

Systèmes de Stockage d'Énergie par Gravité : Analyse Complète et Perspectives

Chapitre 1 : Dossier de Synthèse

1.0 Résumé Exécutif

La transition mondiale vers les énergies renouvelables intermittentes, telles que le solaire et l'éolien, a rendu le développement de solutions de stockage d'énergie à grande échelle plus critique que jamais. Pour garantir la stabilité du réseau et une alimentation électrique continue, il est impératif de pouvoir stocker l'énergie excédentaire produite lors des pics de production pour la restituer lors des pics de demande. Dans ce contexte, le stockage d'énergie par gravité (GES - Gravity Energy Storage) émerge comme un domaine d'innovation majeur, offrant une alternative mécanique et durable aux batteries chimiques conventionnelles.

Le stockage d'énergie par gravité est une technologie qui convertit l'électricité en énergie potentielle en soulevant une masse, puis reconvertit cette énergie en électricité en la laissant redescendre sous l'effet de la gravité. Bien que le pompage-turbinage hydraulique (PSH) domine le marché, représentant plus de 95 % de la capacité de stockage mondiale, de nouvelles approches utilisant des masses solides gagnent en visibilité. Les avantages stratégiques du GES résident dans sa longévité exceptionnelle (plus de 50 ans) et sa durabilité grâce à l'utilisation de matériaux abondants. Cependant, son adoption à grande échelle est freinée par des coûts d'investissement élevés et une faible densité énergétique qui nécessite des infrastructures massives. En conclusion, si le pompage-turbinage reste la seule technologie de stockage par gravité éprouvée à l'échelle du réseau, les systèmes émergents à masse solide, bien que prometteurs en termes de durabilité, doivent encore surmonter des obstacles économiques et de densité énergétique considérables pour prouver leur viabilité commerciale au-delà des projets pilotes.

Ce rapport propose une analyse détaillée des principes fondamentaux, des technologies existantes, des moteurs de marché et des défis stratégiques associés au stockage d'énergie par gravité, afin de fournir une vision claire de son potentiel dans le futur mix énergétique.

1.1 Le Principe Fondamental du Stockage d'Énergie par Gravité

La physique fondamentale du stockage par gravité, régie par l'équation simple $U = mgh$, est à la fois son plus grand atout et son défi le plus redoutable. Comprendre la relation directe entre masse, hauteur et énergie stockée est essentiel pour saisir pourquoi la mise à l'échelle de ces systèmes, du prototype au niveau du réseau, représente un défi d'ingénierie colossal.

Le principe de base du stockage d'énergie par gravité est la conversion d'une énergie électrique excédentaire en énergie potentielle gravitationnelle. Cela est accompli en utilisant l'électricité pour soulever une masse (qu'il s'agisse d'eau, de roches, de blocs de béton ou d'autres poids) à une certaine hauteur. L'énergie est alors stockée sous forme potentielle. Lorsque le réseau a besoin d'électricité, la masse est relâchée. En descendant sous l'effet de la gravité, elle actionne un générateur qui reconvertit l'énergie potentielle en énergie électrique.

Cette relation est décrite par la formule de l'énergie potentielle :

$$U = mgh$$

Où :

- U est l'énergie potentielle stockée (en Joules).



- m est la masse de l'objet soulevé (en kilogrammes).
- g est l'accélération due à la gravité (environ $9,8 \text{ m/s}^2$ sur Terre).
- h est la hauteur de levage (en mètres).

L'analyse de cette formule révèle que la capacité de stockage est directement proportionnelle à la masse et à la hauteur. Pour stocker une quantité significative d'énergie, il est donc nécessaire de soulever des masses extrêmement lourdes ou d'atteindre des hauteurs très importantes. Pour illustrer l'échelle, un bloc d'une tonne (1 000 kg) soulevé à 100 mètres ne stocke qu'environ 0,28 kWh, à peine assez pour faire bouillir une casserole d'eau. Cela souligne le défi d'ingénierie que représente le stockage à l'échelle du réseau, qui se mesure en mégawattheures (MWh) ou en gigawattheures (GWh).

Bien que le principe soit universel, sa mise en œuvre pratique a donné naissance à une gamme variée de technologies, chacune cherchant à optimiser le rapport entre la masse, la hauteur et le coût pour des applications spécifiques.

1.2 Panorama des Technologies de Stockage par Gravité

Le paysage des technologies de stockage par gravité est dominé par un acteur historique, le pompage-turbinage hydraulique, tandis que de nouveaux concurrents émergent pour répondre à des contraintes et des marchés différents. Cette section analyse la hiérarchie stratégique de ces technologies, de l'acteur établi aux nouveaux challengers.

1.2.1 L'Acteur Dominant : Pompage-turbinage hydraulique (PSH)

Le pompage-turbinage hydraulique est la technologie de stockage par gravité en place, mature et bancable. Représentant plus de 95 % de la capacité de stockage installée dans le monde, elle constitue la norme par rapport à laquelle toutes les autres solutions sont mesurées. Le mécanisme consiste à utiliser l'électricité excédentaire pour pomper de l'eau d'un réservoir inférieur vers un réservoir supérieur. Lorsque la demande d'électricité augmente, l'eau est relâchée et s'écoule à travers des turbines pour produire de l'électricité.

- **Avantages** : Le PSH est une technologie éprouvée, capable de stocker d'énormes quantités d'énergie (jusqu'à plusieurs GWh) et de fournir une puissance très élevée (plus de 1000 MW).
- **Inconvénients** : Sa mise en œuvre dépend fortement de la géographie, nécessitant des dénivelés importants et de grandes quantités d'eau. La construction de barrages et de réservoirs a également un impact environnemental significatif.

1.2.2 Les Principaux Challengers : Systèmes à poids soulevés (LWS)

Face aux contraintes géographiques du PSH, une nouvelle catégorie de technologies a émergé, cherchant à remplacer l'eau par des masses solides : les systèmes à poids soulevés (LWS). Ils représentent les concurrents les plus avancés commercialement, bien que reposant sur des modèles stratégiques distincts.

- **Grues et Blocs (ex: Energy Vault) : Le modèle "Construire Partout"** Le modèle d'Energy Vault utilise des grues pour soulever et empiler de lourds blocs, généralement en béton ou à partir de déchets, pour créer une tour ou remplir une structure de type bâtiment. Un prototype a été construit en Suisse, et une centrale commerciale de 100 MWh est devenue



opérationnelle à Rudong, en Chine, en 2024. Les critiques de ce système portent sur l'empreinte carbone potentiellement élevée du béton et sur les doutes concernant la stabilité structurelle à long terme.

- **Puits et Treuils (ex: Gravitricity) : Le modèle "Réutiliser l'Infrastructure Existante"**
Ce concept utilise des treuils pour lever et abaisser des poids lourds (de 500 à 5 000 tonnes) dans des puits profonds, en particulier des puits de mine désaffectés. L'utilisation d'infrastructures existantes vise à réduire les coûts de construction et l'impact environnemental. Un prototype de 250 kW a été mis en service à Édimbourg en 2021. Le potentiel mondial de cette technologie est estimé à 70 TWh si toutes les anciennes mines de charbon appropriées étaient réutilisées.

1.2.3 Systèmes de Niche ou Conceptuels

D'autres technologies, plus spécialisées ou encore au stade conceptuel, explorent différentes applications de la physique de la gravité, mais font face à d'importantes questions de viabilité et de mise à l'échelle.

- **Trains Gravitaires (ex: ARES)** Le système ARES utilise des trains lourdement lestés sur une voie ferrée en pente. L'électricité excédentaire est utilisée pour faire monter les trains, qui redescendent ensuite la pente pour produire de l'électricité via le freinage par récupération. Un projet de 50 MW est en construction au Nevada, utilisant des trains de 300 tonnes sur une voie de 9,2 km avec une pente de 7,2 %. Cependant, des analyses critiques soulignent que cette approche souffre d'une densité énergétique si faible qu'elle remet en question sa viabilité à l'échelle du réseau. Un système s'étendant sur près de dix kilomètres stockerait moins d'énergie (3,2 MWh) qu'un seul conteneur de batteries Tesla Megapack (3,9 MWh), une comparaison qui illustre le défi fondamental de la mise à l'échelle.
- **Systèmes à piston hydraulique (ex: Heindl Energy)** Ce concept consiste à excaver un énorme piston de roche cylindrique et à utiliser de l'eau pompée sous pression pour le soulever. L'énergie est restituée lorsque l'eau est libérée, faisant descendre le piston et actionnant des turbines. L'entreprise revendique un potentiel à l'échelle de plusieurs GWh, un rendement supérieur à 80 % et une durée de vie de plus de 60 ans. Cette technologie reste cependant conceptuelle et dépend de conditions géologiques très spécifiques ainsi que de travaux de génie civil d'une ampleur considérable.

Cette diversification des approches technologiques montre que le secteur cherche à surmonter les limites du PSH, bien que chaque nouvelle solution apporte son propre lot de défis techniques et économiques.

1.3 Analyse Stratégique : Moteurs de Demande et Défis

Pour comprendre la trajectoire future des technologies de stockage par gravité, il est crucial d'analyser les forces du marché qui stimulent la demande ainsi que les défis inhérents et les critiques qui freinent leur adoption.



Moteurs de Demande	Défis et Critiques
Besoin croissant de stockage longue durée pour stabiliser les réseaux électriques face à l'intermittence des énergies renouvelables.	Coûts d'investissement initiaux élevés , souvent supérieurs à ceux des batteries lithium-ion pour des capacités équivalentes.
Durabilité et longévité exceptionnelles (durées de vie de 50 à 60 ans ou plus), contrastant avec la dégradation chimique des batteries.	Faible densité énergétique , ce qui exige des infrastructures massives (grandes surfaces, hauteurs importantes) pour un stockage significatif.
Utilisation de matériaux abondants et recyclés comme la roche, l'eau, ou les déchets industriels, évitant les minéraux rares.	Contraintes géographiques et géologiques , le PSH nécessitant des dénivelés et les systèmes en puits des mines profondes ou une roche mère stable.
Soutien réglementaire et incitations gouvernementales croissants pour les solutions de stockage d'énergie afin d'atteindre la neutralité carbone.	Incertitudes technologiques et faible connaissance du marché pour les technologies émergentes, ce qui rend les investisseurs plus frileux.
Impact environnemental potentiellement faible , notamment en réutilisant des infrastructures existantes (mines) ou des matériaux de déchets.	Scepticisme des analystes sur la physique fondamentale et l'économie des systèmes à masse solide par rapport au PSH.

Compte tenu de ces moteurs et défis, le créneau de marché le plus probable pour les technologies GES non-PSH est le stockage de longue durée. Dans ce segment, leur longévité exceptionnelle et leurs faibles coûts opérationnels pourraient à terme l'emporter sur leurs coûts d'investissement élevés et leur rendement légèrement inférieur par rapport aux batteries lithium-ion, dont la durée de vie est limitée et le coût de remplacement élevé.

Chapitre 2 : Guide d'Étude

Ce guide est conçu pour vous aider à consolider votre compréhension des concepts clés liés au stockage d'énergie par gravité. En répondant aux questions du quiz, en réfléchissant aux sujets de dissertation et en vous familiarisant avec le glossaire, vous approfondirez votre connaissance de ce domaine technologique fascinant.

2.1 Quiz : Testez vos Connaissances

1. Quel est le principe fondamental derrière les systèmes de stockage d'énergie par gravité ?
2. Comment le pompage-turbinage hydraulique (PSH) utilise-t-il la gravité pour stocker de l'énergie ?
3. Nommez deux types différents de "Systèmes à poids soulevés" (LWS) mentionnés dans les sources.



4. Quel est le principal défi pour stocker des quantités d'énergie significatives en utilisant des masses solides dans une batterie gravitaire ?
5. Décrivez comment fonctionne le système de "stockage par gravité" de Heindl Energy avec un piston de roche.
6. Selon les sources, quel est un avantage clé des batteries gravitaires par rapport aux batteries chimiques comme le lithium-ion, notamment en ce qui concerne la durée de vie ?
7. Pourquoi les puits de mine désaffectés sont-ils considérés comme des emplacements potentiellement adaptés pour certains systèmes de stockage d'énergie par gravité ?
8. Quelle est la capacité de stockage d'énergie de l'installation d'Energy Vault à Rudong, en Chine, et quels matériaux sont utilisés pour ses blocs ?
9. Quel est le rendement énergétique aller-retour revendiqué pour le système ARES (trains gravitaires) ?
10. Quel rôle les batteries gravitaires sont-elles censées jouer dans le contexte de l'expansion des sources d'énergie renouvelables comme l'éolien et le solaire ?

Corrigé du Quiz

1. Le principe fondamental est la conversion de l'énergie électrique en énergie potentielle gravitationnelle en soulevant une masse, puis la reconversion de cette énergie potentielle en électricité en abaissant la masse. Ce processus exploite la force de gravité pour stocker et libérer de l'énergie.
2. Le PSH stocke de l'énergie en pompant de l'eau d'un réservoir inférieur vers un réservoir supérieur lorsqu'il y a un surplus d'électricité. Lorsque de l'énergie est nécessaire, l'eau est libérée du réservoir supérieur, s'écoulant à travers des turbines pour produire de l'électricité.
3. Deux types de LWS sont les systèmes utilisant des blocs soulevés par des grues (comme Energy Vault) et les systèmes utilisant des poids lourds soulevés par des treuils électriques dans des puits souterrains (comme Gravitricity).
4. Le principal défi est que l'énergie potentielle mécanique est relativement faible. Pour stocker de l'énergie à l'échelle du mégawatt, des masses extrêmement grandes sont nécessaires et des hauteurs de chute importantes, ce qui est difficile et coûteux à réaliser efficacement.
5. Le système de Heindl Energy fonctionne en séparant un grand piston de roche de la roche environnante. L'électricité excédentaire est utilisée pour pomper de l'eau sous ce piston, le soulevant. Lorsque de l'énergie est nécessaire, l'eau est libérée, permettant au piston de descendre et d'entraîner des turbines.
6. Un avantage clé des batteries gravitaires est leur très longue durée de vie. Des systèmes comme celui de Gravitricity promettent une durée de vie de 50 ans et Heindl Energy suggère plus de 60 ans, ce qui est nettement plus long que les batteries chimiques qui se dégradent en 10-15 ans.



7. Les puits de mine désaffectés sont considérés comme adaptés car ils offrent une profondeur significative, ce qui se traduit directement par une plus grande capacité de stockage d'énergie potentielle. L'utilisation de puits existants réduit également les coûts de construction et l'impact environnemental.
8. L'installation d'Energy Vault à Rudong, en Chine, a une capacité de stockage de 100 MWh. Ses blocs ont été fabriqués sur place à partir du sol excavé, mais l'entreprise indique qu'elle pourrait utiliser des déchets comme des cendres de charbon ou de vieilles pales d'éoliennes.
9. La société ARES revendique un taux de rendement énergétique aller-retour de 80 % pour son système de trains gravitaires.
10. Les batteries gravitaires visent à stabiliser le réseau en stockant l'énergie renouvelable excédentaire générée pendant les heures de pointe de production (soleil, vent) et en la restituant plus tard lorsque la demande est élevée ou la production faible.

2.2 Sujets de Réflexion et de Dissertation

1. Comparer et contraster le pompage-turbinage hydraulique (PSH) avec les technologies émergentes de stockage par poids soulevés (LWS) comme celles d'Energy Vault et de Gravitricity, en termes de principe opérationnel, d'impact environnemental, de scalabilité et d'exigences géographiques.
2. Analyser la viabilité économique des systèmes de stockage par gravité. Discuter des facteurs tels que les coûts d'investissement initiaux, la maintenance, la durée de vie opérationnelle et le rendement aller-retour. Comment ces facteurs influencent-ils leur compétitivité face aux solutions de stockage établies comme les batteries lithium-ion ?
3. Discuter du rôle du stockage d'énergie par gravité dans l'atteinte de la neutralité carbone mondiale et le soutien à l'expansion des sources d'énergie renouvelables. Quels défis spécifiques des énergies renouvelables les batteries gravitaires visent-elles à résoudre ?
4. Évaluer les défis d'ingénierie et logistiques associés à la conception, la construction et l'exploitation de systèmes de stockage par gravité à grande échelle. Considérer les aspects tels que l'approvisionnement en matériaux, l'excavation et le choix du site.
5. Explorer le concept de "scalabilité" dans le stockage d'énergie par gravité. Pourquoi est-il crucial d'atteindre une hauteur et une masse importantes, et quelles sont les limites pratiques rencontrées lors de la mise à l'échelle des différentes technologies de batteries gravitaires ?

2.3 Glossaire des Termes Clés

- **Stockage d'énergie par gravité (Gravity Energy Storage - GES) :** Type de dispositif de stockage qui conserve l'énergie sous forme d'énergie potentielle gravitationnelle, généralement en soulevant une masse, et la reconvertit en électricité lorsque nécessaire.
- **Énergie potentielle gravitationnelle :** Énergie qu'un objet possède en raison de sa position dans un champ gravitationnel. Elle est calculée par la formule $U = mgh$ (masse $\times$ gravité $\times$ hauteur).



- **Pompage-turbinage hydraulique (PSH)** : La forme la plus courante de stockage d'énergie à grande échelle, où l'eau est pompée entre deux réservoirs à des altitudes différentes pour stocker et produire de l'électricité.
- **Système à poids soulevés (LWS - Lifted Weight Storage)** : Catégorie de batteries gravitaires qui impliquent de soulever physiquement des masses solides lourdes (blocs de béton, poids spécialisés) pour stocker de l'énergie potentielle.
- **Train gravitaire** : Système de stockage d'énergie par gravité qui utilise des trains lourds sur des voies ferrées inclinées. L'énergie excédentaire fait monter les trains, et la gravité les fait descendre pour produire de l'électricité.
- **Rendement énergétique aller-retour (Round-trip efficiency)** : Rapport entre l'énergie déchargée d'un système de stockage et l'énergie qui y a été chargée, exprimé en pourcentage.
- **Densité énergétique** : Quantité d'énergie stockée par unité de volume ou de masse. Les systèmes de stockage par gravité ont généralement une faible densité énergétique.
- **Stabilité du réseau** : Capacité d'un réseau électrique à maintenir des paramètres stables (tension, fréquence) malgré les fluctuations de la production et de la consommation.
- **Services auxiliaires** : Services fournis au réseau électrique pour garantir sa stabilité et sa fiabilité, tels que la régulation de fréquence ou le soutien de tension.
- **Energy Vault** : Entreprise suisse développant une technologie LWS qui utilise des grues pour soulever et empiler de grands blocs.
- **Gravitricity** : Entreprise écossaise spécialisée dans une technologie LWS qui consiste à lever et abaisser des poids lourds dans des puits de mine désaffectés.
- **ARES (Advanced Rail Energy Storage)** : Système de stockage d'énergie qui utilise des trains lestés se déplaçant sur une pente pour stocker et libérer de l'énergie.
- **Heindl Energy (Stockage hydraulique sur roche)** : Concept de stockage par gravité utilisant un énorme piston de roche, soulevé par de l'eau pompée sous lui.
- **Coût actualisé du stockage (LCOS)** : Coût total d'un projet de stockage d'énergie sur sa durée de vie, divisé par la quantité totale d'énergie déchargée.
- **Capacité de démarrage autonome (Black Start Capability)** : Capacité d'un système de stockage à redémarrer sans dépendre du réseau électrique externe, cruciale après une panne générale.

Chapitre 3 : Foire Aux Questions (FAQ)

Cette section répond aux dix questions les plus courantes et importantes concernant les aspects pratiques, la viabilité et l'avenir du stockage d'énergie par gravité, en s'appuyant sur les informations disponibles.

1. **Quel est le principe de base du stockage d'énergie par gravité ?** Le principe consiste à convertir l'énergie électrique, généralement excédentaire, en énergie potentielle. Cela se



fait en utilisant l'électricité pour soulever une masse (comme de l'eau ou des blocs de béton) à une certaine hauteur. Pour récupérer l'énergie, la masse est abaissée, et la force de gravité la fait descendre, actionnant un générateur qui produit de l'électricité.

2. **Pourquoi le stockage d'énergie est-il essentiel pour les énergies renouvelables ?** Les sources d'énergie renouvelables comme le solaire et l'éolien sont intermittentes : elles ne produisent de l'électricité que lorsque le soleil brille ou que le vent souffle. Le stockage d'énergie permet de conserver l'électricité produite en surplus pendant ces périodes et de la restituer au réseau lorsque la production est faible mais que la demande est élevée, garantissant ainsi une alimentation électrique stable et fiable.
3. **Quelle est la différence fondamentale entre le pompage-turbinage et les systèmes plus récents à masse solide ?** La différence réside dans le milieu utilisé. Le pompage-turbinage hydraulique (PSH), la technologie dominante, utilise de l'eau pompée entre deux réservoirs. Les systèmes plus récents, comme ceux d'Energy Vault ou de Gravitricity, utilisent des masses solides, ce qui leur permet d'être potentiellement installés dans des endroits où la géographie ou la disponibilité en eau ne conviennent pas au PSH.
4. **Quels sont les principaux avantages du stockage par gravité par rapport aux batteries chimiques (durée de vie, matériaux) ?** Les deux principaux avantages sont la longévité et la durabilité des matériaux. Les systèmes de stockage par gravité ont une durée de vie opérationnelle très longue, souvent de 50 ans ou plus, sans perte de capacité, tandis que les batteries lithium-ion se dégradent et doivent être remplacées après 10 à 15 ans. De plus, ils utilisent des matériaux abondants (roche, eau, déchets) et n'ont pas besoin de minéraux rares ou de produits chimiques.
5. **Quels sont les principaux inconvénients du stockage par gravité ?** Les principaux inconvénients sont les coûts d'investissement initiaux élevés et la faible densité énergétique. Cette dernière n'est pas un simple inconvénient ; c'est le défi physique fondamental qui impose la construction d'infrastructures massives et coûteuses (barrages, tours immenses, puits très profonds) pour atteindre des capacités de stockage pertinentes pour le réseau électrique.
6. **L'utilisation d'anciens puits de mine pour le stockage est-elle viable ?** Oui, c'est une approche jugée très prometteuse. Les puits de mine désaffectés offrent une grande profondeur, idéale pour maximiser l'énergie potentielle stockée, tout en réutilisant une infrastructure existante. Cela réduit considérablement les coûts de construction et l'impact environnemental. Des entreprises comme Gravitricity développent activement cette solution.
7. **Quelle est l'échelle d'énergie qui peut être stockée (en comparant un système comme ARES ou Energy Vault au PSH) ?** L'échelle varie considérablement. Le PSH est la technologie reine pour le stockage à très grande échelle, avec des centrales capables de stocker plusieurs gigawattheures (GWh). Les systèmes émergents visent des échelles plus modestes : l'installation d'Energy Vault en Chine a une capacité de 100 MWh. Les systèmes comme ARES sont critiqués pour leur très faible densité énergétique ; un projet de 10 km de voie ne stockerait que 3,2 MWh, soit moins qu'un seul conteneur de batteries Tesla.



8. **Quel est l'impact environnemental de la construction de systèmes de stockage par gravité ?** L'impact varie selon la technologie. Le PSH peut être très perturbateur, impliquant la construction de grands barrages. Les systèmes à masse solide comme Energy Vault visent à utiliser des matériaux de déchets, mais les critiques soulignent l'empreinte carbone significative du béton utilisé dans les premiers projets. Les approches les plus vertueuses sont celles qui réutilisent des infrastructures existantes, comme les puits de mine.
 9. **Quel est l'état actuel du marché du stockage par gravité ?** Le marché est dominé par le PSH, une technologie mature. Les nouvelles technologies à masse solide sont pour la plupart au stade de prototype ou de premier déploiement commercial. Energy Vault a mis en service sa première centrale à grande échelle en Chine en 2024 et Gravitricity a testé son prototype en 2021, ce qui indique une transition de la théorie à la pratique, bien que le marché reste naissant.
 10. **Quels sont les arguments économiques à long terme en faveur du stockage par gravité ?** L'argument économique principal repose sur le coût actualisé du stockage (LCOS) sur une très longue période. Bien que l'investissement initial soit élevé, les coûts de maintenance sont faibles et la durée de vie de l'installation (50+ ans) est bien supérieure à celle des batteries. Sur le long terme, en ne nécessitant pas de remplacement coûteux, les batteries gravitaires pourraient devenir compétitives, en particulier pour le stockage de longue durée.
-

Chapitre 4 : Chronologie du Développement

Cette chronologie retrace les étapes clés de la conceptualisation, du développement et du déploiement des technologies de stockage d'énergie par gravité, des principes mécaniques anciens aux projets de réseau modernes.

- **1656** : Invention de l'horloge à pendule, un précurseur mécanique utilisant la gravité de manière contrôlée pour alimenter un mouvement.
- **1907** : Développement du premier système de pompage-turbinage hydraulique (PSH) en Suisse, marquant la naissance du stockage d'énergie par gravité à grande échelle.
- **1930** : Introduction de la technologie PSH aux États-Unis.
- **1979** : Mise en service de la centrale de PSH de Markersbach en Allemagne, capable de stocker jusqu'à 4 GWh.
- **2011** : Fondation de l'entreprise écossaise Gravitricity.
- **2012** : Développement du premier prototype fonctionnel de GravityLight, une lampe à petite échelle alimentée par la gravité.
- **2017** : Fondation de l'entreprise suisse Energy Vault.
- **2020** : Début de la construction de l'installation GravityLine d'ARES au Nevada.
- **2021** : Le prototype de 250 kW de Gravitricity entame ses opérations d'essai près d'Édimbourg.



- **2024** : L'installation de 100 MWh d'Energy Vault à Rudong, en Chine, devient opérationnelle.
 - **2027 (Prévision)** : Date de mise en service prévue pour les premiers systèmes commerciaux basés dans des mines par Gravitricity et Green Gravity.
-

Chapitre 5 : Liste des Sources

La liste suivante comprend les sources utilisées pour la compilation de ce rapport, formatées dans un style scientifique.

- Barnard, Michael. "Gravity Storage 101, Or Why Pumped Hydro Is The Only Remotely Real Gravity Storage." *CleanTechnica*, 10 juin 2024.
- Bombatkar, Abhishek, Sahil Gawande, & Shivam Mapari. "Gravity Based Energy Storage System." *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT)*, vol. 2, no. 5, mai 2022.
- DW Planet A. "How to use gravity to store energy." *YouTube*, [Date de publication non spécifiée, contenu à jour jusqu'en 2024].
- Enel Group. "Gravitational storage: old and new technologies for storing electricity." *EnelGroup.com*, 19 mars 2024.
- Heindl, Eduard. "Gravity Storage." Brochure, *Heindl Energy GmbH*, juillet 2017.
- Mishra, Dhirender. "Advancements in Gravity Energy Storage and Their Impact on Global Carbon Neutrality." *Energetica-India.net*, 26 février 2025.
- Railway Supply. "ARES Gravity Trains May Solve the Energy Storage Problem." *Railway.supply*, 5 janvier 2021.
- Reddit. "Is this even viable?" Discussion thread, *r/physicsgifs*, [Date non spécifiée].
- Study Guide. "Gravity Energy Storage Systems: A Study Guide." [Source non attribuée].
- Wikipedia. "Gravity battery." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, [Version consultée en juin 2024].

Ce document peut contenir des inexactitudes ; veuillez vérifier attentivement son contenu. Pour plus d'informations, visitez le site PowerBroadcasts.com

