électricité est très complexe, et il n'est pas évident de prédire les bénéfices générés par un système de stockage et donc leur rentabilité économique. En plus de la complexité des modes de rémunération qu'il faut combiner, il faut prendre en compte l'évolution du réseau dans le temps. La période de retour sur investissement d'une centrale par pompage-turbinage étant de plusieurs dizaines d'années, il est important de prendre en compte cette évolution. Une étude stochastique sur les besoins actuels et futurs du réseau électrique semble donc importante, pour pouvoir au mieux concevoir ces centrales de stockage. On rentre ici dans le domaine des « smart grids », c'est à dire des réseaux intelligents, et ce ne sont peut être pas les stockages de grandes capacités qui seront la solution, mais peut être un très grand nombre de stockages de petites capacités, voire de très petites capacités, comme par exemple les nombreuses batteries des voitures électriques ou hydrides qui pourraient se recharger intelligemment lorsque la consommation n'est pas très élevée au regard de la production.

Il semble cependant important de faire cohabiter plusieurs technologies de stockage, afin de bénéficier des avantages des unes et des autres. La question ne se résume pas à un déphasage dans le temps de la demande, mais aussi à l'équilibrage des réseaux, à la congestion de certaines lignes, à l'adaptation du réseau aux nouveaux moyens de productions, ...

Le présent travail de fin d'études a étudié la faisabilité technico-économique d'un système de pompage-turbinage exploitant d'anciennes galeries minières (STEP minier), ou plus exactement, utilisant d'anciennes cavités souterraines, qu'elles soient des mines ou des carrières, comme réservoir inférieur.

Le sous-sol belge regorge de cavités abandonnées. Elles ne sont cependant pas toutes propices à l'installation d'un STEP minier. Il s'avère que les deux principaux types de cavités pouvant convenir sont d'une part les charbonnages profonds, et d'autres part les ardoisières ou autres carrières souterraines. Chacune de ces cavités ont des caractéristiques particulières, des avantages et des inconvénients et constituent chacune un cas d'espèce unique dont le moindre problème n'est pas de disposer d'informations fiables sur leur topographie, leur constitution exacte, leur état ou leur situation hydrogéologique. Ces informations sont pourtant indispensables à l'évaluation de leur capacité intrinsèque à se transformer en STEP minier rentable.

En outre, pour diminuer les coûts d'investissement importants, différentes méthodes ont été proposées. Tout d'abord un système par large puits, où la caverne accueillant les turbomachines est le fond d'un puits, plus large que ceux d'antan. Ensuite un système compact, délocalisant les machines électriques en surface et nécessitant un système de transmission de l'énergie, ou encore un système « tout en un » avec des machines électriques directement couplées au turbomachine, le tout immergé dans le fond du puits. Ce système compact permettrait de maximiser la sécurité (aucun homme ne doit plus redescendre dans le puits, une fois celui-ci construit), et de diminuer les investissements, vu que le puits aurait une taille plus petite. Par contre la maintenance serait plus compliquée, étant donné qu'il faudrait remonter les machines à la surface pour les entretenir. Ces systèmes compacts n'existent pas encore à l'heure actuelle, mais seraient une piste intéressante pour diminuer les investissements dans le futur. Un système beaucoup moins onéreux permettrait aussi de mettre à profit des cavités ayant une capacité de stockage moindre. A l'heure actuelle, au vu des investissements nécessaires, des cavités souterraines de grandes dimensions sont indispensables pour amortir raisonnablement l'investissement.

Deux cas particuliers ont été étudiés. Dans un premier temps, une étude technique a été faite sur le charbonnage de Gosson-Kessales. Il en ressort que les différents problèmes, d'éboulement, d'érosion, de stabilité, ne devraient pas être un réel frein à la réalisation d'un tel projet. Les processus hydrodynamiques n'ont pas réellement été étudiés, mais la configuration a été choisie de façon à minimiser leurs aspects parasites, c'est-à-dire avoir un volume le plus compact possible. Cet aspect demanderait cependant une étude plus poussée, mais ces problèmes semblent surmontables.

Le réel frein à ce projet concerne les infiltrations d'eau naturelles dues au rabattement de la nappe. Dans le cadre du charbonnage étudié, elles semblent bien trop importantes pour ne pas avoir d'impact conséquent sur le rendement global. Il est donc primordial de s'intéresser directement à cet aspect lors du choix d'un site, et donc de ne pas systématiquement privilégier les galeries les plus profondes.

D'autre part, une étude sur le site de l'ardoisière de Martelage, a montré une rentabilité économique sans doute plus sûre. Partant du principe que les problèmes techniques n'étaient pas un réel frein à la réalisation d'un tel projet dans le cadre des charbonnages, ce principe a été transposé à l'ardoisière. Cependant, nous rappelons qu'une étude plus poussée sur la stabilité des parois suite au cycle de charge-décharge du réservoir, est indispensable pour éviter une catastrophe ! L'aspect d'infiltration d'eau, lui, était très bon dans le cadre de l'ardoisière, avec une perte de rendement de l'ordre de 1%, comparé au 30% dans le cas du charbonnage. L'étude économique montre que l'investissement au MégaWatt du projet est d'un ordre de grandeur similaire aux projets actuels. Relativisons tout de même, en signalant que ce type de projet n'a encore jamais été réalisé, les inconnues sont donc plus nombreuses. Dans le budget annoncé, les suppléments dus aux caractères novateurs et aléatoires ne sont pas pris en compte. On a cependant vu qu'en cas de bonne stabilité des parois, il serait possible d'augmenter la puissance de la centrale pour un investissement pratiquement identique.

Les systèmes alternatifs, comme par exemple le système « compact », pourrait permettre aussi une diminution des montants d'investissement par MégaWatt, mais le rendement du système serait lui plus faible. Une approche économique serait donc intéressante, afin de déterminer l'optimum entre diminution des investissements, et diminution du rendement. Mais ces systèmes « compacts » ne sont aujourd'hui qu'une idée que je lance, aucun développement technique poussé dans ce sens n'ayant été mené, à ma connaissance, jusqu'aujourd'hui.

A l'avenir, un STEP minier semble donc être une alternative valable dans le domaine de stockage de l'énergie électrique. Il semble important de concentrer les recherches dans

les quatre directions suivantes :

- une étude de smart grids pour connaître exactement les besoins nécessaires du réseau ;
- les analyses documentaires, mesures et essais nécessaires pour caractériser avec précision le patrimoine minier existant et donc son potentiel de stockage énergétique rentable ;
- une étude technique des phénomènes hydrodynamiques des écoulements en galerie, en lien direct avec le phénomène d'érosion et de stabilité du réservoir ;
- le développement de système « compact », permettant de diminuer la taille de ces centrales, et ainsi réduire l'investissement qu'elles représentent.

Bibliographie

- [Anonyme, 2005] ANONYME (2005). Le pompage-turbinage : une solution efficace pour suivre la demande énergétique. *Renouvelle*, 13. http://www.apere.org/manager/docnum/doc/doc396_1304-le_pompage_turbinage.pdf, consulté le 22/05/13.
- [Anonyme, 2013] ANONYME (2013). *Hydroélectricité : stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)*. Fondation d'entreprise ALCEN pour la Connaissance des énergies. <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite-stations-de-transfert-d-energie-par-pompage-step>, consulté le 22/05/13.
- [Barnes, 2011] BARNES, F. S. (2011). *Large energy storage systems handbook*. CRC PressI Llc.
- [Beguín et Corhay, 2011] BEGUIN, M. et CORHAY, M. (2011). *Etude de marché sur les opportunités du stockage dans les systèmes électriques en Région wallonne*. Cluster Technologie Wallonne Energie - Environnement et Développement durable asbl (TWeeD).
- [Belga, 2013] BELGA (2013). *Le plan de création d'un "atoll énergétique" en mer du Nord est à flot*. RTBF. http://www.rtbef.be/info/belgique/detail_le-plan-de-creation-d-un-atoll-energetique-en-mer-du-nord-est-a-flot?id=8002569, consulté le 26/05/13.
- [Bossut, 2002] BOSSUT, H. (2001-2002). Paramètres géologiques et hydrogéologiques de la remontée de la nappe aquifère en mines abandonnées. identification des problèmes de sécurité. le cas de l'ancien stockage de gaz naturel de péronnes. Mémoire de D.E.A., Faculte polytechnique de Mons, Belgique.
- [Caubergs, 1991] CAUBERGS, M. (1991). *Inventaire de quelques anciennes mines et carrières souterraines de Wallonie : essai d'archéologie minière*. <http://tchorski.morkitu.org/13/michel-caubergs.htm>, consulté le 22/05/13.

- [Couret, 2011] COURET, S. (2011). *Guide AquaTerra des solutions douces pour l'aménagement des lacs et cours d'eau*. AquaTerra. http://www.aquaterra-solutions.fr/pdf/guides_ats/GUIDEATS-CHAP2.pdf, consulté le 22/05/13.
- [Demarles, 2009] DEMARLES, A. (2009). *Schéma d'un siège d'exploitation minière 1*. Skyrock. <http://andredemarles.skyrock.com/2414744781-Schema-d-un-siege-d-exploitation-miniére-1.html>, consulté le 22/05/13.
- [Denayer et al., 2011] DENAYER, J., PACYNA, D. et BOULVAIN, F. (2011). *Le minerai de fer en Wallonie : cartographie, historique et géologie*. Région Wallonne.
- [Duseigne, n d] DUSEIGNE, V. (n. d.). *Patrimoine industriel, civil, souterrain et religieux*. <http://tchorski.morkitu.org/>, consulté le 22/05/13.
- [ELIA, 2013a] ELIA (2013a). *Achats d'énergie*. ELIA. <http://www.elia.be/fr/fournisseurs-et-contractants/categories-d-achat/achats-d-energie>, consulté le 22/05/13.
- [ELIA, 2013b] ELIA (2013b). *Elia un monde plein d'énergie*. ELIA. <http://www.elia.be/~media/files/Elia/publications-2/brochures/elia%20un%20monde%20plein%20denergie.pdf>, consulté le 22/05/13.
- [ELIA, 2013c] ELIA (2013c). *Qui sommes-nous*. ELIA. <http://www.elia.be/fr/a-propos-elia/qui-sommes-nous>, consulté le 22/05/13.
- [ENEA-Consulting, 2012] ENEA-CONSULTING (2012). *Le stockage d'énergie : Enjeux, solutions techniques et opportunités de valorisation*. ENEA-Consulting, 89, rue Réaumur 75002 Paris, France.
- [Erren, 2011] ERREN, H. (2011). *Carte des zones de mines de charbon en Belgique, Pays-Bas, l'Allemagne et Nord de la France*. Wikipedia. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CoalDNLBF.png>, consulté le 22/05/13.
- [Eyer et Corey, 2010] EYER, J. et COREY, G. (2010). *Energy storage for the electricity grid : Benefits and market potential assessment guide*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico and Livermore, California. <http://www.sandia.gov/ess/publications/SAND2010-0815.pdf>, consulté le 22/05/13.
- [gouvernement wallon, 2013] gouvernement WALLON (2013). *Le gouvernement wallon adopte le nouveau cadre de référence éolien*. Gouvernement de la Fédération Wallonie-Bruxelles, Philippe Henry, Ministre de l'Environnement, de l'Aménagement du territoire et de la Mobilité. <http://henry.wallonie.be/Eolien>, consulté le 22/05/13.

- [Groussier, 2012] GROUSSIER, J. (2012). *Turbines*. Hydroweb. http://hydroweb5.free.fr/hydroweb.php?page=deb_turbine.php, consulté le 22/05/13.
- [Hendrick *et al.*, 2011] HENDRICK, P., WATTEEUW, O. et BERGERON, K. (2011). *Le stockage d'énergie par pompage/turbinage en région wallonne*. Université Libre de Bruxelles, Belgique.
- [Herrenknecht, 2013] HERRENKNECHT (2013). *Vertical Shaft Sinking Machine VSM*. Herrenknecht. <http://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling-pipelines/vertical-shaft-sinking-machine-vsm.html>, consulté le 22/05/13.
- [Hirsch, 2007] HIRSCH, C. (2007). *Numerical computation of internal and external flows : the fundamentals of computational fluid dynamics*, volume 1. Butterworth-Heinemann.
- [Huart (dir.), 2013a] HUART (DIR.), M. (février 2013a). Belgique : le développement éolien en 2012. *Renouvelle*, 51. <http://www.apere.org/doc/Renouvelle51.pdf>, consulté le 22/05/13.
- [Huart (dir.), 2013b] HUART (DIR.), M. (février 2013b). Du pompage/turbinage sur le canal albert et la meuse. *Renouvelle*, 51. <http://www.apere.org/doc/Renouvelle51.pdf>, consulté le 22/05/13.
- [Huart (dir.), 2013c] HUART (DIR.), M. (février 2013c). Une île pour stocker l'énergie éolienne en mer du nord. *Renouvelle*, 51. <http://www.apere.org/doc/Renouvelle51.pdf>, consulté le 22/05/13.
- [ICEDD, 2013] ICEDD (2013). *185 000 kilomètres de lignes pour transporter et distribuer l'électricité*. ICEDD. <http://www.icedd.be/atlasenergie/pages/atlas.asp?article=fteltx01>, consulté le 22/05/13.
- [Laforest et Jalliffier-Verne, n d] LAFOREST, M. et JALLIFFIER-VERNE, I. (n. d.). *Applications des mathématiques : La loi de Darcy*. Ecole polytechnique Montréal, Canada. <http://www.genie-des-maths.polymtl.ca/exemple.php?no=95>, consulté le 18/05/13.
- [Loriaux, 1989] LORIAUX, F. (1989). Etude de faisabilité d'une centrale d'accumulation par pompage dans un site houiller de campine. Mémoire de D.E.A., Université de Liège, Belgique.
- [Magnan, 1999] MAGNAN, J.-P. (1999). L'eau dans le sol. *Techniques de l'ingénieur*.

- [Magnan, 2004] MAGNAN, J.-P. (2004). *International symposia on the identification and determination of soil and rock parameters for geotechnical design, on shallow foundations and on ground improvement*, volume 2. Presses Ponts et Chaussées.
- [Megnint et al., 2008] MEGNINT, L., VERDURAND, G. et REY, R. (2008). Turbines hydrauliques : Description et fonctionnement. *Techniques de l'ingénieur*.
- [Oury et Oury, 1990] OURY, C. et OURY, F. (1990). *Machines hydrauliques*. I.S.I. Gramme et Université de Liège, Angleur.
- [Pacyna et Denayer, 2010] PACYNA, D. et DENAYER, J. (2010). *Mines, minières et carrières souterraines en Wallonie–Risques associés et contraintes*. SPW, DGARE, Département de l'Environnement et de l'Eau, Direction des Risques industriels, géologiques et miniers, Cellule Sous-sol/Géologie.
- [parc naturel de l'Our, 2013] parc naturel de L'OUR (2013). *Vianden et sa région*. Grand-Duché de Luxembourg.
- [Ploye, 2013] PLOYE, F. (mai 2013). Peu de techniques déjà opérationnelles. *Le cahiers techniques du bâtiment*, 324.
- [Ponsot-Jacquín et Bertrand, n d] PONSOT-JACQUIN, C. et BERTRAND, J.-F. (n. d.). Les technologies actuelles de stockage et leur état de maturité. *IFP Energies nouvelles*. <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/espace-decouverte/les-cles-pour-comprendre/le-stockage-massif-de-l-energie/les-technologies-actuelles-de-stockage-et-leur-etat-de-maturite>, consulté le 22/05/13.
- [Pummer, 2013] PUMMER, E. (2013). Energiespeicherung durch pumpspeicherkraftwerke. In *RWTH Aachen University*.
- [pxl Industries, 2013] pxl INDUSTRIES (2013). *Turbine Francis*. pxlseals. http://www.pxlseals.com/site_fr/index.php/turbine-francis/, consulté le 25/05/13.
- [région wallonne, n d] région WALLONNE (n. d.). La centrale hydroélectrique de la plate taille. *Région wallonne*. http://services-techniques.met.wallonie.be/fr/voies_hydrauliques/la_centrale_hydroelectrique/, consulté le 22/05/13.
- [Santinelli, 1994] SANTINELLI, S. (1994). *Les ardoisières de Warmifontaine [vidéo]*. Cultura Europa, Promotion Art et Culture asbl. (19 min. 25 sec.). http://www.culturaeuropa.be/patrimoine/les_ardoisieres_de_warmifontaine.html, consulté le 22/05/13.

- [SEO, 2013] SEO (2013). *Adjudication - Calendrier - Coûts*. Société Electrique de l'Our. <http://www.seo.lu/fr/Activites-principales/Projet-machine-11/Adjudication-Calendrier-Couts>, consulté le 22/05/13.
- [SHEMA, 2010] SHEMA (2010). *Dimensionnement des Turbines*. Lycée Chevrollier. <http://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/767/767-dimensionnement-des-turbines.pdf>, consulté le 22/05/13.
- [SPW, 2013a] SPW (2013a). *Annexe 3 - Carte des lots croisée avec la carte des zones favorables*. Service Public de Wallonie. <http://henry.wallonie.be/sites/default/files/nodes/story/4900-1annexe328fev2013.pdf>, consulté le 22/05/13.
- [SPW, 2013b] SPW (2013b). Les thématiques du sous-sol wallon. *Service Public de Wallonie*. <http://carto1.wallonie.be/CIGALE/viewer.htm?APPNAME=SSOL&APPMODE=VIEWER>, consulté le 22/05/13.
- [SPW, 2013c] SPW (2013c). Tout savoir sur l'énergie éolienne en wallonie. *Service Public de Wallonie - DGO4*. <http://www.eolien.be/node/95>, consulté le 22/05/13.
- [Stassen, 1966] STASSEN, J. (1966). *Cours d'exploitation des mines. 3eme fascicule : la securite et l'hygiene : l'aerage, l'exhaure, l'e*. Université de Liège, Belgique.
- [Stassen, 1986] STASSEN, P. (1986). *Soutènement des galeries*. Université de Liège, Belgique.
- [Vaille, 2010] VAILLE, C. (2010). Stockage d'énergie : des centrales de pompage-turbinage souterraines. *Ambassade allemande en france*. www.science-allemande.fr/fr/actualites/energie/energies-renouvelables/stockage-denergie-des-centrales-de-pompage-turbinage-souterraines/, consulté le 22/05/13.