



Valorisation économique d'un système de stockage gravitaire d'énergie électrique placé en carrière immergée

Travail de Fin d'Études
réalisé dans le cadre de l'obtention du diplôme d'Ingénieure Civile en Électricité à finalité spécialisée en Énergie Électrique.

Chloé PONSART



Sous la direction de Monsieur le Professeur Ir François VALLÉE,
de Monsieur Dr Ir Jean-François TOUBEAU
Et de Monsieur Ir Christophe STEVENS

Juin 2019

Remerciements

Mes promoteurs, Monsieur François Vallée et Monsieur Jean-François Toubreau, pour le suivi tout au long du projet et les conseils de rédaction.

Monsieur Christophe Stevens pour ce projet passionnant, le suivi, et son expérience industrielle du sujet.

Monsieur Gregory Coussement pour l'aide concernant les parties concernant la mécanique des fluides.

Monsieur Pascal Goderniaux pour sa connaissance et son expérience concernant les carrières belges.

Table des matières

Introduction	5
1 Contexte	7
2 Modélisation du système	10
2.1 Fonctionnement du système	11
2.2 Méthodologie de choix de matériaux	13
2.2.1 Définition des paramètres du système	14
2.2.2 Étude théorique du système	14
2.2.2.1 Étude des différents efforts agissant sur un bloc	14
2.2.2.2 Étude de la dynamique du système	16
2.2.2.3 Etude de la puissance du système	18
2.2.2.4 Étude de l'énergie totale stockable dans le système	18
2.2.3 Comparaison des différents matériaux potentiellement utilisables	19
2.2.3.1 Étude du coefficient de traînée	20
2.2.3.2 Étude de la traînée	22
2.2.3.3 Matériaux potentiels	22
2.3 Caractérisation des paramètres du système	24
2.4 Description du système	28
2.4.1 Composants du système	28
2.4.1.1 Moteur	28
2.4.1.2 Réducteur	28
2.4.1.3 Variateur de vitesse	28
2.4.1.4 Transformateur	29
2.4.1.5 Divers	29
2.4.2 Configuration complète du système	30
2.5 Conclusion	31
3 Étude de la valorisation économique du système de stockage gravitaire via l'amélioration de l'auto-consommation d'un consommateur-	

producteur	33
3.1 Coût du système de stockage gravitaire	34
3.1.1 CAPEX	34
3.1.2 OPEX	36
3.1.3 Coût total du système	36
3.2 Revenus du système	37
3.2.1 Étude de rentabilité avec production de type photovoltaïque . . .	37
3.2.2 Entreprise A	38
3.2.3 Entreprise B	43
3.2.4 Étude similaire avec production de type éolien	44
3.3 Conclusion	44
4 Valorisation de la station de stockage via un processus d'arbitrage sur les marchés de l'électricité	46
4.1 Arbitrage de stockage ou de déstockage en fonction d'un prix fixé	46
4.2 Optimisation de stockage ou de déstockage en fonction du prix de marché	49
4.3 Conclusion	51
5 Conclusion	52
A CES EduPack	55
B Codes Julia (Python)	56
B.1 Algorithme 1	56
B.2 Algorithme 2	57

Introduction

Le principe de fonctionnement du système de stockage d'énergie sous forme gravitaire qui est développé tout au long de ce travail a été imaginé et breveté par Christophe Stevens de la société SinkFloat Solutions. Monsieur Stevens a imaginé une solution permettant de stocker de l'électricité sous forme d'énergie gravitaire en exploitant la profondeur de cavités remplies d'eau. Ce système stocke de l'énergie grâce à des blocs solides qui, lorsqu'ils sont amenés à une certaine hauteur, possèdent une énergie potentielle qui peut être restituée par la suite, sous forme d'électricité, si le bloc est ramené à la position zéro.

Au cours de ce travail, le fonctionnement d'un tel système va être étudié en application dans d'anciens sites carriers. Dans un premier temps, après avoir posé le contexte du travail, la modélisation du système est étudiée. De quels matériaux doit être composé pareil système dans le cadre d'application poursuivi ? Quels sont les composants nécessaires et quelles sont les contraintes à prendre en compte pour tenir compte de la dynamique de fonctionnement du système de stockage d'énergie gravitaire ? Au terme de ce chapitre, plusieurs matériaux pouvant composer les blocs peuvent ainsi être sélectionnés. Le but de cette analyse de matériaux vise à offrir un choix entre un matériau conventionnel comme le béton et des matériaux issus de la filière de recyclage comme des gravats. Ce chapitre développe également les composants électriques et physiques qui constituent le système complet ainsi que leur coordination.

Le troisième chapitre se base sur le fonctionnement électrique du système et sa rentabilité pour une entreprise. Grâce aux composants choisis au chapitre précédent, le coût total est calculé, tout en précisant qu'il peut évoluer car certains paramètres compris dans le prix sont variables et offrent donc un système modulable pour une entreprise désireuse d'investir. Ensuite, nous réaliserons une analyse de rentabilité dans le cadre de l'amélioration de l'auto-consommation de deux entreprises possédant des panneaux photovoltaïques (ainsi qu'une variante basée sur l'utilisation de la ressource éolienne). Le but de l'auto-consommation est de diminuer le renvoi de surplus d'énergie renouvelable (au prix du marché de gros) en stockant celle-ci afin de la consommer lorsque la production renouvelable est insuffisante pour couvrir la charge appelée et ainsi éviter de devoir acheter l'électricité manquante au prix du fournisseur (prix du marché de gros auquel

s'ajoutent les coûts de transport ainsi que les différentes taxes et plus-values). Cette auto-consommation est évidemment dépendante du nombre de blocs mis à disposition et des cycles de fonctionnement du système. En augmentant l'auto-consommation, la rentabilité augmente mais le coût d'investissement fait de même, un compromis devant donc être trouvé à ce niveau. En fonctionnant avec des données réelles, des ordres de grandeur de temps de retour sur investissement intéressants (de l'ordre d'une quinzaine d'années) ont pu être mis en évidence pour les différentes entreprises prises en compte.

Le dernier chapitre de ce travail porte sur le développement d'un outil d'aide à la décision lorsque l'unité de stockage est utilisée pour réaliser un arbitrage sur les marchés de l'électricité. Dans ce cas de figure, l'idée est de stocker l'électricité sous forme d'énergie gravitaire lorsque les prix du marché sont bas et de la restituer au réseau quand ces derniers sont élevés. Dans ce contexte, deux formulations sont implantées sous Julia (Python). Le premier algorithme présenté s'appuie sur un stockage à prix fixe. Dans ce cas, l'idée est de stocker quand le prix est inférieur à X , une valeur seuil, et de déstocker dans le cas contraire. Le deuxième algorithme développé n'impose plus aucun prix seuil pour prendre une décision de stockage-déstockage et optimise ce prix seuil en fonction du temps. Cet algorithme offre une meilleure rentabilité.

Les différents chapitres présentés tout au long de ce travail permettent d'évaluer le coût, le fonctionnement et l'intérêt technico-économique d'un système de stockage d'électricité sous forme d'énergie gravitaire. Les algorithmes et les solutions présentées pourraient, à l'avenir, servir d'argument de vente face à des investisseurs potentiels voire même des décideurs politiques afin de favoriser le développement économique et technologique de pareils systèmes de stockage "vert".

Chapitre 1

Contexte

L'électricité telle que nous la connaissons existe depuis moins de deux siècles. Durant ces deux siècles qui ont vu un réel essor technologique, ce secteur a bien évolué. De l'électromagnétisme aux barrages hydroélectriques, il existe une grande quantité de solutions pour la création d'électricité. Parmi ces solutions, les centrales les plus développées aujourd'hui sont des centrales à énergies fossiles. Cette énergie est fiable et très rentable autant énergétiquement parlant qu'économiquement. C'est cette raison qui fait que, encore aujourd'hui, plus de 65% de la production d'électricité en Europe est issue des énergies thermiques et nucléaires.[1]

Cependant, au cours de la dernière décennie, la tendance évolue vers une utilisation d'énergie primaire plus "verte". Les sources d'énergies renouvelables sont par exemple le soleil, le vent, les marées,... Leur principal avantage est que le produit, le "fuel", de ces centrales d'électricité renouvelable est gratuit. La matière première ne coûte rien à l'Humain, le soleil n'envoie pas de facture à la fin du mois. Ces sources d'énergie ne polluent pas : il n'y a pas de renvoi direct de CO₂ ou de quelconque gaz nocif dans l'atmosphère. Il n'y a pas, non plus, de déchet à gérer sur de nombreuses années,...

Malgré tous ces avantages économiques et écologiques, les deux principales énergies renouvelables que sont le soleil et le vent possèdent un désavantage conséquent : ce sont des énergies intermittentes. Contrairement à une centrale thermique qui peut fonctionner toute l'année à n'importe quelle heure du jour et de la nuit tant qu'il y a du combustible disponible, les panneaux photovoltaïques ou les éoliennes dépendent du jour et de la nuit, de la période de l'année, de la météo,... Ces sources d'énergie seules ne peuvent donc pas subvenir aux besoins énergétiques de l'Humanité du *XXI^e* siècle.

Pour une transition énergétique vers une énergie majoritairement renouvelable et verte, il faut favoriser le développement de technologies flexibles dont le rôle sera de

garantir le maintien de l'équilibre "Production-Consommation" au sein du réseau électrique (nécessaire au maintien à 50 Hz de la fréquence de celui-ci). Parmi ces solutions, le stockage d'énergie représente une option à investiguer. Pratiquement, en fonction de la nature plus ou moins intermittente de la source, il faut pouvoir stocker pendant un temps plus ou moins long une quantité plus ou moins importante d'électricité. De nombreuses solutions se développent depuis plusieurs années, des plus simples aux plus alambiquées. La solution de stockage actuelle la plus connue est la batterie chimique. Cette batterie offre un stockage fiable avec un rendement correct. Ces batteries chimiques sont cependant limitées dans le temps par le nombre de cycles charge-décharge de celles-ci. De plus, à cause de leur nature chimique, une batterie même non utilisée va se décharger au cours du temps de par la dégradation des matériaux de celle-ci. Pour finir, une batterie chimique est constituée généralement de "terres rares", fortement polluantes qui posent autant de questions éthiques et environnementales que les sources de production par énergie fossile.

Une autre solution de stockage qui se développe est le stockage sous forme gravitaire. La solution de stockage gravitaire la plus connue est le barrage. Notamment, nous pouvons citer les centrales de pompage-turbinage telle que la centrale de Coe en Belgique. Cette centrale est capable de fournir 1 164 MW pendant 5 heures, ce qui représente un stockage de plus 5 000 MWh. Multiplié par le nombre d'heures d'utilisation par an, cette centrale est donc capable de stocker et de restituer 1000 GWh[2]. Le principe du pompage turbinage utilisé dans ces centrales est d'amener l'eau dans un bassin supérieur par pompage. Cette opération utilise de l'électricité qu'elle transforme sous forme d'énergie potentielle. Quand il y a un besoin d'électricité, la centrale passe en mode turbinage. En passant au bassin inférieur, l'eau entraîne des turbines qui, à leur tour, créent de l'électricité et l'envoient sur le réseau. Cette centrale propose un stockage d'électricité pour le réseau industriel. Il existe des systèmes de barrage ou de pompage turbinage à plus petite échelle (en carrière, via des galeries minières,...) qui peuvent être exploités directement par une industrie ou un particulier [3].

C'est dans cette optique de transition énergétique et de stockage d'énergie que l'idée de SinkFloat Solution est née. Si de l'énergie gravitaire peut être stockée dans de l'eau, celle-ci peut-elle également être stockée dans des masses solides? C'est dans cette optique que Christophe Stevens, ingénieur Belge, a imaginé un système de masses solides effectuant des plongées et des levages entre une plateforme flottante et le fond marin. Selon le même principe que le pompage turbinage, quand il y a de l'énergie disponible un moteur remonte les masses une à une à la surface. A l'inverse, quand le réseau a besoin d'électricité, ces masses effectuent une plongée entraînant alors un générateur d'électricité. A l'identique du pompage turbinage qui peut être utilisé en application

"réseau" (fourniture de service au Gestionnaire de Réseau de Transport) ou à des fins industrielles (auto-consommation), ce système propose deux sortes de dimensionnement.

Le premier type est un système en océan ou en mer. Ces milieux offrant des profondeurs relativement importantes, l'électricité peut être stockée de manière conséquente. Ce système peut être vu comme les éoliennes off-shore qui se développent de plus en plus le long des côtes.

La deuxième solution d'un système de stockage gravitaire à masses solides est celle qui sera développée au cours de ce projet : le stockage gravitaire utilisant d'anciennes carrières. La Belgique possède un certain nombre de carrières plus ou moins profondes qui ne sont plus exploitées. Une fois la carrière en fin de vie, celle-ci se retrouve immergée et offre un bassin a priori inutilisable. C'est dans ces bassins qu'un système de stockage gravitaire de plus petite taille pourrait être envisagé afin de subvenir au stockage énergétique d'une entreprise ou d'un groupe de particuliers possédant une (ou plusieurs) source(s) d'énergie renouvelable. Les profondeurs disponibles étant moins importantes qu'en mer ou en océan, la quantité d'énergie stockable est également moins importante. Cette solution offre néanmoins une revalorisation de carrières inoccupées ainsi qu'une alternative directe aux entreprises à proximité d'une carrière (voire à l'exploitant de celle-ci).

Ce rapport a pour but d'exposer l'analyse d'un tel système en carrière ainsi qu'à évaluer la rentabilité économique de celui-ci dans deux cas d'application : via une maximisation du taux d'auto-consommation d'un industriel possédant de la production d'électricité d'origine renouvelable ou via un arbitrage direct sur le marché de l'électricité (vente quand le prix est élevé et stockage quand le prix est bas).

Chapitre 2

Modélisation du système

Le système de stockage étudié pour ce travail est donc un système de stockage gravitaire, fonctionnant dans l'eau, exploitant des profondeurs de carrière belges. Au cours de ce chapitre, l'ensemble du système physique et électrique est étudié. Dans un premier temps, le fonctionnement physique du système est expliqué. Ce type de stockage gravitaire n'étant pas semblable au stockage chimique ou au pompage turbinage, il est intéressant de familiariser le lecteur avec la réalisation physique d'un tel stockage.

Ensuite, la méthodologie de choix des matériaux des blocs est présentée. Les blocs du système constituent la capacité de stockage de celui-ci. Plus il y aura de blocs, plus le temps de stockage sera important et plus ceux-ci seront lourds plus la puissance disponible sera importante. Lors de la section de choix des matériaux, les paramètres tels que force, puissance et énergie sont définis pour ce système. A la fin de cette première section, un (ou plusieurs) matériau(x) est retenu et les caractéristiques optimales réelles sont prises en compte pour la suite de l'étude.

Après avoir défini les différents paramètres de façon théorique, la section suivante de ce chapitre est consacrée à l'étude et au calcul de valeurs plausibles et réelles de ces paramètres. Ces valeurs sont utiles par la suite pour l'étude et la valorisation économique du système afin de pouvoir en évaluer le potentiel de manière réaliste.

Pour finir ce chapitre, une description physique de l'ensemble des composants du système est proposée. Il existe en pratique un grand nombre de configurations possibles pour un système de stockage gravitaire. Les configurations les plus concrètes sont comparées, dans le cadre de ce travail, afin d'en ressortir la plus optimisée vis-à-vis de l'application ciblée.

2.1 Fonctionnement du système

Le système fonctionne donc dans l'eau. La profondeur disponible influencera pour les différents paramètres du système.

Dans un premier temps, pourquoi développer un tel système dans l'eau ? Il pourrait être imaginé un stockage gravitaire en haut d'une grue ou de bâtiments. Une entreprise Suisse développe un système gravitaire à proximité d'éoliennes [4]. L'avantage de fonctionner dans l'eau est la stabilité du système. Celui-ci n'est pas soumis aux vents ou aux différentes intempéries. Les matériaux soutenant le système doivent subir des efforts moins importants et coûteront dès lors moins cher que s'ils devaient fonctionner en altitude à l'air libre. Ensuite, ce projet permet de revaloriser des carrières n'étant plus nécessairement utiles pour l'extraction. Ces sites sont donc directement disponibles et ne demandent pas d'investissement supplémentaire mis à part le dispositif permettant le stockage : pas besoin de grues, de renforts,... Pour finir, ce genre de système ne modifierait pas le paysage des riverains.

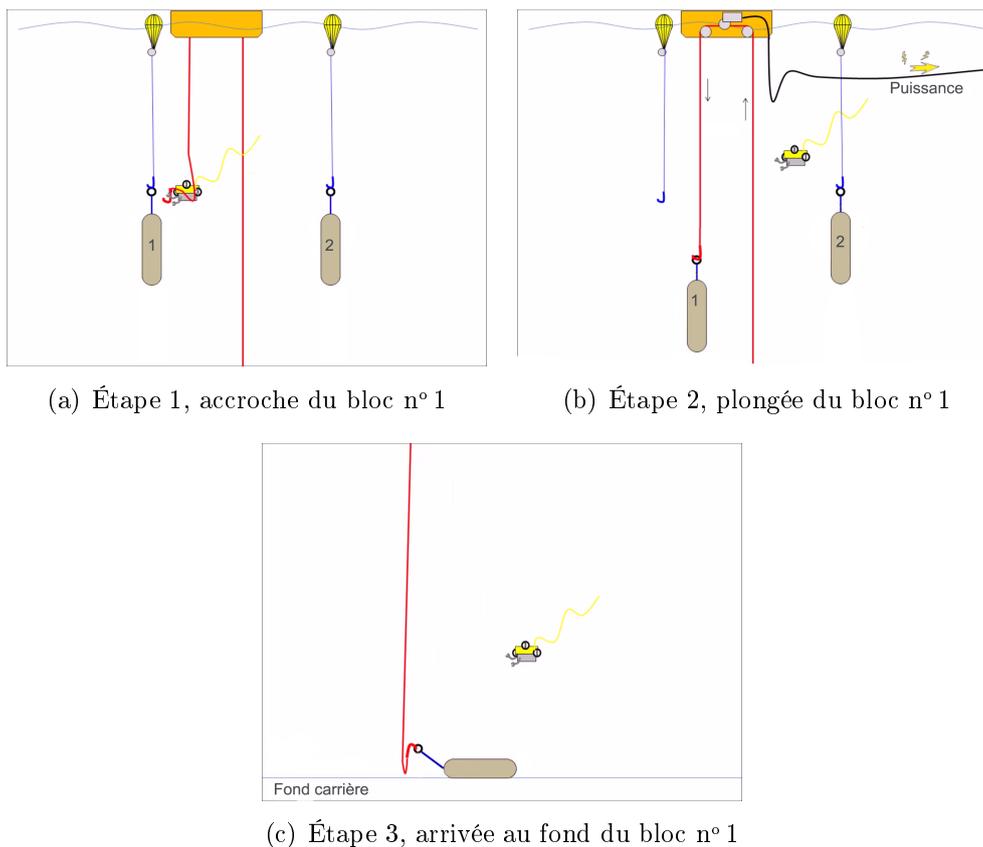


FIGURE 2.1 – Etapes de fonctionnement du système[5]

Les différentes étapes de stockage et déstockage gravitaire en carrière peuvent s'imaginer comme suit et sont représentées à la figure 2.1 :

1. Bloc n° 1 à la surface. Celui-ci est accroché, grâce à un robot, à un crochet relié à un moteur générateur
2. Grâce à son poids, le bloc n° 1 entraîne le moteur générateur lors de sa plongée vers le fond de la carrière. Le moteur générateur freinant le bloc n° 1 à la vitesse voulue, celui-ci récupère de l'énergie qu'il transforme en électricité.
3. Lorsque le bloc n° 1 commence sa décélération (lorsqu'il approche le fond de la carrière), le bloc n° 2 se trouvant à la surface entame à son tour une plongée afin de garantir un envoi continu d'électricité sur le réseau.
4. Pendant cette plongée, l'autre câble qui a été décroché du bloc n° 1 va alors remonter vers la surface grâce au moteur générateur afin de pouvoir accrocher un bloc supplémentaire.
5. Si il y a possibilité de charger le système, c'est à dire lorsqu'il y a un surplus de production renouvelable ou que le prix de l'électricité est plus attractif, les blocs vont pouvoir effectuer le trajet dans l'autre sens.
6. Un à un, les blocs disponibles au fond vont être remontés jusqu'à ce que le système soit complètement chargé (tous les blocs à la surface) ou s'il n'y a plus d'énergie supplémentaire disponible.

Les états de charge et décharge du système sont représentés à la figure 2.2.

Une dernière question sur le fonctionnement à développer est le problème d'encombrement. Il semble, en effet, incohérent d'avoir à disposition, par exemple, 15000 blocs de $2 m^3$ dans un bassin de carrière. De plus, si les blocs s'empilent au fond de la carrière, la profondeur disponible du système diminue au fur et à mesure des trajets.

Le nombre de blocs sera limité par le diamètre de la carrière, celui-ci déterminera alors le volume cohérent à occuper pour les blocs et donc le nombre de ceux-ci. Typiquement celui-ci variera de 100 à 1000 blocs. Afin que les blocs ne s'empilent pas sur le fond, un système rotationnel et rétractif peut être imaginé (figure 2.3). A chaque bloc en plongée, le système effectuera une rotation de 5 à 10° . A chaque tour complet du système, les bras seront rétractés de 1 à 2 mètres. Cela nécessite donc un stockage sur un disque au fond de la carrière.

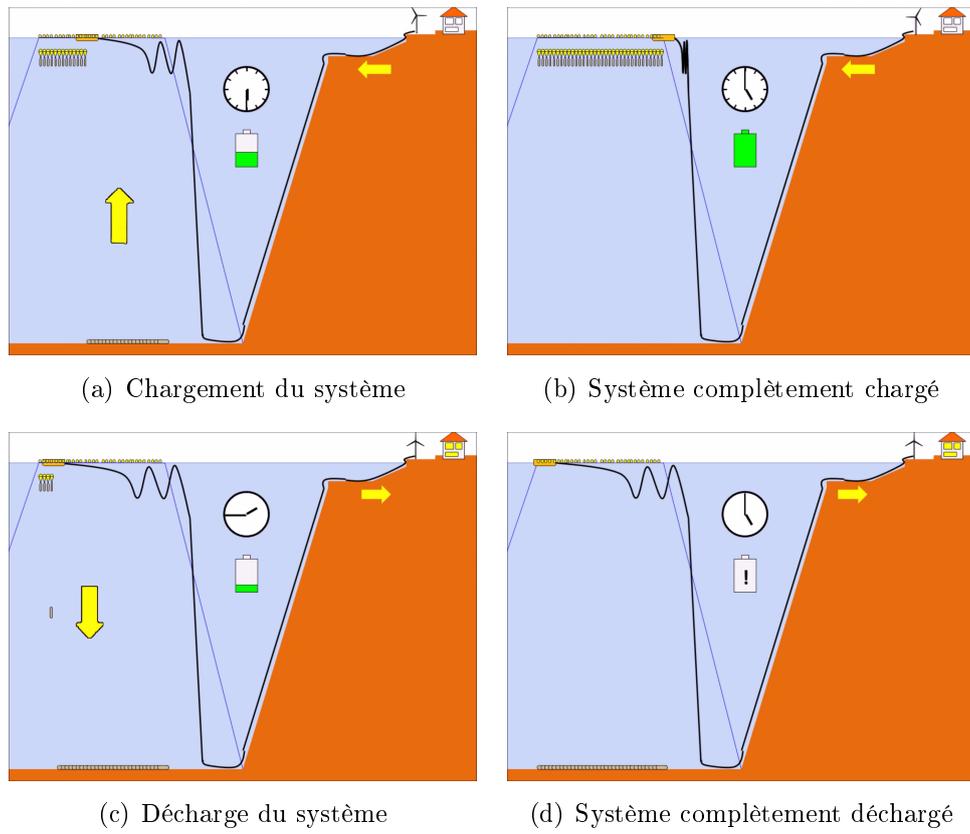


FIGURE 2.2 – Etat de chargement du système[5]

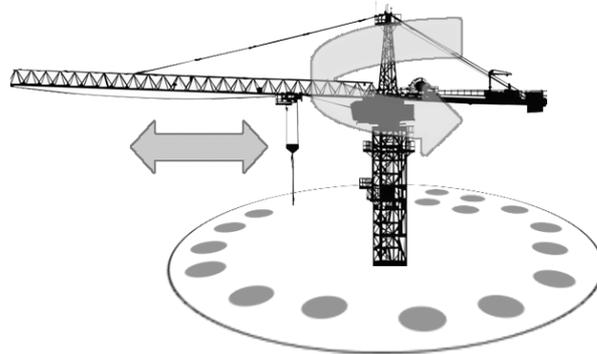


FIGURE 2.3 – Système rotationnel et rétractif du système de stockage

2.2 Méthodologie de choix de matériaux

Le matériau constituant les masses solides du système doit répondre à certains paramètres fixés ainsi qu'aux contraintes liées à l'objectif de stockage. Différents paramètres variables existent aussi, ceux-ci vont permettre de faire varier le système final en coût, puissance et énergie.

Au cours de cette section, la méthodologie qui a été appliquée pour arriver à un comparatif final de matériaux potentiels va être détaillée. Cette méthodologie est sujette à l'appréciation personnelle et n'est pas exhaustive.

2.2.1 Définition des paramètres du système

La contrainte la plus importante des blocs est que ceux-ci doivent avoir une densité supérieure à celle de l'eau afin de pouvoir entraîner un générateur lors des plongées. Plus le matériau est dense, plus le poids des blocs est important à volume identique. L'intérêt de diminuer le volume des blocs sera, par ailleurs, détaillé dans une section suivante.

Le matériau doit être immersible et supporter une durée de vie importante dans l'eau. Lors des différents cycles de plongée et, plus spécifiquement, lors de la phase de levage, les blocs vont subir des variations de pression plus ou moins importantes en fonction de la profondeur du bassin et cette différence de pression ne doit pas entraîner de détérioration.

La dernière contrainte est de minimiser le coût des blocs. Cela prend en compte le coût du matériau mais également la conception et le transport.

Ce système de stockage offre un grand nombre de variables sur lesquelles il sera possible d'agir afin d'adapter au mieux le fonctionnement. Les différents paramètres variables sont :

- la masse (le poids) des blocs
- la vitesse de plongée ainsi que celle de levage
- le nombre de blocs disponibles
- le nombre de blocs qui effectuent les plongées et levages en parallèle
- le matériau choisi

2.2.2 Étude théorique du système

2.2.2.1 Étude des différents efforts agissant sur un bloc

Les forces qui agissent sur les blocs ne sont pas identiques en fonction de la direction du système. On considèrera des vitesses positives quand le système est en levage ; c'est-à-dire, lorsque les blocs remontent vers la surface. À l'inverse, les blocs sont dits "en plongées" quand ils sont descendus vers le fond du bassin. À ce moment, les vitesses seront négatives. Le référentiel est représenté à la figure 2.4.

A la figure 2.5, les deux cas sont illustrés. Il est dès lors intéressant d'analyser la

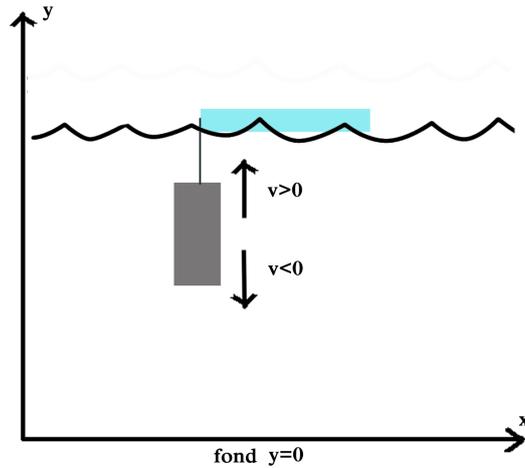


FIGURE 2.4 – Référentiel du système gravitaire

résultante des forces dans les deux cas. La deuxième loi de Newton dit que :

$$\Sigma F = m.a \quad (2.1)$$

Dans le cas de l'étude de ce système, la force de résistance est appelée la force de liaison. C'est cette force qui sera récupérée au générateur lors de la plongée ou la force à fournir lors du levage. La force de liaison va donc dimensionner le système de stockage.

L'équation (projetée suivant la direction des y positifs) caractérisant l'ensemble des forces agissant sur un bloc lors de son levage est la suivante :

$$\Sigma F = F_{\text{accélération}} = F_{\text{liaison levage}} - P_m - T + F_{\text{archimède}} \quad (2.2)$$

En isolant la force de liaison, l'équation caractéristique devient :

$$F_{\text{liaison levage}} = P_m + T + F_{\text{accélération}} - F_{\text{archimède}} \quad (2.3)$$

Avec

le poids $P_m = m.g$

où m est la masse et g l'unité d'accélération de pesanteur

la trainée $T = \frac{1}{2}C_T(Re, \text{géométrie})\rho_{\text{eau}}v^2S_{\text{ref}}$

où C_T est le coefficient de trainée, ρ_{eau} la masse volumique de l'eau,

v la vitesse de plongée ou de levage et S_{ref} la surface de référence

$F_{\text{accélération}} = m.a$

$F_{\text{archimède}} = \rho_{\text{eau}}Vg$

où V est le volume d'un bloc

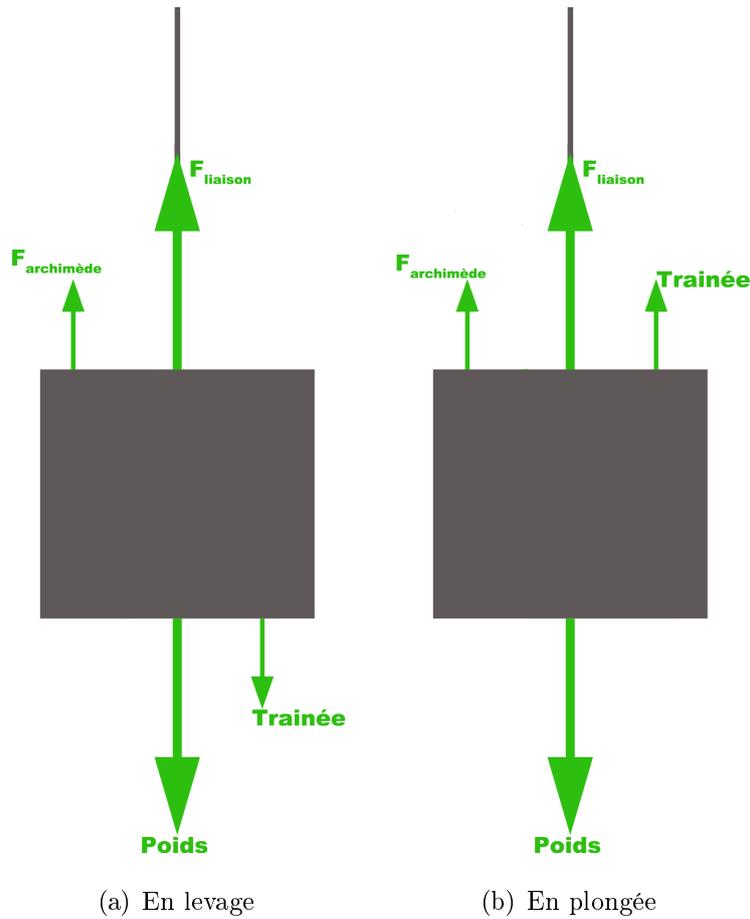


FIGURE 2.5 – Efforts agissants sur les masses au cours des différents trajets

Pour le calcul de ce bilan de force, une hypothèse est prise. Le poids du câble est négligé lors du calcul, et seul le poids du bloc est donc pris en compte.

Le bilan des forces pour les blocs en plongée est présenté à l'équation suivante. Les différentes forces sont identiques mais la trainée et la force d'accélération sont dépendantes du sens de déplacement de la masse.

$$\Sigma F = F_{\text{accélération}} = -F_{\text{liaison plongée}} + P_m - T - F_{\text{Archimède}} \quad (2.4)$$

En isolant la force de liaison :

$$F_{\text{liaison plongée}} = P_m - T - F_{\text{accélération}} - F_{\text{Archimède}} \quad (2.5)$$

2.2.2.2 Étude de la dynamique du système

Que ce soit lors du levage ou de la plongée, les masses vont passer par 3 phases. Ces 3 phases sont représentées dans le cas du levage à la figure 2.6. Notons que le graphique

illustrant la plongée serait identique avec des vitesses négatives.

- L'accélération : lors de cette phase, la masse passe de la vitesse zéro à la vitesse de régime.
- Le régime : phase lors de laquelle la vitesse est constante. Il est attendu que cette phase soit plus longue que les deux autres phases afin d'obtenir une puissance constante le plus longtemps possible en sortie du système.
- La décélération : dernière phase, où la masse passe de la vitesse de régime à la vitesse nulle.

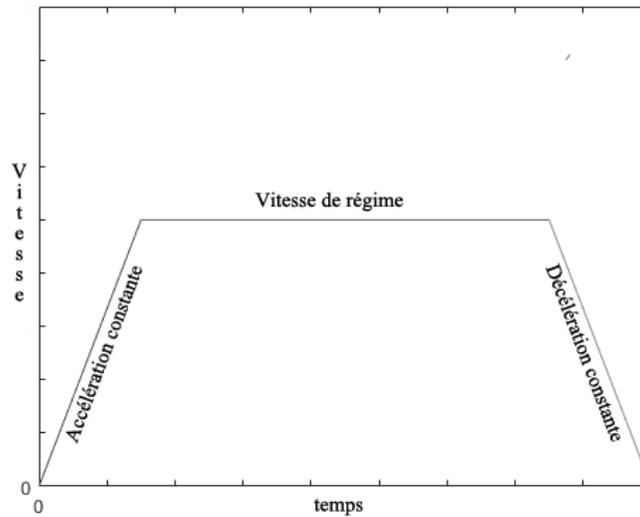


FIGURE 2.6 – Évolution de la vitesse de levage d'une masse en fonction du temps

Lors des phases d'accélération et de décélération, a est considéré constant ce qui implique :

$$v(t) = \int a(t).dt = a.t \text{ Où } a = \text{constante}$$

Lors de la phase de régime, la vitesse est constante et l'accélération est nulle :

$$v(t) = \text{constante} \Rightarrow a = \frac{dv(t)}{dt} = 0$$

La force de liaison la plus importante est observée lors de la phase d'accélération au levage des masses. En effet dans l'équation 2.3, seule la force d'Archimède aide au levage du bloc et il convient donc de développer une force de liaison conséquente. C'est cette force maximale que le câble soutenant les masses devra être capable de supporter sans rompre.

Lors de la plongée, la force de liaison sera plus importante en régime. Cette dernière nous permettra par la suite de dimensionner la puissance disponible.

2.2.2.3 Etude de la puissance du système

Comme mentionné au paragraphe précédent, c'est la force de liaison en plongée en régime qui dimensionne la puissance disponible. En effet :

$$P[W] = F_{\text{liaison plongée}}[N] \cdot v[m/s]$$

Plus la force sera importante à vitesse constante, plus la puissance disponible sera importante.

Cependant, la puissance du système ne peut être augmentée de façon infinie et ce dernier paramètre possède pratiquement une limite qui sera fonction de différents paramètres choisis notamment pour les matériaux, la forme,... Cette limite peut se démontrer :

Considérons, en effet, l'équation en plongée 2.5 en régime ($F_{\text{accélération}} = 0$). En remplaçant dans l'équation les expressions théoriques des différentes forces, on obtient :

$$F_{\text{liaison plongée}} = m \cdot g - \rho_{\text{eau}} V g - \frac{1}{2} C_T(Re, \text{géométrie}) \rho_{\text{eau}} v^2 S_{ref} \quad (2.6)$$

La puissance disponible vaut donc

$$P = F_{\text{liaison plongée}} \cdot v = [m \cdot g - \rho_{\text{eau}} V g] \cdot v - \left[\frac{1}{2} C_T(Re, \text{géométrie}) \rho_{\text{eau}} S_{ref} \right] \cdot v^3 \quad (2.7)$$

Le premier terme en v est une droite. Le deuxième terme en v^3 est une fonction cubique. La puissance disponible résulte donc de la différence entre une fonction constante et une fonction cubique dont une représentation est proposée à la figure 2.7(a). Ce résultat montre bien que la puissance à extraire en fonction de la vitesse passe par un maximum. Après ce maximum, la traînée qui augmente avec v^3 devient trop importante par rapport à la différence entre le poids et la force d'Archimède.

Lors de la dynamique du système, il sera important de fonctionner à gauche du maximum ou au maximum de cette courbe afin de ne perdre aucune puissance.

Lors du levage, toutes les contributions en vitesse sont positives et ce maximum n'existe plus. La courbe de puissance nécessaire en fonction de la vitesse évolue, dans ce cas, en suivant une contribution en $v + v^3$ (figure 2.7(b)).

2.2.2.4 Étude de l'énergie totale stockable dans le système

En électricité, la notion d'énergie est largement utilisée. Sur la facture, par exemple, on parlera en terme de prix au kWh utilisé. La caractérisation des batteries se fait également (entre autres choses) en termes d'énergie stockable. Par exemple, la batterie PowerPack de Tesla offre 210kWh au prix de 60.000€[6]. Il est donc intéressant de

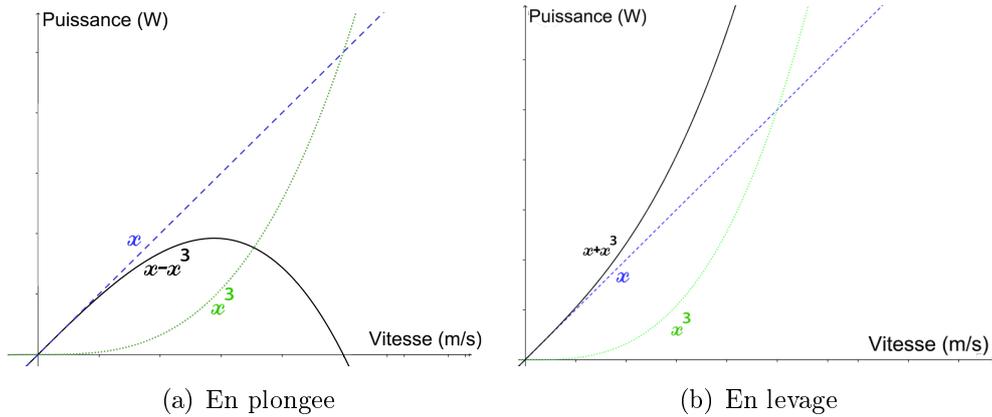


FIGURE 2.7 – Évolution des composantes de la puissance en fonction de la vitesse

pouvoir quantifier l'énergie stockable dans notre système gravitaire.
Ainsi, par définition :

$$\text{Energie/bloc}[Wh] = P_{\text{plongée}}[W] \cdot t_{\text{plongée}}[h] = P_{\text{levage}}[W] \cdot t_{\text{levage}}[h] \quad (2.8)$$

Les puissances de plongée et de levage ne sont pas forcément équivalentes ainsi que les temps de plongée et de levage. Par contre l'égalité (Puissance x temps) doit être vérifiée (l'énergie ne peut se créer ou se perdre).

L'énergie totale du système vaut donc :

$$E[Wh] = \text{Energie/bloc}[Wh] \cdot M \quad (2.9)$$

Avec M le nombre de blocs.

2.2.3 Comparaison des différents matériaux potentiellement utilisables

Les paramètres dimensionnants du système ont été établis jusqu'ici de façon théorique.

Dans l'équation 2.7, certains paramètres dépendent du type de matériau et de la forme donnée à celui-ci. Dans cette section, les différents paramètres des blocs vont être analysés afin de sortir les caractéristiques optimales et de trouver le meilleur matériau compatible à notre utilisation.

Chaque matériau va être caractérisé par les paramètres suivants :

- la masse volumique
- le prix au kilogramme
- la forme qu'il est possible de lui donner

La masse volumique doit être maximisée, afin d'avoir des volumes raisonnables pour les masses souhaitées, tandis que le coût au kilogramme du matériau doit être minimisé. Le dernier paramètre, la forme, possède un impact non négligeable sur la puissance du système. En effet, le système agissant dans un fluide, une traînée agit et s'oppose toujours au mouvement du corps. L'importance de cette traînée dépend du coefficient de traînée C_T comme signalé précédemment. Le but est donc de trouver une forme minimisant ce coefficient de traînée afin de réduire la perte de puissance.

2.2.3.1 Étude du coefficient de traînée

Le coefficient de traînée dépend de deux paramètres ; le Reynolds et la géométrie. Le nombre de Reynolds est une caractéristique des fluides[7]. Il se calcule de la manière suivante :

$$Re = \frac{vL}{\mu} \quad (2.10)$$

Avec

- v la vitesse du fluide [m/s]
- L la dimension caractéristique du corps immergé [m]
- μ la viscosité cinématique du fluide [m²/s]

Ce nombre de Reynolds indique si le fluide est dans un cas d'écoulement turbulent ou laminaire. Plus le Re sera grand, moins le fluide sera visqueux et plus l'écoulement sera considéré comme turbulent. À grand nombre de Reynolds, le coefficient de traînée pourra être considéré comme constant. Dans le cas de notre système de stockage gravitaire, une première approximation peut être faite :

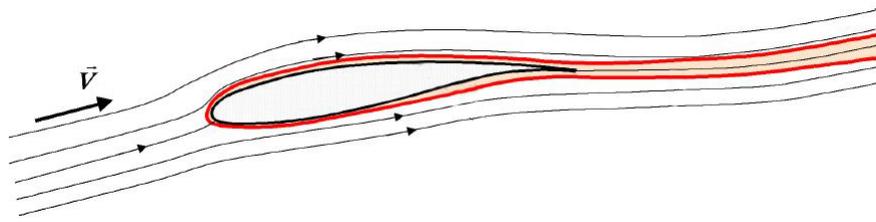
Considérons un bloc de longueur de référence de 1 mètre. La viscosité cinématique de l'eau vaut $\mu = 1,007 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Si les blocs plongent à une vitesse supérieure à 1 m/s, le Reynolds vaut :

$$Re = \frac{1 \cdot 1}{1,007 \cdot 10^{-6}} = 1000000$$

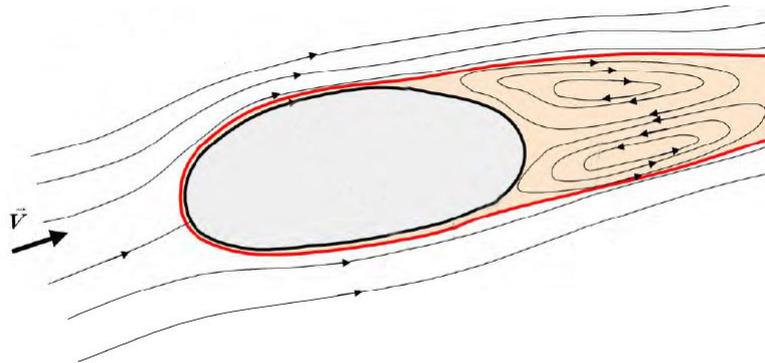
Le nombre de Reynolds caractérisant l'écoulement de ce système est suffisamment important pour que le coefficient de traînée soit donc considéré comme constant.

La traînée vient du phénomène de recirculation d'un fluide autour du corps. Afin de minimiser cette recirculation, il faut avoir des corps dit profilés. La différence d'écoulement d'un fluide autour d'un corps profilé ou non profilé est représentée à la figure 2.8.

Le coefficient de traînée va donc être plus important pour un corps peu profilé. La valeur du coefficient de traînée pour différents profils-types est donnée à la figure 2.9.



(a) Corps profilé



(b) Corps non profilé

FIGURE 2.8 – Ecoulement d'un fluide autour d'un corps profilé et d'un corps non profilé [7]

Forme		Coefficient de traînée
Sphère		0.47
Demi-sphère		0.42
Cube		1.05
Corps profilé		0.04
Semi-corps profilé		0.09

FIGURE 2.9 – Coefficient de traînée en fonction de diverses formes [8]

Le corps profilé est donc le plus intéressant mais tous les matériaux ne pourront s'adapter à ce type de profil. Il faudra alors s'en rapprocher le plus possible en imaginant des designs longs et fins et/ou en arrondissant les angles.

2.2.3.2 Étude de la traînée

L'équation de la traînée a été développée à la section 2.2.2.1 mais, désormais, il a été démontré que le coefficient de traînée est constant à Reynolds important :

$$T = \frac{1}{2}C_T(\text{géométrie})\rho_{eau}v^2S_{ref} \quad (2.11)$$

La dernière caractéristique sur laquelle il est possible d'agir est la surface de référence de la masse. Celle-ci devra être optimisée afin d'être suffisamment petite, tout en maintenant des contraintes plausibles d'encombrement vertical.

2.2.3.3 Matériaux potentiels

Grâce à l'analyse théorique proposée précédemment, et au logiciel CES Edupack, une série de matériaux conventionnels a pu être sélectionnée. Le graphique des matériaux de types non recyclables en fonction du prix et de la densité sont repris en annexe A. Sur celui-ci les matériaux les plus avantageux sont les moins chers à densité maximale.

Ensuite, comme mentionné dans l'introduction, des matériaux issus de la récupération ont été sélectionnés. Grâce à de nombreuses recherches et différents contacts, 6 matériaux issus de l'industrie et de la construction ont été considérés comme plausibles dans l'application de stockage gravitaire. Les différentes sources sont indiquées dans la bibliographie.

Le tableau récapitulatif est présenté pour des masses de $m=5000$ kg. Cette valeur pourra être revue par la suite lors de la valorisation du système. Le tableau 2.1 présente les différents matériaux compatibles et leurs caractéristiques. Deux remarques peuvent être faites sur ce tableau :

- Le prix de la conception des blocs n'est pas pris en compte dans le prix/kg. Seule la valeur du matériau brut est prise en compte
- La surface de référence est considérée de façon plus ou moins arbitraire, comme une fonction du volume. Une étude complète sur l'évolution de la traînée en fonction des dimensions des blocs pourrait être effectuée, mais cette étude ne rentre pas dans le cadre de ce travail.

Dans un premier temps, le béton haute densité, le grès et la fonte peuvent être supprimés de la liste. En effet, leur prix au kilo est beaucoup trop important. Il n'est pas envisageable d'acheter, par exemple, 50 masses de 5000 kg à ce prix là.

Le béton Asphalt semble offrir une bonne solution pour ce système. Cependant, le sable est une ressource qui pose de plus en plus de problèmes et qui est largement utilisée dans le domaine public[11]. Cette utilisation abusive entraîne des détériorations des écosystèmes marins et la quantité de sable disponible directement décroît d'année en années.

Matériaux	$\rho(kg/m^3)$	$V(m^3)$	€/kg	€/5000 kg	Forme	C_T	S_{ref}
Asphalt béton[9]	2200	3,20	0,06[10]	422,295	Ogive	0,04	1,13
HD béton	4900	1,44	0,23	1635,6	Ogive	0,04	1,13
Grès	2240	3,15	0,46	3271,2	Ogive	0,04	1,13
Fonte	7050	1,00	0,37	2636,7	Ogive	0,04	1,13
Briques	1800	3,92	0	0	Gabion(cube)	0,8	1,44
Gravats	1800	3,92	0	0	Gabion(rectangle)	1,04	0,36
Sable fonderie	1850	3,81			Ogive	0,04	1,13
Déchet miniers	2000	3,53	0	0	Gabion(rectangle)	1,04	0,36
Déchets nucléaires	1000	7,05	0	0	Fût	0,88	1,63
Laitier d'aciérie	3500	2,01	0,025	176,25	Fût	0,84	0,71

TABLE 2.1 – Tableau comparatif des différents matériaux compatibles

Ce matériau sera analysé dans la suite du travail mais son utilisation ne sera pas recommandée.

La suite du tableau concerne les matériaux alternatifs.

Ainsi, les briques, gravats et déchets miniers représentent autant de candidats potentiels. Ces 3 types de matériaux sont issus de la récupération et revalorisation de déchets de construction et démolition. Ces déchets étant voués à être enfouis dans des décharges, ils ne coûtent rien. Ils offrent même une revalorisation positive de déchets qui, alors, se transforment en matières premières. Ces "déchets" étant sous forme de caillasse, ils pourraient être, par exemple, conditionnés dans des gabions¹ formant ainsi les blocs du système. Un gabion pourrait avoir une forme cubique ou celle d'un parallélépipède rectangle avec possibilité d'optimiser le coefficient de traînée ainsi que la surface de référence. On remarque que, cependant, selon qu'il soit rectangulaire ou cubique, le coefficient de traînée reste important et la traînée limitera de façon non négligeable la puissance disponible par bloc.

Les sables de fonderie ainsi que le laitier d'aciérie sont également deux matériaux issus de la récupération de déchets industriels. Ces deux matériaux pourraient être contenus dans des fûts ou des contenants de formes diverses ce qui permettrait d'optimiser la traînée.

Enfin, une ligne de ce tableau est consacrée aux déchets nucléaires. Bien que cette solution soit peu plausible, il serait possible de valoriser des déchets très faiblement radioactifs actuellement entassés en surface, afin de stocker de l'énergie électrique sous

1. Un gabion est une cage métallique contenant des pierres de toutes formes

forme gravitaire. Cependant, cette solution poserait des risques environnementaux et sanitaires non négligeables, en plus des questionnements politiques et sociaux qui en découleraient plus que certainement. [12]

2.3 Caractérisation des paramètres du système

Pour caractériser le système, certaines données vont être fixées tandis que d'autres seront prises dans une fourchette plausible. L'ensemble des paramètres seront comparés pour les matériaux plausibles du tableau 2.1. Les diverses valeurs de paramètres considérées sont ainsi rappelées ci-dessous :

- Masse=5000 kg
- Nombre de blocs de 50 à 250
- Profondeur de 50 à 200 m
- Vitesse de plongée et de levage : entre 0 et 10 m/s en fonction de la puissance désirée

Rappelons les forces en levage (cf. relation 2.3) :

$$\text{Le poids } P_m = m.g$$

$$\text{La trainée } T = \frac{1}{2}C_T(Re, \text{géométrie})\rho_{eau}v^2S_{ref}$$

$$F_{accélération} = m.a$$

$$F_{Archimède} = \rho_{eau}Vg$$

La caractérisation du système de stockage va être effectuée en régime afin de pouvoir analyser la puissance disponible au système dans ce type de fonctionnement. Comme mentionné précédemment, l'accélération et la décélération vont, quant à elles, permettre de déterminer la force que le câble doit supporter.

Le tableau suivant reprend les forces d'Archimède, de gravité et de trainée pour les matériaux plausibles présentés précédemment.

Matériau	Archimède[N]	Gravité[N]	Trainée[N]
Asphalte béton	22295,45	49050	22,62.v ²
Briques	27250,00	49050	576,00.v ²
Gravats	27250,00	49050	187,20.v ²
Sables fonderie	26513,51	49050	22,62.v ²
Déchets miniers	24525,00	49050	187,20.v ²
Laitiers d'aciérie	14014,29	49050	236,30.v ²

TABLE 2.2 – Calcul des forces pour les différents matériaux potentiellement utilisables

La force en plongée multipliée par la vitesse de plongée donne la puissance disponible. Avant de calculer cette puissance, il est intéressant de quantifier la vitesse limite de plongée d'un bloc, c'est-à-dire lorsque la dérivée de la vitesse (dans la relation 2.7) devient nulle :

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = m \cdot g - \rho_{eau} \cdot V \cdot g - C_T \cdot \frac{1}{2} \rho_{eau} \cdot v^2 \cdot S_{ref} \quad (2.12)$$

Cette équation peut être résolue par itérations successives. Pour les différents matériaux, les vitesses-limites sont reprises dans le tableau suivant.

Matériaux	v_{limite} (m/s)
Asphalte béton	34,20
Briques	6,15
Gravats	10,79
Sable fonderie	31,27
Déchets miniers	11,45
Laitiers d'aciérie	12,18

Il faut maintenant quantifier, entre la vitesse nulle et ces vitesses limites quelle puissance peut être extraite en plongée. Rappelons l'équation de la puissance en plongée :

$$P_{plongee} = F \cdot v = (P_m - F_{archimède} - T) \cdot v \quad (2.13)$$

Comme mentionné à la section 2.2.2.3, la puissance possède un maximum en plongée puis diminue après ce maximum de par le terme en v^3 de la trainée. La puissance disponible en levage et en plongée en fonction de la vitesse pour différents matériaux est reprise aux figures 2.10(a) et 2.10(b) .

Lors d'une plongée d'un bloc, il sera alors possible d'adapter la vitesse en fonction de la puissance nécessaire. Lors de la configuration du système, il avait été mentionné de pouvoir mettre plusieurs blocs en parallèle. Les puissances de chaque blocs seraient alors additionnées, ce qui permet d'avoir une puissance disponible plus importante à vitesse de plongée identique.

Le calcul de l'énergie du système dépend alors de la profondeur et de la vitesse de chute. Rappelons la formule de l'énergie :

$$\text{Energie/bloc} [Wh] = P_{plongée} [W] \cdot t_{plongée} [h] \quad (2.14)$$

Avec

$$t_{plongée} [h] = \frac{\text{Profondeur} [m]}{3600 \cdot v [m/s]} \quad (2.15)$$

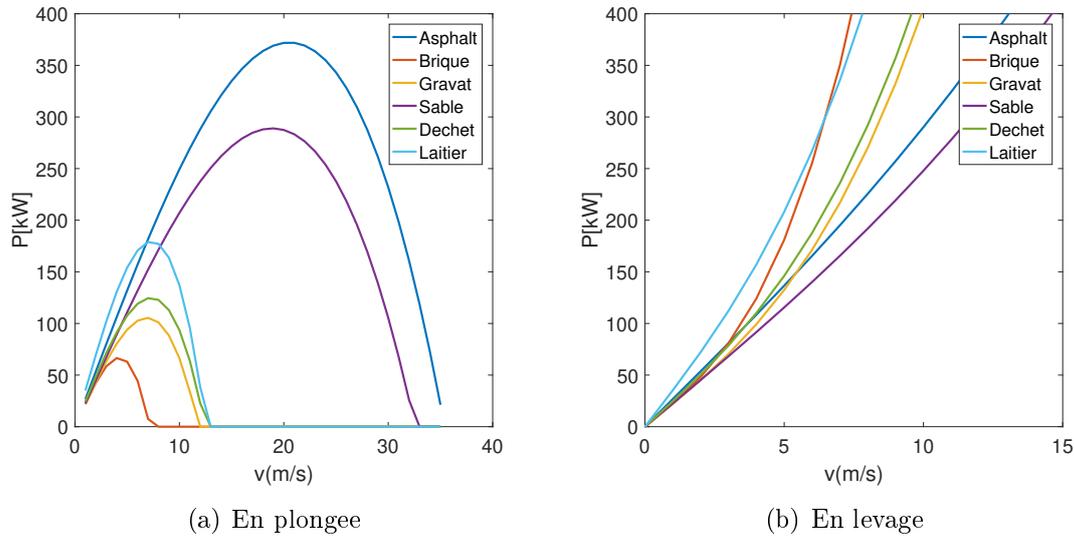


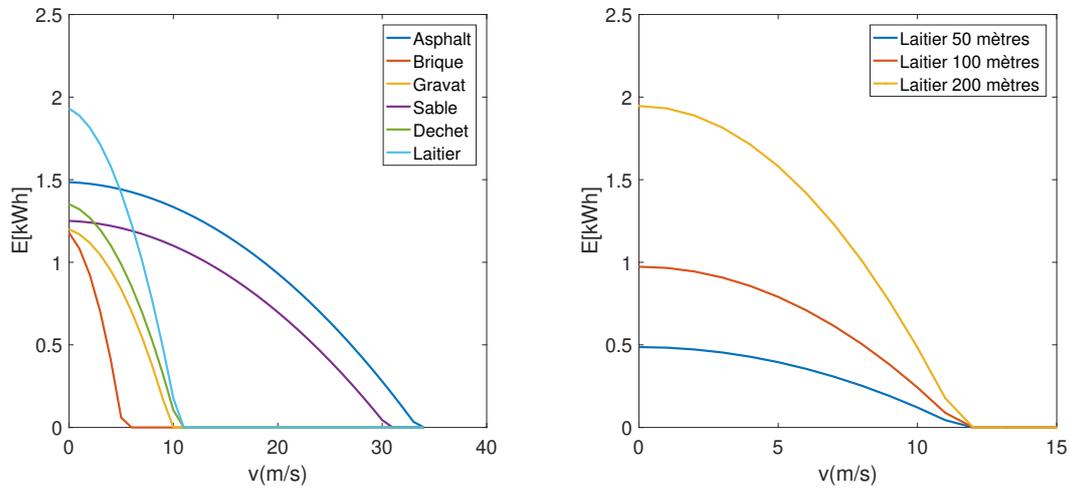
FIGURE 2.10 – Puissance disponible en fonction de la vitesse pour différents types de matériaux

L'évolution de l'énergie en fonction de la vitesse de plongée pour les différents types de matériaux retenus est reprise à la figure 2.11(a) pour une profondeur de carrière de 200 mètres.

Le laitier d'aciérie est le matériau "moyen" retenu pour la suite de l'étude. Les courbes en puissance sont les courbes moyennes les plus réalistes. L'asphalte béton et le sable de fonderie ont été mis en graphique pour des coefficients de trainée de corps parfaitement profilés, ce qui n'est pas réalisable en pratique. Les autres matériaux contenus dans des gabions sont également tout à fait plausibles et les profils des gabions pourraient être optimisés afin d'atteindre un coefficient de trainée proche de celui du laitier.

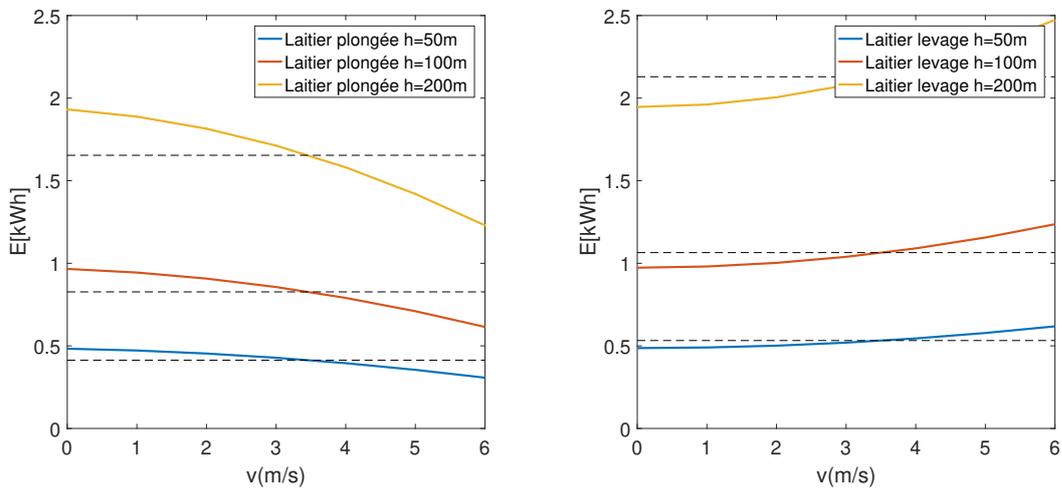
L'évolution de l'énergie pour ce matériau en fonction de la profondeur du bassin est reprise à la figure 2.11(b). Ce graphique permet de mettre en évidence que l'énergie est largement influencée par la profondeur et moins par la vitesse de plongée.

Les valeurs d'énergie tombent à zéro à partir d'une certaine vitesse. Cependant, comme précisé précédemment, il faudra toujours fonctionner à une vitesse inférieure à la vitesse qui correspond au maximum de la courbe de puissance. Typiquement, pour le laitier d'aciérie, la vitesse devra, en plongée, rester inférieure à 7 m/s. Dès lors, il peut être vérifié que pour des vitesses inférieures, l'énergie en plongée va être constante. L'énergie en fonction de la vitesse pour différentes profondeurs est reprise à la figure 2.12(a). Dans la suite de l'étude, l'énergie en plongée sera considérée comme constante et la puissance en plongée linéaire. De la même manière, la puissance est considérée linéaire en levage et l'énergie en levage sera donc constante(c.f. figure 2.12(b)).



(a) Pour les différents matériaux et pour une profondeur de 200 mètres (b) Pour le laitier d'aciérie et en fonction de la profondeur

FIGURE 2.11 – Évolution de l'énergie par bloc ($m=5000$ kg) en fonction de la vitesse de plongée



(a) Zoom sur la zone constante en plongée (b) Zoom sur la zone constante en levage

FIGURE 2.12 – Évolution de l'énergie par bloc de laitier d'aciérie ($m=5000$ kg) en fonction de la vitesse et en fonction de la profondeur

2.4 Description du système

Les paramètres du système de stockage étant maintenant estimés, la configuration physique du système va être développée. Il faut connaître les différents composants d'un système afin de pouvoir quantifier le coût total d'un système complet ainsi que l'évolution de celui-ci en fonction de la configuration.

2.4.1 Composants du système

Ce système de stockage d'énergie gravitaire doit donc pouvoir stocker de l'énergie en remontant (levage) les blocs à la surface, mais également restituer l'énergie, sous forme électrique, lors de la plongée de ceux-ci. L'ensemble des composants de ce système vont être décrits dans cette section.

2.4.1.1 Moteur

Les trajets des masses en plongée et en levage devront être assurés par un ou plusieurs treuils. Un treuil est constitué d'un tambour à câble fixé sur l'axe d'un motoréducteur asynchrone.

Le choix d'un moteur asynchrone convient mieux dans le cadre de ce projet. La machine asynchrone est, en effet, capable de fonctionner dans les quatre cadrants du plan puissance - vitesse de rotation. Cela signifie qu'une telle machine peut opérer dans les deux sens tout en consommant ou produisant de la puissance. Les machines asynchrones sont largement utilisées dans le domaine industriel et existent dans une large gamme de puissances. Ce sont des machines simples d'entretien, disponibles directement sur le marché à des prix standardisés. De plus, les moteurs asynchrones sont capables de démarrer seul (contrairement aux moteurs synchrones qui ne développent pas de couple utile à l'arrêt).

2.4.1.2 Réducteur

Pour un fonctionnement optimal, il faut coupler à la machine asynchrone avec un réducteur de vitesses. Celui-ci permet un fonctionnement à vitesse voulue et à couple élevé. La plupart des constructeurs proposent directement des motoréducteurs, ce qui garantit en principe une optimisation de fonctionnement de l'ensemble moteur - réducteur.

2.4.1.3 Variateur de vitesse

Au cours d'un cycle de fonctionnement (plongée-levage) il faut pouvoir régler la vitesse des masses. La dynamique du système a été illustrée à la figure 2.6. Les phases d'accélération et de décélération sont gérées grâce à de l'électronique de puissance. Le schéma d'un variateur de vitesse est représenté à la figure 2.13. En entrée avec un

réseau triphasé alternatif à 50 Hz et de tension fixe, le variateur a en sortie une tension triphasée de valeur efficace et de fréquence réglable. Le variateur est composé de 3 parties électroniques distinctes.

- Un redresseur. Cette partie redresse la tension alternative triphasée
- Un étage continu intermédiaire avec un condensateur de lissage
- Un onduleur. La tension continue est retransformée en tension alternative de valeur efficace et de fréquence réglables.

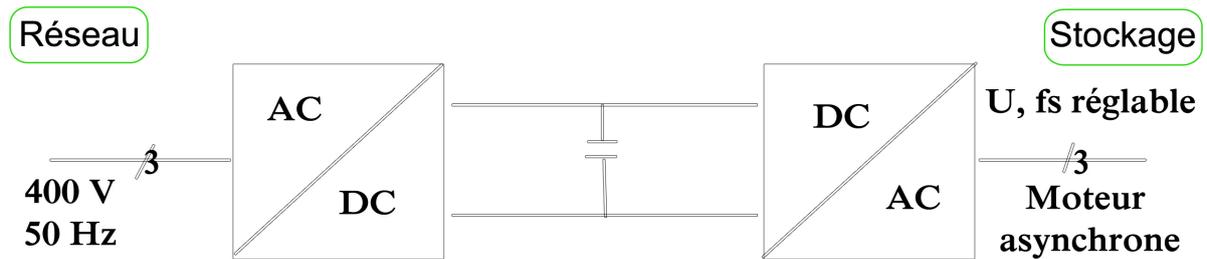


FIGURE 2.13 – Représentation schématique d'un variateur de vitesse

2.4.1.4 Transformateur

De par ses puissances mobilisables (lesquelles sont, en pratique, supérieures à 10 kVA), le système de stockage envisagé doit être raccordé au réseau de distribution moyenne tension. À cette fin, il est nécessaire d'ajouter un transformateur de tension entre le système de stockage et le réseau électrique moyenne tension. En effet, le système de stockage fonctionnerait à une tension domestique (400 V) alors que le réseau moyenne tension est à plus de 10 kV. Pour relier le réseau et le transformateur, un câble moyenne tension sera également nécessaire en fonction de la distance entre le système et le point de raccordement au réseau.

2.4.1.5 Divers

- La plateforme : Le système sera soumis à l'eau pendant toute sa durée de vie. Il est, dès lors, nécessaire de choisir des composants compatibles avec l'eau ou de placer les différents composants dans un caisson étanche à la surface de l'eau. C'est cette deuxième solution qui est retenue dans le cadre de ce projet. Il existe déjà, pour la maintenance des éoliennes off-shore, des caissons étanches standardisés résistant aux ambiances aquatiques[19].

- Les câbles d'amarrage : Ceux-ci doivent maintenir la plateforme à la position voulue dans la carrière, sans que celle-ci ne soit déviée par les vents ou les courants qu'il pourrait y avoir.

2.4.2 Configuration complète du système

Le système de "levage-plongée" peut être imaginé avec différentes configurations possibles, comportant chacune leurs avantages et inconvénients. Les configurations les plus plausibles vont être présentées au cours de cette section.

La première configuration (Figure 2.14) ne comporterait qu'un seul moteur contrôlé par un variateur. Pour cette configuration, si un bloc effectue une plongée, sa vitesse de plongée est contrôlée par le variateur pour obtenir la puissance désirée en sortie. Une fois la plongée complète effectuée, le treuil doit remonter vers la surface afin de pouvoir, si nécessaire, descendre un nouveau bloc. Durant ce temps de levage du treuil, aucune puissance n'est renvoyée vers le réseau et il faut par contre, en consommer pour pouvoir remonter le treuil. Cette configuration amène donc de longs temps morts pendant lesquels le système ne produit pas d'électricité.

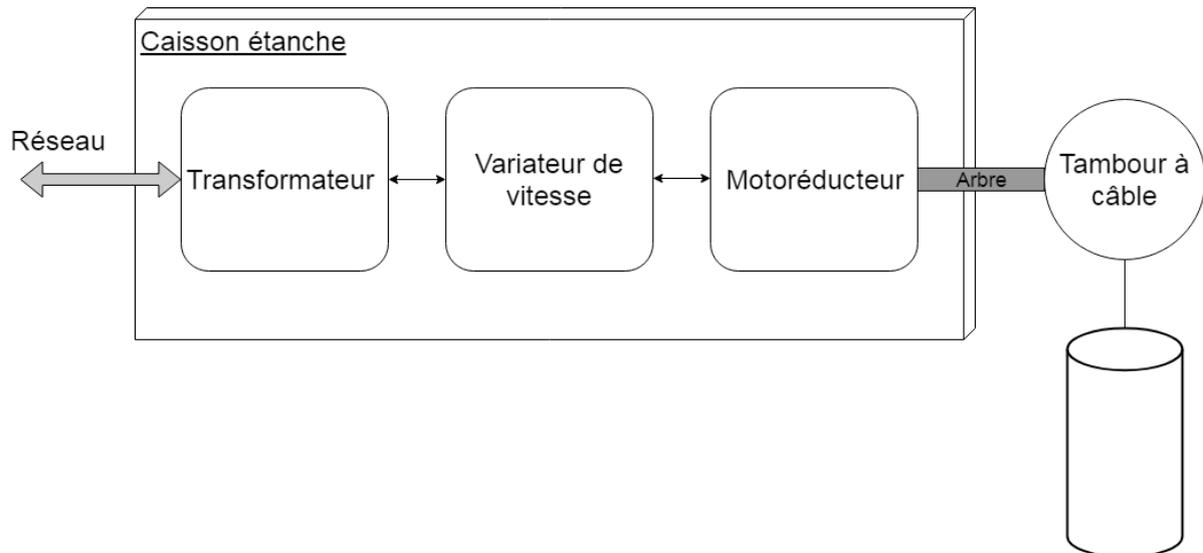


FIGURE 2.14 – Configuration comportant un seul moteur et un seul variateur

Afin de palier à ce problème de temps morts, il faut placer plusieurs moteurs en parallèle afin de pouvoir effectuer une plongée d'un bloc lorsque le treuil remonte vers la surface. Les deux configurations suivantes (figure 2.15) sont présentées pour deux moteurs en parallèle mais ce nombre pourrait être augmenté afin d'optimiser les plongées et levages de blocs.

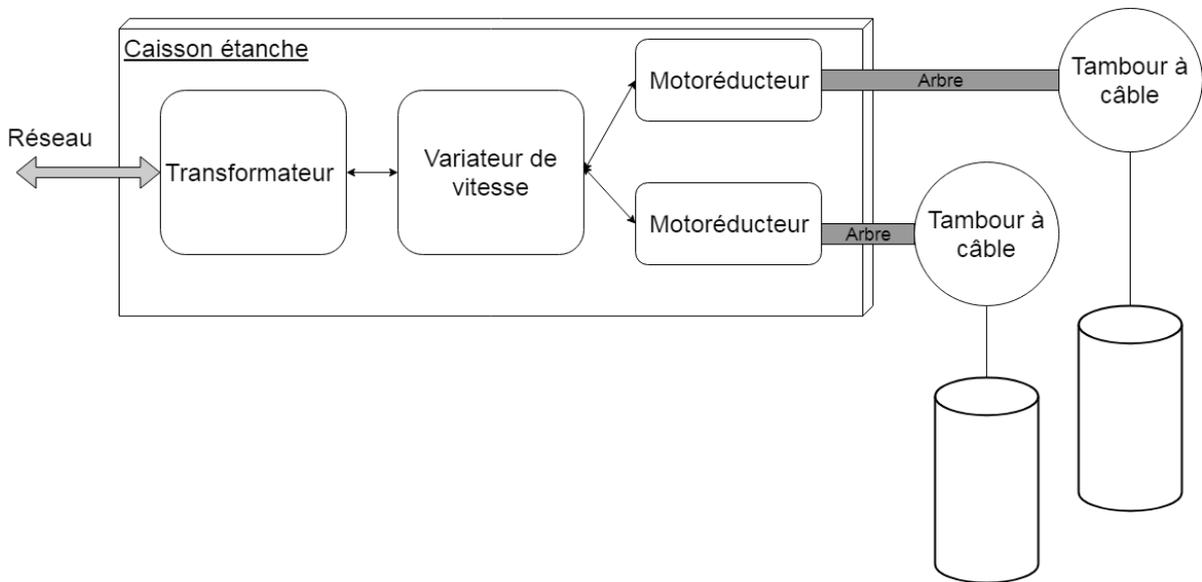
Pour contrôler les vitesses et donc les puissances transmises, on peut soit associer à

chaque moteur son variateur de vitesse, soit n'utiliser qu'un seul variateur de vitesse pour tous les moteurs. La première solution permettrait de régler très précisément la puissance qui transite, et la deuxième coûterait moins cher en nombre de variateurs de vitesse. La solution optimale se trouve entre ces deux situations. Il n'est pas utile de placer un variateur de vitesse pour chaque moteur, car cela augmenterait de façon considérable le coût du système. Il est cependant nécessaire d'avoir un minimum de deux variateurs de vitesse pour éviter tout temps mort. En effet lorsqu'un ou plusieurs blocs en parallèle effectueront une plongée, un ou plusieurs treuils devront remonter à la surface. Il faut au minimum avoir toujours disponibles un crochet à la hauteur de la surface et un crochet au fond du bassin. La consigne pour ces deux situations étant différente, il est nécessaire d'avoir deux variateurs de vitesse sur la plateforme.

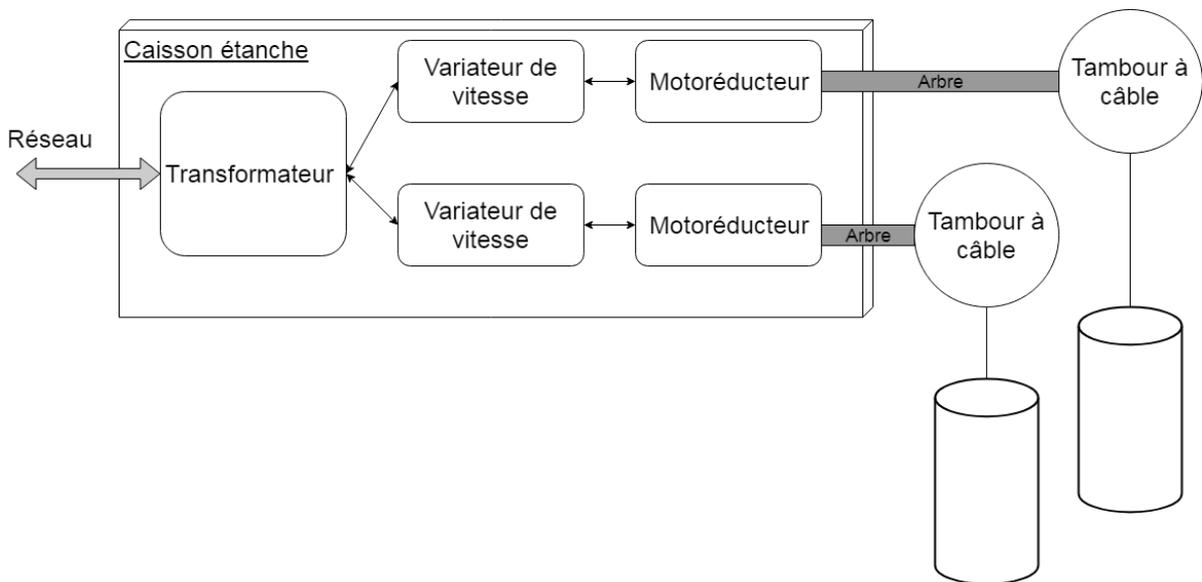
La configuration optimale retenue du système est donc constituée d'un transformateur. Il n'est pas nécessaire d'avoir plusieurs transformateurs. Viennent ensuite deux variateurs de vitesse. Chaque variateur de vitesse pourra avoir un ou plusieurs moteurs en parallèle. Augmenter le nombre de moteurs permet d'augmenter le nombre de blocs mobilisables en parallèle et donc la puissance du système disponible à chaque instant. Chaque moteur sera relié à un tambour à câble (treuil) et le câble pourra accrocher, ou non, un bloc.

2.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, un choix de matériaux potentiels pour les blocs peut être tiré. Grâce aux équations de forces développées, il est évident qu'il faut diminuer le coefficient de traînée des blocs afin de maximiser la puissance disponible. Le coefficient de traînée réel ne pourra atteindre le coefficient de traînée parfait d'un corps profilé mais peut s'en rapprocher en optimisant la forme donnée au matériau. Une autre remarque intéressante est que, si des gravats ou des déchets sont utilisés pour les blocs, les surfaces ne seront pas homogènes. Un gabion rempli de gravats laisse passer l'eau en son sein. La somme des contributions des traînées de chaque gravat sera inférieure à la traînée d'un bloc de même volume et homogène. Ce phénomène est dû à la pénétration dans l'eau et à la définition du coefficient de traînée. Il semble donc cohérent d'utiliser des matériaux issus de la récupération pour constituer les blocs du système. Ceux-ci sont moins coûteux, aussi cohérents en utilisation que du béton et offrent une revalorisation intéressante d'un déchet final.



(a) Plusieurs moteurs contrôlés par 1 variateur



(b) Chaque moteur est contrôlé par un variateur

FIGURE 2.15 – Configuration avec plusieurs moteurs en parallèle

Chapitre 3

Étude de la valorisation économique du système de stockage gravitaire via l'amélioration de l'auto-consommation d'un consommateur-producteur

Une première manière de valoriser le système de stockage gravitaire proposé réside dans l'amélioration de l'auto-consommation d'un consommateur (typiquement un industriel) disposant de sa propre production d'électricité d'origine renouvelable. En effet, à l'heure actuelle, ce type de clients revend son excédent de production à un prix bien inférieur à celui payé lorsqu'il doit acheter de l'électricité via le réseau électrique. Dans ce contexte, le principe de chargement de ce système de stockage serait d'origine renouvelable (éolien et/ou photovoltaïque principalement). Le but est de stocker cette énergie électrique qui est vendue à prix très faible lors de surplus de production, afin de l'utiliser plus tard quand la ressource renouvelable n'est pas ou peu disponible. La source d'énergie est gratuite mais un tel système possède un coût d'installation, de fonctionnement et de maintenance. Au cours de cette section, le coût total (CAPEX et OPEX) du système mais également la rentabilité de celui-ci et son temps de retour sur investissement vont être étudiés afin d'analyser la faisabilité d'un tel projet et le gain économique qui peut en découler (au-delà du gain énergétique). Il sera également intéressant de comparer ce système de stockage à d'autres systèmes déjà existants et commercialisés.

3.1 Coût du système de stockage gravitaire

3.1.1 CAPEX

Le CAPEX représente le coût d'investissement du système. C'est le prix à déboursier à l'achat une unique fois.

Les différents composants du système ont été développés au chapitre précédent. Certains coûts sont fixes quel que soit l'emplacement du système de stockage tandis que d'autres coûts sont variables en fonction du site, de la profondeur, de la puissance désirée, du temps de stockage, etc. Parmi les coûts fixes il y a :

- le transformateur
- le caisson étanche
- les deux variateurs de vitesse

Et parmi les coûts variables :

- le nombre de motoréducteurs
- le nombre de tambours à câble
- les câbles (longueur et nombre)
- les câbles d'amarrage (longueur)
- le nombre de masses
- le câble moyenne tension (pour le raccordement au réseau électrique)

Les différents composants sélectionnés sont des composants à prix standard. Les tableaux 3.1 et 3.2 donnent une estimation du coût final d'un tel système et n'est pas influencé par un quelconque partenariat qui pourrait être mis en place pour le développement commercial réel du système. Une approximation assez conséquente a été faite pour la conception des blocs. En effet, suite aux différentes idées de recyclage développées précédemment, la matière première serait gratuite. Il faut cependant compter les coûts de transport et de fabrication. Les coûts de transports peuvent, en pratique, être minimisés en récupérant des gravats locaux de la carrière par exemple.

Composant	Quantité	Prix/unité
Transformateur	1	7.000 €
Caisson étanche	1	2.000 €
Variateur de vitesse[13]	2	8.222 €
TOTAL		25.444€

TABLE 3.1 – Coûts fixes d'un système de stockage gravitaire

Posons X le nombre de motoréducteurs placés en parallèle. Ayant installé deux variateurs de vitesse pour réduire les temps morts, le nombre minimal de motoréducteurs nécessaires est de deux. Mais il peut être possible d'en placer plus afin d'augmenter la

puissance instantanée disponible lors des plongées.

Considérons h la profondeur du système. Pour des carrières belges typiques, cette profondeur peut varier entre 50 et 200 mètres[14].

D est la distance qui sépare le système de stockage du réseau moyenne tension. La carrière étant généralement reliée à celui-ci, l'ordre de grandeur du câble est d'une dizaine de mètres.

Enfin, le dernier paramètre variable important est M le nombre de blocs disponibles. Ce nombre peut théoriquement être infini. Pour être cohérent avec l'encombrement, ce nombre pourra varier de 50 à 500 masses.

Composant	Quantité	Prix/unité
Motoréducteur	X	10.000 €
Tambour à câble	X	500 €
Câble	X*h	4,14 €/m
Câble d'amarrage	4*h	4 €/m
Câble MT	D	20 €/m
Masses	M	≈50 €
TOTAL		$X(10500+4,14h)+16h+20D+50M$

TABLE 3.2 – Coûts variables d'un système de stockage gravitaire

En considérant X et D fixes : X=2 et D=10, l'impact de la profondeur et du nombre de masses sur le coût du système peut être analysé et donner une idée de l'évolution du coût avec l'évolution de l'énergie du système. Cette évolution est représentée à la figure 3.1 et permet de situer la gamme de prix d'un tel système. Afin de positionner ce coût par rapport à d'autres technologies concurrentes, la valeur du PowerPack batterie de Tesla a été indiquée sur le même graphique. Ainsi, à 210 kWh pour 60.000 €, la gamme de prix de ce type de batterie se révèle du même ordre de grandeur que le système de stockage gravitaire investigué dans ce travail.

Rappelons néanmoins que le coût actuel ne reprend que le CAPEX(c'est à dire le coût d'investissement du système). Dans une section suivante, l'OPEX (caractérisant les coûts opérationnels et de maintenance) sera développé.

De manière générale, le prix du système de stockage gravitaire en carrière oscillera entre 50 000 et 61 500 €(selon les profondeur et nombre de blocs sélectionnés). Pratiquement, l'énergie disponible augmente fortement avec la profondeur de la carrière et, dans ce contexte, il est plus intéressant de placer le nombre maximal possible de blocs.

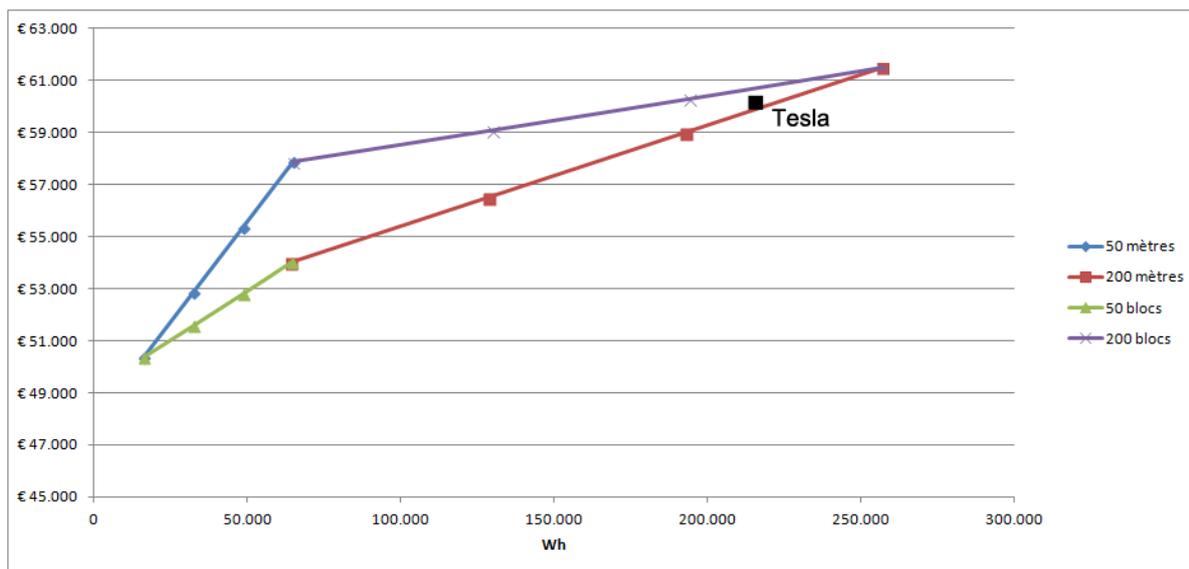


FIGURE 3.1 – Évolution du coût du système en fonction de l'énergie disponible en Wh pour différents nombres de blocs et profondeurs

3.1.2 OPEX

L'OPEX, contrairement au CAPEX, reprend des charges qui apparaissent tout au long de la durée de vie d'un produit/système. Ce sont les coûts d'exploitation, de maintenance,... Déterminer l'OPEX d'un système de stockage gravitaire pourrait constituer un projet à part entière tant il est complexe et fait intervenir nombre de composants et compétences différents.

De manière simplifiée et, vu que l'OPEX d'un système de pompage turbinage peut être approché par 1,5% du CAPEX[3], on peut estimer que l'OPEX d'un système de stockage gravitaire à masses solides sera proche de cette relation bien que légèrement moins important. Il semble en effet moins compliqué d'entretenir ce type de système. Dans le cadre de ce projet, l'OPEX est, dès lors, estimé de la façon suivante :

$$OPEX = 0,01.CAPEX \quad (3.1)$$

3.1.3 Coût total du système

Le coût total de ce système est donc dépendant du coût d'investissement initial ainsi que du coût opérationnel et de maintenance :

$$Cout = CAPEX + \sum_{t=0}^V (0,01 * CAPEX) \quad (3.2)$$

Avec V la durée du vie du système en années.

3.2 Revenus du système

Bien que ce système permette de stocker de l'énergie renouvelable de façon durable¹, il convient que celui-ci, de par son utilisation, soit rentable. Au cours de cette section, les différents revenus du système vont être répertoriés de manière à pouvoir réaliser une première estimation du temps de retour sur investissement.

Afin de pouvoir réaliser cette analyse économique en conditions réelles, différentes données photovoltaïque et éolienne ont été récupérées de différentes entreprises belges qui souhaiteraient investir dans pareil stockage gravitaire. Evidemment, l'idée n'est pas que ces entreprises soient directement à côté de la carrière. A ce titre, ORES développe actuellement le concept d'E-cloud[15] lequel permet d'investir dans des micro réseaux et de consommer virtuellement (sans connexion physique) l'énergie électrique produite dans ces derniers. Cette même idée de principe pourrait également être étendue aux systèmes de stockage. Une ou plusieurs entreprises d'un zoning industriel investiraient ainsi dans ce système même si la carrière est située à une centaine de kilomètres. Grâce à un dispositif adéquat de télécommunication le système se chargerait ou déchargerait en fonction du surplus renouvelable fictif au sein du micro réseau(en effet, en vertu des lois de Kirchhoff, l'électron issu des panneaux photovoltaïque n'ira pas alimenter directement le stockage gravitaire) et la facture du ou des industriels serait impactée positivement (principe de la ligne directe virtuelle).

3.2.1 Étude de rentabilité avec production de type photovoltaïque

Grâce à de nombreux logiciels disponibles sur le marché, la production photovoltaïque peut actuellement être assez bien estimée pour une année ou une journée. De plus, il est assez instinctif de se rendre compte que la production photovoltaïque n'a lieu uniquement en journée et qu'elle sera plus importante au milieu de la journée. La production photovoltaïque est donc typiquement représentée par une courbe en cloche (figure 3.2).

Cette courbe signifie qu'avec une telle installation, le système devra se charger jusqu'à 100% (tous les blocs sont remontés vers la surface) pendant le temps de cette cloche, et se décharger pendant la nuit. A l'optimal, le système de stockage pourrait, pendant toute la durée sans soleil, subvenir aux besoins énergétiques de l'entreprise. Ce scénario paraît assez utopique dans la pratique mais il sera intéressant d'essayer d'utiliser au mieux la capacité de stockage disponible.

Faisons l'exercice et calculons le temps de retour sur l'investissement dans du sto-

1. Matériaux remplaçables contrairement aux batteries chimiques

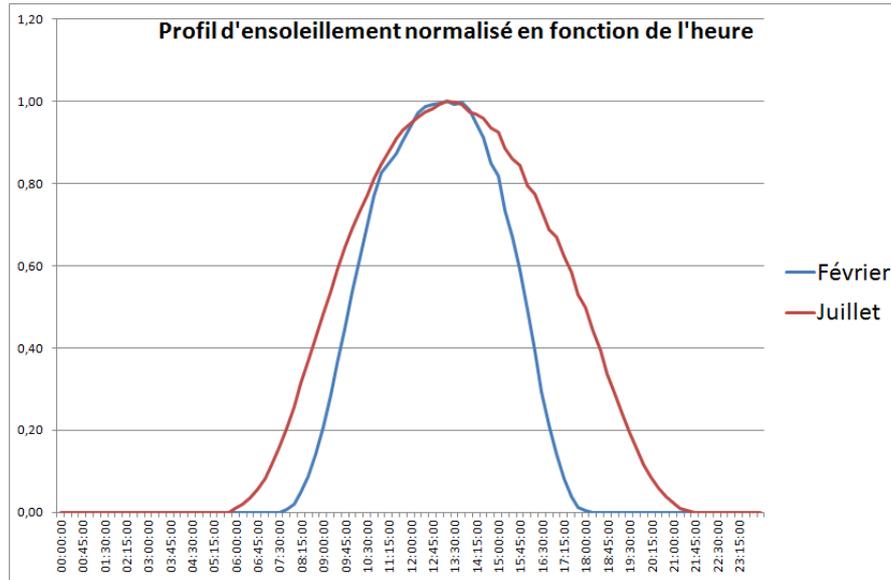


FIGURE 3.2 – Profils d’ensoleillement comparés pour juillet et février

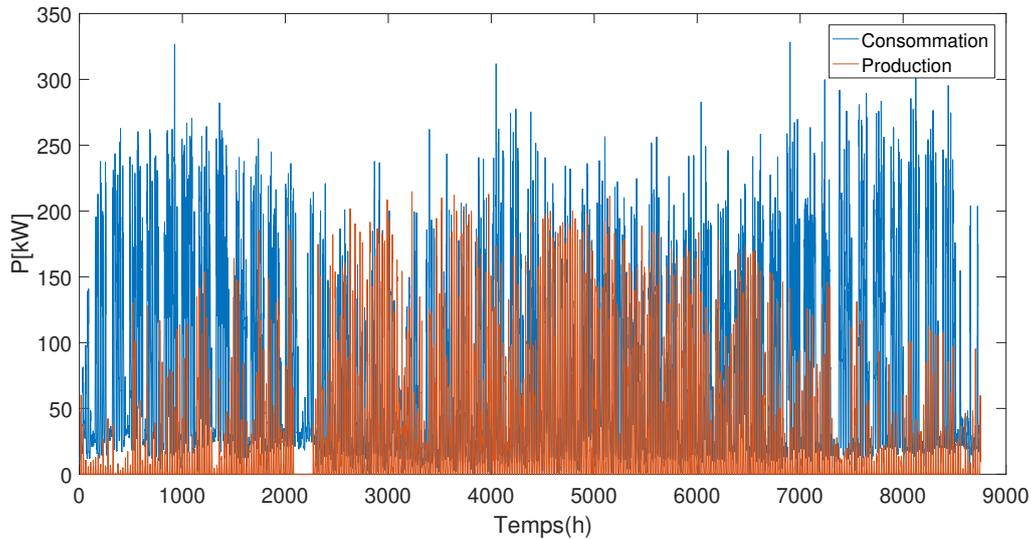
ckage gravitaire pour deux entreprises de nature différente (entreprise A : composée majoritairement de processus industriels et entreprise B : principalement constituée de bureaux) mais qui possèdent chacune une installation photovoltaïque.

3.2.2 Entreprise A

Pour cette entreprise, les données de consommation annuelle sont connues ainsi que la production photovoltaïque. L’analyse de revenu se passe en plusieurs étapes :

1. Obtenir les données en horaires de production et de consommation
2. $(\text{Consommation} - \text{Production}) = \text{Énergie à acheter au réseau électrique (via un fournisseur d'électricité)}$
3. S’il n’y a pas assez de production, il faut acheter l’énergie supplémentaire au réseau : 0,14€/ kWh (prix d’achat "fournisseur" typique)
4. S’il y a un surplus, sans stockage il y a revente de l’électricité sur le réseau (au prix du marché de gros) : 0,04€/kWh
5. S’il y a un surplus avec stockage, le système se charge tant qu’il y a un surplus et que le système de stockage n’est pas chargé à 100%
6. L’énergie stockée sera réutilisée. Au lieu d’être revendue à très bas prix, elle permet d’économiser le prix d’achat plein à un moment de "pénurie" de production photovoltaïque

Ces différentes étapes sont illustrées dans le tableau résumé 3.31.



	Consommation 0,14€/kWh	Production	C-P	Acheté 0,14€/kWh	Revenu 0,04€/kWh	Quantité stockable (0,14 - 0,04)€/kWh
Wh	619.840	236.024	383.815	447.170	63.354	63.354
€	86.777,64€			62.603,80€	2.534,18 €	6.335,45€

TABLE 3.3 – Données annuelles de consommation et production de l’entreprise A

Différentes conclusions et observations peuvent être tirées de ce tableau. La production photovoltaïque de cette entreprise permet globalement de diminuer la quantité d’électricité achetée au réseau. Il y a cependant une certaine quantité qui n’est pas utilisée quand elle est produite et est donc renvoyée sur le réseau tout en devant être rachetée au prix fournisseur lors d’un manque de production ultérieur. Cette quantité d’électricité se chiffre, dans notre exemple, à 63.354 Wh annuels et représente un manque à gagner de $63.354 \times (0,14 - 0,04) = 6335,45 \text{ €}$ par an lequel pourrait être récupéré via un système de stockage permettant de stocker l’excédant de production photovoltaïque en vue de l’utiliser lors de périodes de consommation plus importante (et de production photovoltaïque faible). Toutefois, il est important de mentionner que l’énergie maximale stockable du système gravitaire dépend du nombre de masses disponibles et qu’un compromis entre coût d’investissement (proportionnel au nombre de masses choisi) et capacité d’auto-consommation devra être trouvé. Une analyse de la quantité stockable a ainsi été effectuée pour un système à 100, 200, 300 et 400 blocs.

Rappelons que, d’après les graphiques de la figure 2.11(a), les blocs nécessitent une énergie plus ou moins importante pour être levés (levage vers la surface) et cette quantité d’énergie va déterminer le nombre de blocs qui pourront être ramenés en surface en fonction de l’énergie supplémentaire disponible.

Pour chaque pas de temps, la quantité de blocs stockables est calculée et sommée.

$$\text{Tant que (Consommation-Production)} < 0 \quad (3.3)$$

$$\text{Quantité stockable} = \frac{\text{Consommation-Production}}{\text{Energie d'un bloc}} \quad (3.4)$$

Il faut cependant vérifier que la quantité stockable ne dépasse pas le nombre de blocs disponibles du système auquel cas il y aura de l'énergie stockable perdue et directement revendue au réseau.

$$\text{Si (Quantité stockable)} > \text{nombre de blocs} \Rightarrow \text{Stock} = \text{nombre de blocs} \quad (3.5)$$

$$\text{Sinon} \Rightarrow \text{Stock} = \text{Quantité stockable} \quad (3.6)$$

Ces différentes équations sont illustrées sur un exemple d'une journée fictive au tableau 3.4.

Ce tableau reprend les différents cas qui peuvent se présenter.

Pour les lignes [1-3] la consommation est supérieure à la production. Il n'y a aucun surplus non consommé et donc aucune énergie à stocker.

Pour les lignes [4-6] la production est supérieure à la consommation. Le système va pouvoir commencer à stocker de l'énergie. Lors de l'heure 4, il y a assez d'énergie pour remonter à la surface (levage) 26 blocs possédant une énergie de 500 Wh, et ainsi de suite pour les heures 5 et 6. Au cours de ces 3 heures, le système aura été capable de remonter 113 blocs.

Le raisonnement pour les heures suivantes est identique.

Il est intéressant de se pencher, dès lors, sur la dernière colonne reprenant la quantité stockable en nombre de blocs. Dans l'exemple, le système aura été capable de stocker dans un premier temps 113 blocs, puis 24 et enfin 384. Le système ne dispose, cependant, pas forcément de cette capacité de stockage, et il est possible d'illustrer, le cas échéant, l'énergie "perdue" en raison d'un nombre de blocs disponibles insuffisants (cf. figure 3.5).

Les deux dernières lignes retransforment l'unité "bloc" en kWh et en € en considérant pour cette entreprise un coût d'achat "fournisseur" de 0,14 €/kWh et un prix de vente de 0,04 €/kWh. Les colonnes "perdu" représentent le manque à gagner (causé par les limites structurelles) du système. Par exemple, pour le premier cas, considérant une nombre maximal de blocs stockables de 100, si l'entièreté de l'énergie disponible avait été stockée, il y aurait eu un gain de 26,05€ (260,5 kWh * (0,14-0,04)€/kWh). Or, ce n'est pas le cas et il y a un manque à gagner en fin de journée de 14,85 kWh * (0,14-0,04)€/kWh, soit 14,85 €.

Heure	Consommation (kWh)	Production (kWh)	C-P (kWh)	Énergie disponible (kWh)	Bloc =500 Wh	Quantité stockable (bloc)
1	23,25	4,5	18,75	0	0	0
2	31,72	20,22	11,5	0	0	0
3	34,87	18,37	16,5	0	0	0
4	47,13	60,13	-13	13	26	0
5	17,35	51,1	-33,75	33,75	68	0
6	10,39	20,14	-9,75	9,75	20	113
7	19,12	3,37	15,75	0	0	0
8	23,25	0	23,25	0	0	0
9	18,75	0	18,75	0	0	0
10	17,25	0	17,25	0	0	0
11	19,25	0	19,25	0	0	0
12	21,25	0	21,25	0	0	0
13	22,75	0	22,75	0	0	0
14	41,81	42,31	-0,5	0,5	1	0
15	27,6	38,85	-11,25	11,25	23	24
16	20,95	14,2	6,75	0	0	0
17	72,85	35,35	37,5	0	0	0
18	109,34	73,09	36,25	0	0	0
19	59,76	116,76	-57	57	114	0
20	13,45	95,95	-82,5	82,5	165	0
21	38,36	83,11	-44,75	44,75	90	0
22	19,15	26,9	-7,75	7,75	16	384
23	4,11	2,11	2	0	0	0
24	21,75	0	21,75	0	0	0

TABLE 3.4 – Analyse de la quantité stockable sur 24 heures

Quantité stockable	Stock = 100 blocs		Stock=200 blocs		Stock=300 blocs	
	Stocké	Perdu	Stocké	Perdu	Stocké	Perdu
113	100	13	113	0	113	0
24	24	0	24	0	24	0
384	100	284	200	184	300	84
260,5 kWh 26,05€	112 kWh 11,20€	148,5 kWh 14,85€	168,5 kWh 16,85€	92 kWh 9,20€	218,5 kWh 21,85€	42 kWh 4,20€

TABLE 3.5 – Évolution en fonction du nombre de blocs disponible des revenus de l'exemple 3.4

Plus on augmente le nombre de bloc disponibles, plus le manque à gagner du système diminue. Cependant, augmenter le nombre de blocs augmente également le coût du système. Le temps de retour sur investissement trouve donc un optimum entre le coût d'investissement à déboursier au départ, le coût opérationnel, et le revenu espéré chaque année durant la durée de vie du système.

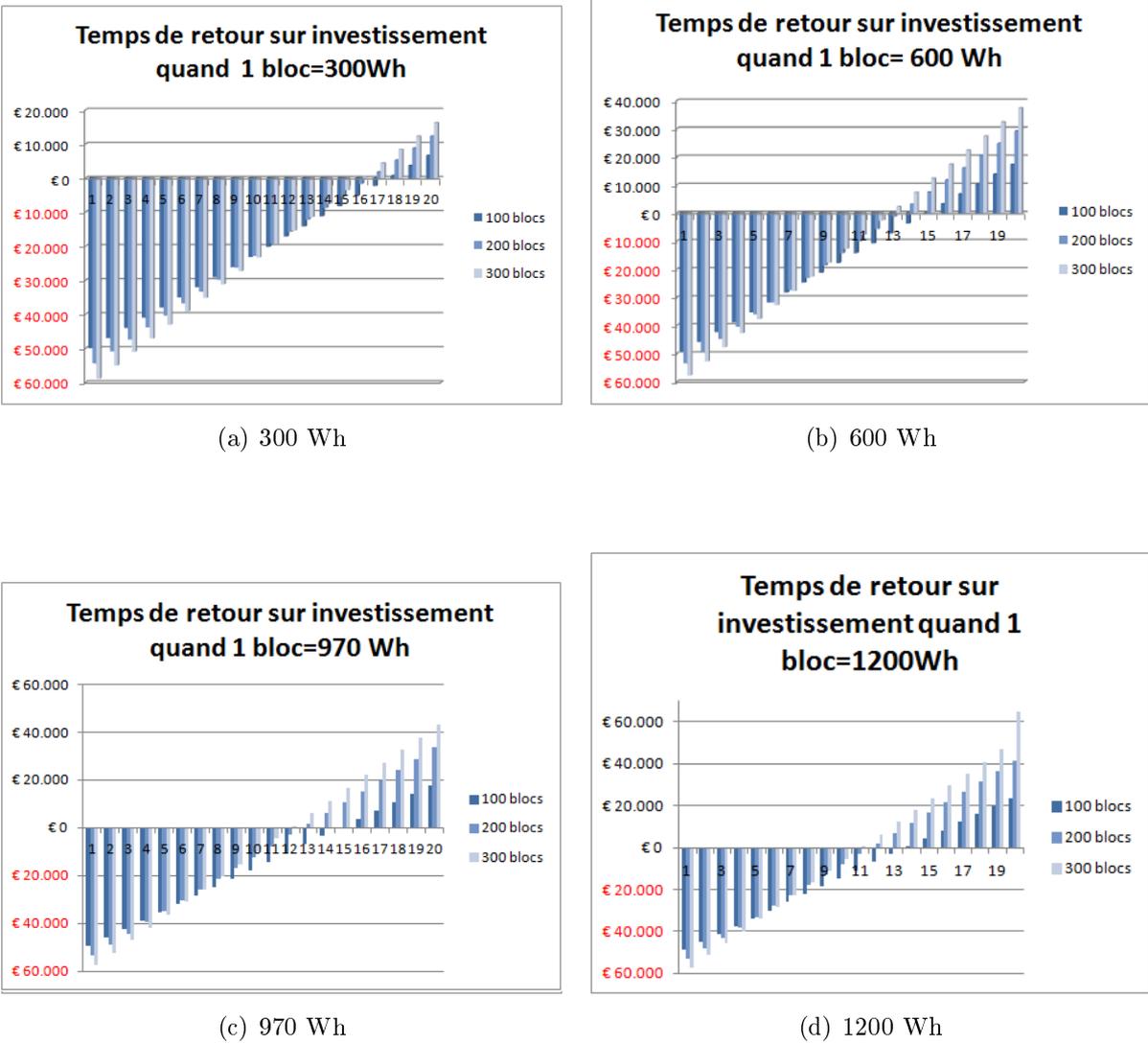


FIGURE 3.3 – Évolution du taux de retour sur investissement de l'entreprise A en fonction du nombre de blocs disponibles et de l'énergie de ces blocs

Toutes les étapes décrites ci-dessus ont été réalisées pour l'entreprise A à la figure 3.3, en utilisant les données d'une année complète (8760 heures) et en considérant les années suivantes identiques en consommation et production. Celles-ci ont été conduites successivement pour des blocs de 300, 600, 970 et 1200 Wh et pour un système comprenant

100, 200 et 300 blocs. Les énergies de 300, 600, 970 et 1200 Wh représentent, pour le cas de cette entreprise, des masses de 5000 kg à 50, 100, 150 et 200 mètres de profondeur.

3.2.3 Entreprise B

Afin de confirmer les résultats obtenus précédemment, il est intéressant d'effectuer la même analyse sur une entreprise B possédant d'autres types de consommation (principalement, de la bureautique) et productions. Les résultats sont repris dans le tableau 3.6 et la figure 3.4. Ces derniers sont globalement cohérents par rapport à ceux obtenus pour l'entreprise A.

	Consommation $0,14\text{€}/kWh$	Production	C-P	Acheté $0,14\text{€}/kWh$	Revenu $0,04\text{€}/kWh$	Quantité stockable $(0,14 - 0,04)\text{€}/kWh$
Wh	144028	122687	21341	33310	11969	11969
€	20.163€			4663,40 €	478,76 €	1196,90 €

TABLE 3.6 – Données annuelles de consommation et production de l'entreprise B

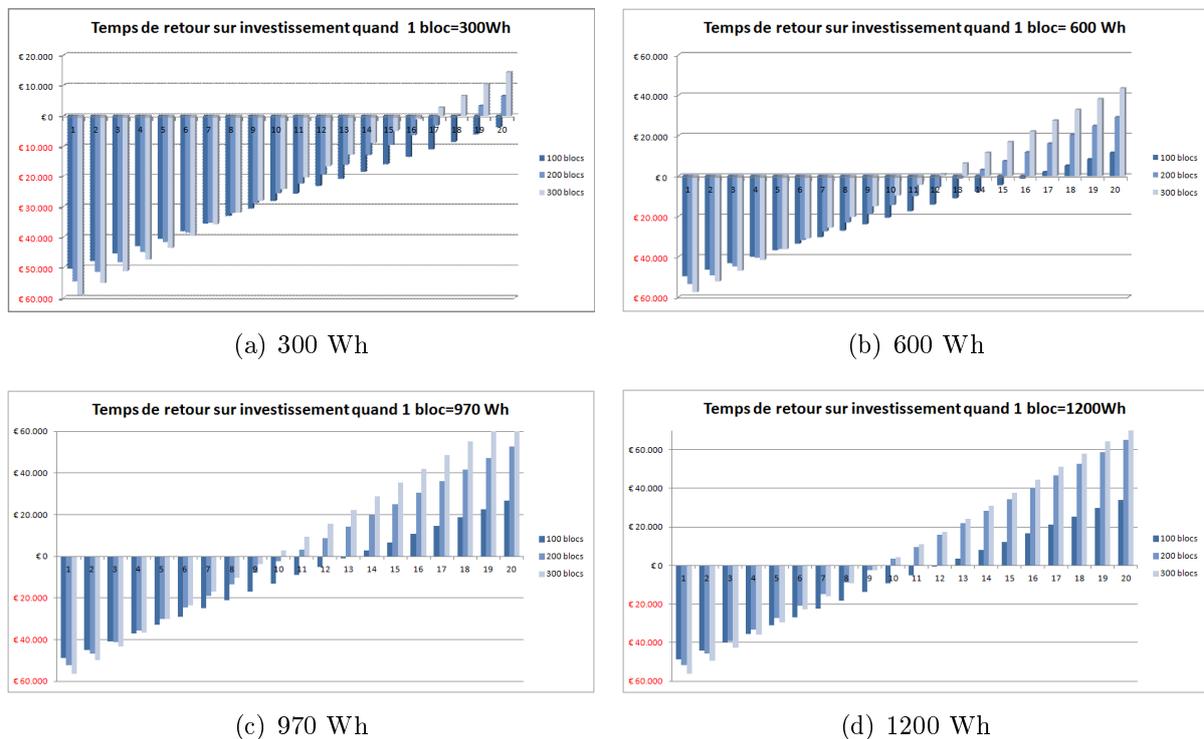


FIGURE 3.4 – Temps de retour sur investissement de l'entreprise B en fonction du nombre de blocs disponibles et de l'énergie de ces blocs

3.2.4 Étude similaire avec production de type éolien

Le profil de production éolien sur un site est moins prévisible que la production photovoltaïque (cycles "jour-nuit" clairement marqués). Les profils de vent sont a priori plus aléatoires. Des données annuelles de vitesses horaire de vent ont pu être récupérées pour l'entreprise A. Il est à constater que le principal caractère aléatoire se marque surtout au niveau des cycles journaliers. Il y a ainsi des journées très venteuses et d'autres, au contraire, très peu venteuses. Ce genre de production amène donc un plus grand manque à gagner pour les journées très venteuses et n'offre pas une bonne couverture de stockage lors de longs moments sans vent. Au final, le temps de retour sur investissement se rapproche du temps de retour sur investissement obtenu avec un production de type photovoltaïque. Ces temps de retour sur investissement sont représentés à la figure 3.5.

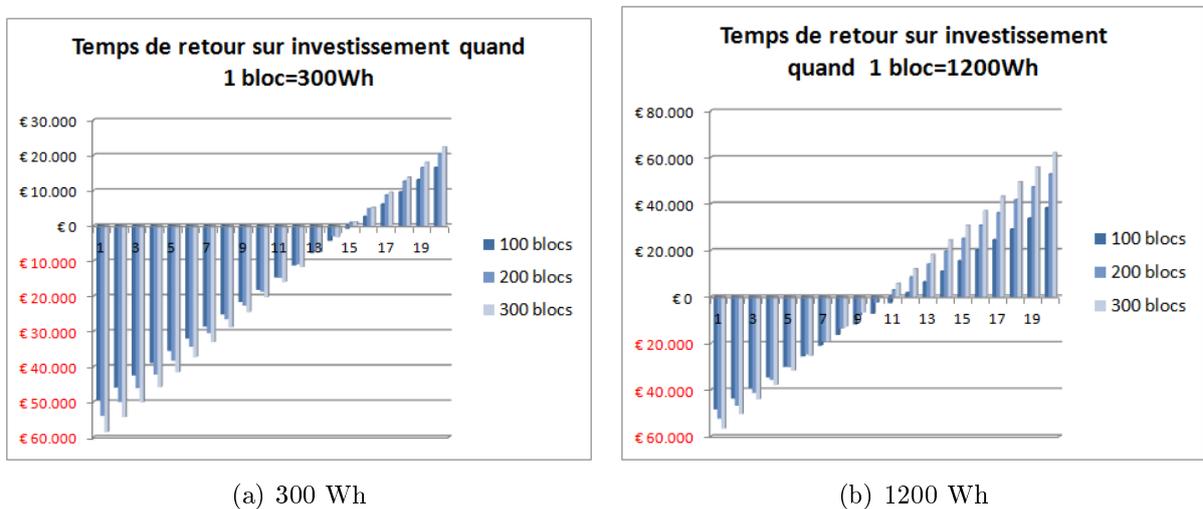


FIGURE 3.5 – Temps de retour sur investissement de l'entreprise A en fonction du nombre de blocs et de l'énergie des blocs pour une production éolienne

3.3 Conclusion

Ce chapitre a permis, à partir du coût du système, d'estimer le revenu qu'une entreprise pourrait espérer si elle installait un système de stockage d'énergie gravitaire en parallèle de sa production d'origine renouvelable. En augmentant l'auto-consommation du système, l'entreprise augmente son indépendance vis-à-vis du réseau, ce qui diminue la quantité d'électricité achetée au réseau.

Pour une entreprise A, issue du monde industriel, et une entreprise B reprenant des bureaux, les conclusions en autoconsommation avec une production de type photovoltaïques sont semblables. Bien que leurs consommations soient différentes, les produc-

tions photovoltaïques sont adaptées en conséquence et les installations permettent, l'une comme l'autre, un temps de retour sur investissement proche des 10 ans. De plus, l'étude effectuée pour l'entreprise A mais en considérant une production de type éolien conclut au même temps de retour sur investissement.

Ce chapitre permet de confirmer la faisabilité économique et l'avenir potentiel d'un tel système de stockage gravitaire en carrière sur le marché belge. Par ailleurs, la localisation de l'entreprise vis-à-vis d'une carrière n'est pas restrictive. En effet, à très court-terme, un système de partage virtuel d'électricité pourrait voir le jour en Wallonie. Ces micro-réseaux virtuels (dits E-Cloud) permettraient d'investir dans une énergie renouvelable (ou, dans ce cas, un système de stockage) qui n'est pas située à proximité directe de l'entreprise.

Dans ce contexte, une entreprise voulant investir dans ce système de stockage d'électricité sous forme d'énergie gravitaire ne devrait pas nécessairement posséder de bâtiment à proximité directe de la carrière ou du point d'eau où elle déciderait d'implanter le système.

Chapitre 4

Valorisation de la station de stockage via un processus d'arbitrage sur les marchés de l'électricité

Lors du chapitre précédent, la valorisation visait à augmenter l'auto-consommation d'une entreprise disposant d'une unité de production (vision micro-réseau). Dans le cas présent, une autre opportunité de valorisation du dispositif de stockage gravitaire est investiguée. Il s'agit ici de se placer dans la peau d'un investisseur qui achète ce type de station et décide d'en tirer profit en vendant son électricité stockée quand le prix du marché est élevé et en stockant cette électricité lorsque le prix est faible. Pareille procédure de valorisation est appelée communément processus d'arbitrage.

Ainsi, au cours de cette section, deux algorithmes sont présentés offrant cette optimisation dans deux situations différentes :

- Optimisation du nombre de blocs disponibles, arbitrage de stockage ou de déstockage des blocs en fonction d'un prix fixé
- Optimisation du nombre de blocs disponibles, arbitrage de stockage ou de déstockage en fonction du prix

4.1 Arbitrage de stockage ou de déstockage en fonction d'un prix fixé

Les informations connues pour cet algorithme sont les valeurs horaires du prix d'achat de l'électricité (sur le marché belge) au MWh pour l'année 2016. Cela représente 8760 données (une année comprenant 8760 heures). L'algorithme travaille donc sur 8760 pas de temps.

Pour ce premier algorithme, la décision de stocker de l'énergie sous forme gravitaire ou de déstocker est déterminée par un prix fixé par l'utilisateur. Pour l'année 2016, la moyenne des prix vaut 35€/MWh. Il a donc été indiqué à l'algorithme de stocker (de remonter les blocs vers la surface) lorsque le prix du marché est inférieur à 35 et de déstocker quand le celui-ci est supérieur à 35.

A la fin de l'année, le gain est la puissance qui a pu être épargnée en déstockant, diminuée de la puissance qui a dû être achetée en stockant. L'expression du gain peut s'écrire de la manière suivante :

$$\text{Gain}(t) = \text{prix}(t) * P_{\text{Déstockage}}(t) - \text{prix}(t) * P_{\text{Stockage}}(t) \quad (4.1)$$

La première contrainte de ce système concerne le nombre de blocs stockés. Celui-ci sera dépendant de la consigne de puissance à stocker ou déstocker à chaque pas de temps. De plus, ce nombre de blocs doit rester inférieur ou égal au nombre de blocs disponibles du système, et bien évidemment supérieur à zéro.

Le nombre de blocs disponibles du système (N_{max}) est l'inconnue de cette optimisation. C'est cette variable qui dimensionne le coût du système, mais également le revenu car elle est une image de la capacité du système de stockage d'énergie gravitaire.

Chaque bloc remonté à la surface nécessite une énergie. Aux chapitres précédents, nous avons fait l'hypothèse que, à vitesse faible (inférieure à 7 m/s) cette énergie pouvait être considérée constante. Le nombre de blocs stockables ou déstockables à chaque pas de temps dépend de la puissance disponible et de l'énergie que nécessite chaque bloc :

$$N_{\text{Stockables}}[t] = \frac{P_{\text{Stockage}}(t) \cdot \Delta t}{E_{\text{Stockage/bloc}}} \quad (4.2)$$

$$N_{\text{Déstockables}}[t] = \frac{P_{\text{Déstockage}}(t) \cdot \Delta t}{E_{\text{Déstockage/bloc}}} \quad (4.3)$$

L'expression des blocs stockés (remontés à la surface) peut s'écrire comme suit :

$$N[t] = N[t - 1] - N_{\text{Déstockables}}[t] + N_{\text{Stockables}}[t] \quad (4.4)$$

$$\text{Avec } N[t] \leq N_{\text{max}} \quad (4.5)$$

Les puissances de stockage ou de déstockage dépendent d'une variable binaire indiquant le stockage ou le déstockage du système :

$$\text{Si } \text{prix}(t) < \text{Prix limite} \Rightarrow Z_{\text{Charge}}(t) = 1 \quad (4.6)$$

$$Z_{\text{Décharge}}(t) = 0 \quad (4.7)$$

$$\text{Sinon} \Rightarrow Z_{\text{Charge}}(t) = 0 \quad (4.8)$$

$$Z_{\text{Décharge}}(t) = 1 \quad (4.9)$$

Et, à chaque pas de temps, le système décidera de charger (ou décharger) à la puissance maximale de charge (ou décharge) ou de ne rien faire si le système est complètement chargé (ou déchargé) :

$$P_{\text{Stockage}}(t) \leq P_{\text{maxStockage}} \cdot Z_{\text{Charge}}(t) \quad (4.10)$$

$$P_{\text{Déstockage}}(t) \leq P_{\text{maxDéstockage}} \cdot Z_{\text{Decharge}}(t) \quad (4.11)$$

Pour finir, la dernière chose à savoir pour l'algorithme est l'investissement en fonction de la valeur de Nmax. Le prix de chaque bloc a été estimé à 50 €. Comme l'algorithme travaille sur une année (2016), il faut ramener le coût CAPEX en coût annuel. Cela peut être fait grâce à la durée de vie du système et au taux d'actualisation de celui-ci. Les valeurs du CAPEX et de l'investissement annuel du système sont :

$$\text{CAPEX} = 50 * N_{\text{max}} + \text{Coût fixe} \quad (4.12)$$

$$\text{Investissement/an} = \frac{\text{CAPEX} * r}{1 - (1 + r)^{-V}} \quad (4.13)$$

Pour ce système de stockage d'énergie gravitaire, le taux d'actualisation r est fixé à 0,04 (taux d'actualisation typique d'un système de stockage) et la durée de vie V est estimée à 40 ans.

La fonction objectif finale de l'algorithme, sous les différentes contraintes qui ont été développées, est donc de maximiser sur l'année 2016 la différence entre le gain et l'investissement :

$$\text{Objectif} = \text{MAX} \left[\left(\sum_{t=0}^{8760} \text{Gain}(t) \right) - \text{Investissement/an} \right] \quad (4.14)$$

$$\Rightarrow \text{MAX} \left[\left(\sum_{t=0}^{8760} \text{prix}(t) * P_{\text{Déstockage}}(t) - \text{prix}(t) * P_{\text{Stockage}}(t) \right) - \frac{\text{CAPEX} * r}{1 - (1 + r)^{-V}} \right] \quad (4.15)$$

L'algorithme complet a été codé en Julia et exécuté avec le solveur Mosek. Le code est disponible à l'annexe B.1.

Les résultats obtenus par l'algorithme sont les suivants :

Fonction objectif	343,72
Nmax	750

L'investissement ayant été ramené par an, si l'entreprise investit dans un système de stockage d'énergie gravitaire avec 750 blocs. Dans ce cas, le CAPEX vaut 85386 € ce qui équivaut à un investissement par an de 4314 €. La fonction objectif vaut 343,72 € pour l'année 2016, ce qui représente le gain effectif du système pour cette année.

Afin de visualiser le stockage et déstockage des blocs en fonction du prix, cette évolution est illustrée pour 150 pas de temps à la figure 4.1 (de l'heure 1050 à l'heure 1200).

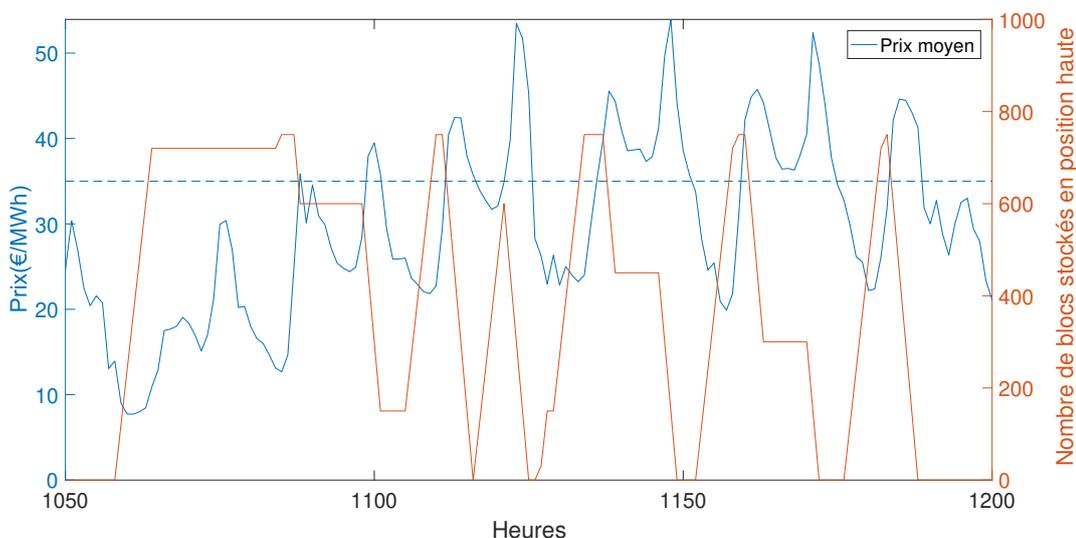


FIGURE 4.1 – Évolution des blocs stockés en fonction du temps en comparaison avec le prix de l'électricité

Lorsque la courbe prix dépasse le prix moyen, le système déstocke et le nombre de blocs stockés en position haute diminue. A l'inverse, quand le prix est situé en dessous du prix moyen, le système stocke et le nombre de blocs stockés en position haute augmente.

4.2 Optimisation de stockage ou de déstockage en fonction du prix de marché

Lors de l'algorithme présenté à la section précédente, le choix de stockage ou de déstockage des blocs du système dépendait d'une valeur fixe du prix. Lors de l'exemple appliqué de l'algorithme, ce prix avait été fixé à 35 €/MWh. Il semble cependant intéressant d'analyser l'impact sur la fonction objectif de ce prix de décision. L'algorithme d'optimisation présenté dans cette section fonctionne sur le même principe que l'algorithme précédent.

Cependant, les variables indiquant la charge et la décharge ne sont plus arbitrées par un prix fixé par l'utilisateur. Le système est libre de déterminer ces variables :

$$Z_{\text{Décharge}}[t] = \text{Binaire} \quad (4.16)$$

$$Z_{\text{Charge}}[t] = \text{Binaire} \quad (4.17)$$

$$Z_{\text{Décharge}}[t] + Z_{\text{Charge}}[t] \leq 1 \quad (4.18)$$

La dernière relation indique que le système ne peut être en charge et en décharge au même instant t .

La fonction objectif est identique à l'algorithme précédent :

$$\text{Objectif} = \text{MAX} \left[\left(\sum_{t=0}^{8760} \text{Gain}(t) \right) - \text{Investissement/an} \right] \quad (4.19)$$

$$\Rightarrow \text{MAX} \left[\left(\sum_{t=0}^{8760} \text{prix}(t) * P_{\text{Déstockage}}(t) - \text{prix}(t) * P_{\text{Stockage}}(t) \right) - \frac{\text{CAPEX} * r}{1 - (1 + r)^{-V}} \right] \quad (4.20)$$

Le code est disponible à l'annexe B.2. Les résultats obtenus par l'algorithme sont les suivants :

Fonction objectif	3578,5
Nmax	960

Différentes observations peuvent être faites par rapport aux résultats obtenus à la section précédente.

Dans un premier temps, le nombre de blocs disponible est supérieur. L'algorithme indique 960 blocs, ce qui correspond à un CAPEX de 95886 €. La fonction objectif pour une année complète vaut dans ce cas 3578 €, ce qui est largement supérieur à la valeur obtenue dans le cas qui était de 343,73 €. Cette première observation indique bien que le système est plus rentable s'il fonctionne de manière optimisée. L'investissement dans ce cas est plus conséquent puisqu'il faut mettre à disposition du système un nombre plus important de blocs mais le gain au final est également plus important.

Le graphique 4.2 présente l'évolution de stockage et déstockage des blocs en fonction du prix pour 150 pas de temps (identique au cas précédent). Si on compare cette dernière figure avec la figure 4.1, on remarque que le graphique issu du deuxième algorithme semble maximiser l'utilisation du système dès les premiers instants en maximisant le nombre de cycles de charge-décharge. Dans le cas du deuxième algorithme, le système n'est quasiment jamais à l'arrêt.

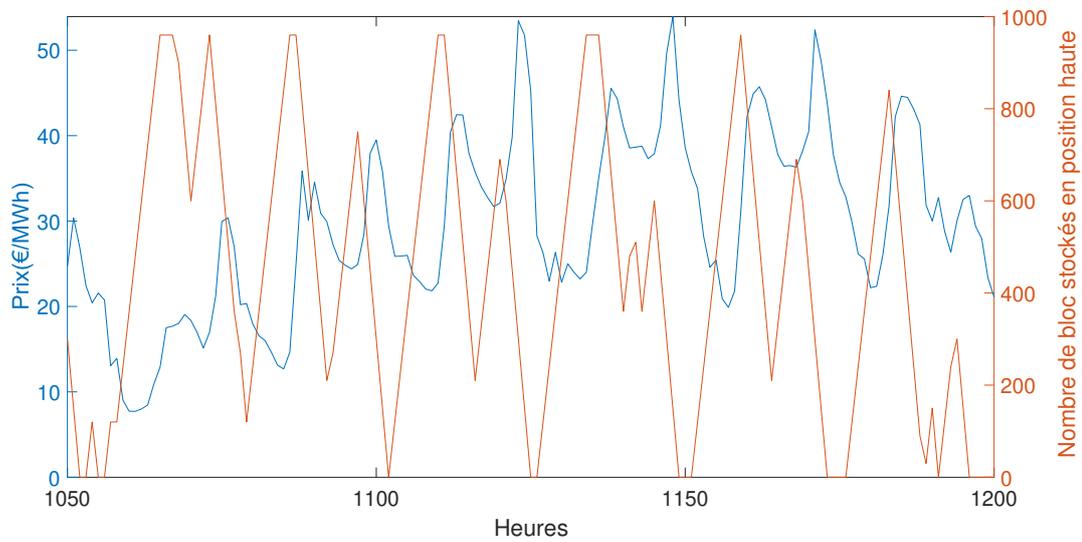


FIGURE 4.2 – Évolution des blocs stockés en fonction du temps en comparaison avec le prix de l'électricité

4.3 Conclusion

Ce dernier chapitre a permis de mettre au point un outil d'aide à la décision en vue de réaliser, à l'aide de la station de stockage gravitaire, de l'arbitrage sur le marché de l'électricité et d'ainsi rentabiliser au plus vite l'investissement initialement conduit. A terme, cet outil pourrait être transposé à l'optimisation du taux d'auto-consommation d'une entreprise disposant de ses propres moyens de production d'électricité.

Chapitre 5

Conclusion

En finalité, ce travail a permis de balayer la faisabilité physique, électrique, et économique d'un système de stockage d'électricité sous forme d'énergie gravitaire. Grâce à la gravité et à l'énergie potentielle que possède un corps, il est possible de stocker pour, ensuite, restituer l'électricité vers un consommateur.

Dans un premier temps, le fonctionnement physique de ce système de stockage a été développé. Des blocs, plongés dans un ancien site carrier, peuvent être montés (phase de "stockage") ou descendus (phase de "déstockage") entre la surface et le fond du bassin grâce à une machine électrique (fonctionnant en moteur lors des phases de levage et en générateur lors de la descente des blocs). Pratiquement, plus il y a de blocs à la surface du bassin, plus le système de stockage est chargé (comme une batterie). Dans le sens inverse, les blocs plongent vers le fond de la carrière en entraînant la machine électrique. Ils restituent alors, sous forme d'électricité, l'énergie potentielle préalablement emmagasinée (grâce à la machine électrique).

Il a fallu ensuite se positionner sur le matériau constituant les blocs solides. Ces blocs représentant la capacité du système de stockage, il fallait que le matériau soit dense (densité supérieure à l'eau pour ne pas flotter) tout en étant peu onéreux. Au terme du chapitre 2, un matériau classique, le béton, et différents matériaux issus de la récupération ont été sélectionnés. Le matériau dont les caractéristiques ont été retenues pour la suite du travail est le laitier d'aciérie. Celui-ci reprend l'intégralité des critères demandés et est issu de déchets de l'industrie, offrant donc une revalorisation intéressante.

Par la suite, les paramètres du système ont également été définis, tels que la puissance, l'énergie, les vitesses de fonctionnement, etc. Les mises en graphique de ces paramètres ont pu donner un premier aperçu sur la plage de fonctionnement d'un système de stockage d'énergie gravitaire. Ces paramètres ont également servi à dimensionner les composants nécessaires pour le fonctionnement complet d'un tel système tels que la ma-

chine électrique, le variateur de vitesse, les câbles, etc.

Les chapitres 3 et 4 ont permis d'évaluer l'intérêt économique pour une entreprise d'installer un système de stockage d'électricité sous forme d'énergie gravitaire. Dans le cas d'un fonctionnement du système en combinaison avec une source d'énergie renouvelable, cela consiste à essayer d'améliorer l'auto-consommation de l'entreprise. Les composants étant connus, une gamme de prix d'investissement (CAPEX) du système comprise entre 50.000 et 61.500,€ a pu être établie. Le retour sur investissement dépendra, lui, de l'emplacement de l'entreprise et de ses données de consommation et production. Ainsi, une analyse de rentabilité a été conduite pour deux entreprises différentes disposant successivement de productions photovoltaïque et éolienne. Il en ressort qu'un optimum d'investissement peut être trouvé pour chacune des entreprises. Cet optimum amène à des temps de retour sur investissement proches de 10 ans pour les 3 situations analysées. Ce temps de retour sur investissement est réaliste pour un système dont la durée de vie a été estimée à 40 ans, et constitue un réel argument de vente face à une entreprise désireuse d'investir dans un tel système.

Le dernier chapitre concernait également l'optimisation de rentabilité du système. L'idée pour ce dernier chapitre était de prendre les décisions de stockage/déstockage en fonction des prix de l'électricité du marché (on parle alors de valorisation du dispositif de stockage par arbitrage sur le marché de l'électricité). En stockant de l'électricité quand celle-ci est peu chère et en la revendant au réseau quand le prix est élevé, le système peut ainsi garantir un gain économique. Un algorithme a été développé afin de trouver l'optimum d'investissement et d'utilisation au cours du temps maximisant le revenu du système. La première approche était de stocker ou de déstocker en fonction d'un prix fixe qui a été fixé à 35 €/MWh. Pratiquement, en dessous de ce seuil, le système stocke et vice-versa. Ce fonctionnement s'est avéré rentable, le gain annuel pour l'entreprise qui investit est positif. Il y a cependant possibilité d'augmenter ce gain. En effet, en laissant le système décider lui-même du prix seuil et des cycles charge-décharge, la rentabilité a été augmentée d'un facteur non-négligeable. Ces deux algorithmes ont, au final, démontré que l'utilisation de ce type de système sur le réseau électrique était financièrement intéressante pour un tiers investisseur.

Ce travail de fin d'études a donc confirmé la cohérence, de par le contexte mondial de transition énergétique, d'un tel projet de stockage d'électricité sous forme d'énergie gravitaire tout en démontrant son intérêt technico-économique. Ce travail permet donc de mettre l'accent sur l'intérêt d'investir, pour un ou plusieurs industriels, dans un système de stockage d'électricité sous forme d'énergie gravitaire sur le marché belge, que ce système soit couplé à une production renouvelable afin de maximiser l'auto-

consommation d'une entreprise ou utiliser directement sur le réseau à des fins d'arbitrage sur le marché de "gros" de l'électricité.

Annexe A

CES EduPack

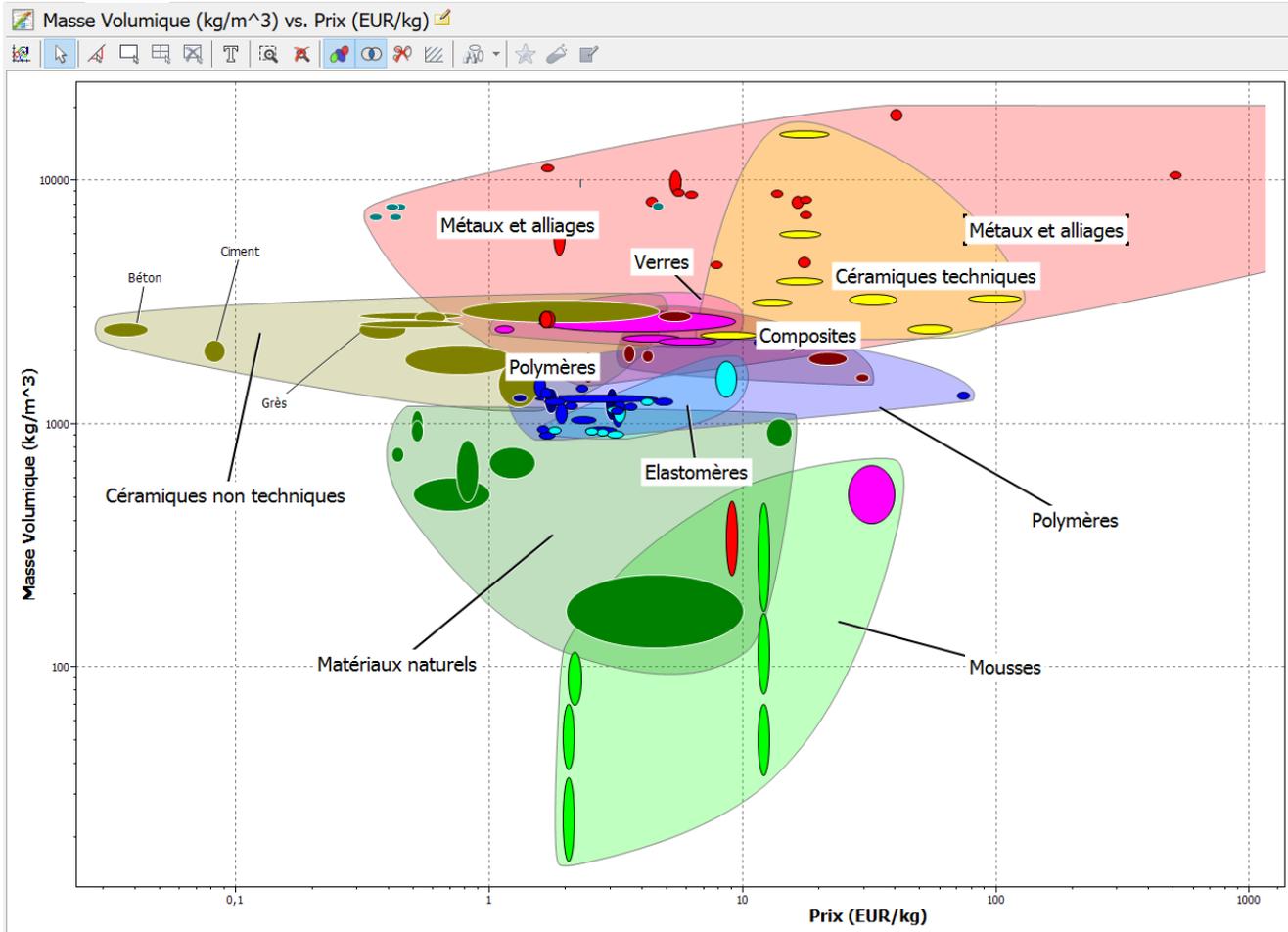


FIGURE A.1 – Différents types de matériaux classés en fonction de leur prix au kg et de la densité

Annexe B

Codes Julia (Python)

B.1 Algorithme 1

```
1 using DataFrames;
  using JuMP;
3 using Mosek;
  using MosekTools;
5 using CSV;

7 t=8760;
  h=150;
9 r=0.04;
  Pmax_dis=150;
11 Pmax_ch=120;
  Ngene=2;

13 valeur = zeros(t);

15 cd("C:\\Users\\Julia\\Documents");
17 prix = readtable("train.csv");
  prix=convert(Matrix, prix);

19 m = Model(with_optimizer(Mosek.Optimizer));

21 @variable(m, Nmax>=0); #Nombre de bloc
23 @variable(m, Z_dis[1:t]);
  @variable(m, Z_ch[1:t]);
25 @variable(m, Pdis[1:t]>=0); #Puissance de decharge
  @variable(m, Pch[1:t]>=0); #Puissance de charge
27 @variable(m, N[1:t]>=0);

29 for i=1:t
```

```

31     if prix[i] <= 35
32         @constraint(m, Z_ch[i] == 1) #Charge quand prix < 35
33         @constraint(m, Z_dis[i] == 0)
34     else
35         @constraint(m, Z_ch[i] == 0)
36         @constraint(m, Z_dis[i] == 1) #Decharge quand prix > 35
37     end
38 end
39
40 @constraint(m, Nminimum, 1000 >= Nmax >= 400); #Limiter le nombre de blocs
41     disponibles
42 @constraint(m, Blocs[i=1:t], N[i] <= Nmax); #Le nombre de blocs stocke doit
43     toujours etre inferieur au nombre de blocs disponibles
44 @constraint(m, Blocsinit[i=1:t], N[1] == 0);
45 @constraint(m, Pdecharge[i=1:t], Pdis[i] <= Z_dis[i] * Pmax_dis * 0.001) #
46     Puissance renvoyee lors de la decharge
47 @constraint(m, Pcharge[i=1:t], Pch[i] <= Z_ch[i] * Pmax_ch * 0.001) #Puissance
48     demandee lors de la charge
49 @constraint(m, Blocs2[i=2:t], N[i] == N[i-1] + Pch[i] * 1000 - Pdis[i] * 1000); #en
50     considerant 1000W pour remonter 1 bloc
51
52 Capex = 50 * Nmax + Ngene * (10500 + 4.14 * h) + 25644;
53 invest = Capex * r / (1 - (1 + r) ^ (-40));
54
55 @objective(m, Max, sum((prix[i] * Pdis[i] - prix[i] * Pch[i]) for i in 1:t) -
56     invest)
57
58 JuMP.optimize!(m)
59 obj_value = JuMP.objective_value(m)
60
61 println("Objective value: ", obj_value)
62 println("Nmax: ", value(Nmax))

```

optiprix_rapport.jl

B.2 Algorithme 2

```

1 using DataFrames;
2 using JuMP;
3 using Mosek;
4 using MosekTools;
5 using CSV;
6
7 t = 8760;
8 Ngene_max = 10;

```

```

9 h=150;
  r=0.04;
11 Pmax_dis=150;
  Pmax_ch=120;
13 Ngene=2;

15 cd("C:\\Users\\Julia\\Documents");
  prix = readtable("train.csv");
17 prix=convert(Matrix, prix);

19 m = Model(with_optimizer(Mosek.Optimizer));

21 @variable(m, Nmax>=0); #Nombre de blocs
  @variable(m, Z_dis[1:t], Bin); #Variable binaire de decharge
23 @variable(m, Z_ch[1:t], Bin); #Variable binaire de charge

25 @variable(m, Pdis[1:t]>=0); #Puissance de decharge
  @variable(m, Pch[1:t]>=0); #Puissance de charge
27 @variable(m, N[1:t]>=0);

29 @constraint(m, Nminimum, 1000>=Nmax>=400);
  @constraint(m, Blocs[i=1:t], N[i]<=Nmax);
31 @constraint(m, Blocsinit[i=1:t], N[1]==0);
  @constraint(m, Binaire[i=1:t], Z_dis[i]+Z_ch[i]<=1) #Systeme soit en charge
  soit en decharge
33 @constraint(m, Pdecharge[i=1:t], Pdis[i]<=Z_dis[i]*Pmax_dis*0.001)
  @constraint(m, Pcharge[i=1:t], Pch[i]<=Z_ch[i]*Pmax_ch*0.001)
35 @constraint(m, Blocs2[i=2:t], N[i]==N[i-1]+Pch[i]*1000-Pdis[i]*1000); #en
  considerant 1000W pour remonter 1 bloc

37 Capex=50*Nmax+Ngene*(10500+4.14*h)+25644;
  invest=Capex*r/(1-(1+r)^(-40));
39
  @objective(m, Max, sum((prix[i]*Pdis[i]-prix[i]*Pch[i]) for i in 1:t)-
  invest)
41
  JuMP.optimize!(m)
43 obj_value = JuMP.objective_value(m)

45 println("Objective value: ", obj_value)
  println("Nmax: ", value(Nmax))

```

Algorithme2.jl

Bibliographie

- [1] Elia. <https://www.elia.be>.
- [2] Wikipédia. Centrale de coo-trois-ponts — wikipédia, l'encyclopédie libre, 2018. [En ligne ; Page disponible le 6-août-2018].
- [3] Smartwater. pumped hydro storage. Technical report, Energinsere, 2016.
- [4] EnergyVault. <https://energyvault.ch/>.
- [5] STEVENS C. Business plan. Technical report, OGRES SinkFloat Solution, 2018.
- [6] Tesla. <https://www.tesla.com>.
- [7] Prof. Dr. Ir. G. COUSSEMENT. *Mécanique des Fluides, Livre de cours*. FPMs, 2014-2015.
- [8] Wikipédia. Aérodynamique — wikipédia, l'encyclopédie libre. <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=A2018>.
- [9] <https://www.holcim.be/fr/beton>.
- [10] <https://qlikbeton.be/>.
- [11] Le sable, une ressource en voie de disparition. *ConsoGlobe*, 27/12/2016.
- [12] Jean-Michel BEZAT. Les déchets nucléaires de faible activité, un marché attractif. *Le Monde*, 21/02/2019.
- [13] Les variateurs de vitesse. In *Energie +*. Architecture et Climat, Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI), Université catholique de Louvain (Belgique), réalisé avec le soutien de la Wallonie - DGO4.
- [14] E. POTY et E. CHEVALIER. *L'activité extractive en Wallonie*. Ministère de la Région wallonne.
- [15] ORES. <https://www.ores.be/entreprises-et-industries/faire-economies/e-cloud-cooperer-dans-les-zonings-pour-une-autoproduction-plus-efficace>.
- [16] Iain Dunning, Joey Huchette, and Miles Lubin. Jump : A modeling language for mathematical optimization. *SIAM Review*, 59(2) :295–320, 2017.
- [17] *Guide d'utilisation des matériaux lorrains en technique routière, Guide laitiers d'aciérie de four électrique*.

- [18] Déchets d'acierie et fonderie. <http://www.cd2e.com/node/299>.
- [19] <http://www.containersoffshore.com/>.
- [20] Laurent MONTALBANO. Les laitiers d'aciérie : Des matériaux industriels de qualité, pérennes et à usages multiples. ArcelorMittal Méditerranée, 17/06/2015.
- [21] La rédaction. Les laitiers d'aciérie : un matériau d'avenir! *Techniques de l'ingénieur Ingénierie et environnement en fonderie*, (ref. article : 10322), 28/07/2013.
- [22] Bernard DUQUET. Les déchets de fonderie réglementation. *Techniques de l'ingénieur Ingénierie et environnement en fonderie*, base documentaire : TIB354DUO.(ref. article : m3680), 2007. fre.
- [23] Confédération Construction Wallonne. *Les déchets de construction et de démolition, La gestion des déchets dans le CCT-BW*, 28/02/2013.
- [24] Prof. Fabienne DELAUNOIS. *I-META-022-Matériaux et environnement- gestion des déchets*. 2018. Service de Métallurgie, F.P.Ms.
- [25] Chloé PONSART. Contribution à l'étude et au dimensionnement d'un système de stockage d'énergie gravitaire à masses solides exploitant les profondeurs sous-marines. Faculté Polytechnique de Mons - UMons, 2018.
- [26] Husson M. Les besoins de stockage d'énergie. <http://www.etapenergie.com/stockage.html>, 2007.
- [27] Bernard Multon, Judicael Aubry, Pierre Haessig, and Hamid BEN AHMED. Systèmes de stockage d'énergie électrique. In *Technique de l'Ingénieur*, page BE8100. April 2013.
- [28] M. Delhay et O. Deblecker. *Théorie générale des machines électriques*, volume Tome II. Mutuelle d'Édition FPMS, 2011.
- [29] O. Deblecker. *Electronique de puissance*. Mutuelle d'Édition FPMS, 2014.
- [30] Prof. Jacques Lobry. *Réseaux électriques en régime*. FPMs, 2010.
- [31] Prof. Dr Ir Marc Delhay. *Machines synchrones*. Service de Génie électrique-FPMS, 2008-2009.