

Les Energies

Dr. Oussama Kheireddine Nehar

Departement de Physique

Université de Djelfa - Algerie

Ver: 1.0 03/05/2025



Table des matières

Objectifs	4
I - Chapitre 02 : Stockage de l'énergie	5
1. Objectives.....	5
2. Introduction.....	5
3. Pré-acquis.....	6
4. Test de Pré-acquis	7
5. Production et demande d'énergie.....	8
6. Efficacité énergétique d'un stockage	9
7. Les grandes formes de stockage.....	9
7.1. Système de Transfert d'Énergie par Pompage.....	9
7.2. Stockage par air comprimé.....	10
7.3. Stockage de chaleur.....	11
7.4. Vecteur hydrogène	12
7.5. Les batteries.....	12
7.6. les super-condensateurs.....	14
7.7. Les volants d'inertie	14
7.8. Le stockage électromagnétique.....	15
8. Test du Chapitre 02.....	16
Crédits des ressources	17
Mentions légales	18

Objectifs

- **Compréhension des Fondamentaux de l'Énergie** : Comprendre les concepts de base de l'énergie, y compris les définitions, les unités de mesure (Joule, kWh, tep, etc.) et les lois physiques (premier et second principe de la thermodynamique) régissant la conversion de l'énergie.
- **Maîtrise de la Conversion des Unités d'Énergie** : Savoir convertir correctement les différentes unités utilisées dans le domaine énergétique pour comparer et analyser les données de manière cohérente.
- **Exploration des Sources d'Énergie** : Présenter les diverses sources d'énergie, y compris les combustibles fossiles, l'énergie nucléaire, les énergies renouvelables (solaire, éolien, biomasse, etc.) et leur disponibilité à l'échelle mondiale et nationale.
- **Connaissance des Ressources Énergétiques en Algérie** : Identifier et analyser les ressources énergétiques spécifiques à l'Algérie, notamment le gaz naturel, le pétrole, l'énergie solaire, ainsi que leur rôle stratégique dans l'économie et leur potentiel pour la transition énergétique.
- **Examen des Formes d'Énergie et des Processus de Conversion** : Comprendre les différentes formes d'énergie (mécanique, thermique, électrique, chimique) et les technologies permettant leur conversion (moteurs thermiques, turbines, générateurs, batteries, etc.).
- **Analyse des Solutions de Stockage d'Énergie** : Étudier les technologies de stockage (batteries, pompage hydraulique, hydrogène, air comprimé...) et leur rôle dans l'équilibrage de l'offre et de la demande, notamment en lien avec les énergies renouvelables.
- **Discussion sur l'Efficacité Énergétique et la Conservation** : Insister sur l'importance de l'efficacité énergétique et des pratiques de conservation pour réduire la consommation globale et les impacts environnementaux associés à la production d'énergie.

| Chapitre 02 : Stockage de l'énergie

1. Objectives

- **Définir** le concept de stockage de l'énergie et expliquer son importance.
- **Identifier** les trois besoins principaux auxquels répond le stockage de l'énergie (autonomie, décalage temporel, fluctuations).
- **Expliquer** le fonctionnement des différentes technologies de stockage d'énergie.
- **Décrire** les avantages et les inconvénients de chaque technologie de stockage d'énergie.
- **Choisir** la technologie de stockage d'énergie la plus appropriée pour une application donnée en fonction de ses caractéristiques et des besoins spécifiques.
- **Comparer et contraster** les différentes technologies de stockage d'énergie en termes de coût, d'efficacité, de durée de vie et d'impact environnemental.
- **Identifier** les facteurs clés qui influencent le choix d'une technologie de stockage d'énergie dans un contexte donné.
- **Concevoir** un système de stockage d'énergie adapté à un besoin spécifique en combinant différentes technologies.
- **Développer** un argumentaire en faveur du développement et de l'intégration des technologies de stockage d'énergie dans le mix énergétique.
- **Déterminer** quelles technologies de stockage d'énergie sont les plus prometteuses pour l'avenir en fonction des avancées technologiques et des besoins énergétiques futurs.

2. Introduction



Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Par extension, l'expression désigne également le stockage de matière contenant l'énergie.

Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes. L'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins, peut être restituée à un moment où la demande s'avère plus importante. Face à l'intermittence ou la fluctuation de production de certaines énergies, par exemple renouvelables, cette opération permet également de répondre à une demande constante.

Définition :

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. Par extension, le terme stockage d'énergie est souvent employé pour désigner le stockage de matière qui contient cette énergie.

Attention :

La maîtrise du stockage de l'énergie est particulièrement importante pour valoriser les énergies alternatives, telles que l'éolien ou le solaire, sûres et renouvelables, mais par nature intermittentes.

Fondamental :

Le stockage de l'énergie est utilisé pour répondre à trois besoins principaux :

- Le besoin de se déplacer avec sa propre source d'énergie, c'est le besoin d'autonomie.
- Le besoin de compenser le décalage temporel entre la demande en énergie et la possibilité de production.
- Le besoin de compenser les fluctuations d'intensité du courant délivré sur le réseau électrique, par exemple dans le cas des éoliennes.

Carte conceptuelle du module

3. Pré-acquis

En reprenant les acquis du Chapitre 1:

- **Formes d'énergie:** Avoir une compréhension claire des différentes formes d'énergie (mécanique, thermique, chimique, électrique, etc.) et de leurs transformations.
- **Sources d'énergie:** Être capable de distinguer les sources d'énergie renouvelables et non-renouvelables.
- **Unités de mesure:** Connaître les unités de mesure de l'énergie (Joule, Watt, etc.) et savoir les utiliser.

Nouveaux prérequis:

- **Notions d'électricité:** Avoir une connaissance de base des circuits électriques, du courant électrique et de la tension.
- **Principes de base de la mécanique des fluides:** Comprendre la pression, le débit et les principes de base du mouvement des fluides.
- **Conversions d'énergie:** Maîtriser les principes de conversion d'une forme d'énergie à une autre, en tenant compte des pertes potentielles.
- **Capacité à interpréter des schémas:** Être capable de déchiffrer des diagrammes simples illustrant des systèmes énergétiques.

En plus des connaissances techniques:

- **Réflexion sur les enjeux énergétiques:** Avoir une conscience des défis liés à la production, la distribution et la consommation d'énergie dans le monde actuel.

4. Test de Pré-acquis

Exercice 1 : Question 01

Quelle unité de mesure est utilisée pour exprimer la quantité d'énergie électrique consommée ?

- ☐ Volt
- ☐ Watt
- ☐ Kilowattheure
- ☐ Ampère

Exercice 2 : Question 02

Quelles affirmations sont vraies concernant le courant électrique ?

- ☐ Le courant électrique est le déplacement de charges électriques dans un conducteur.
- ☐ La tension électrique représente la force qui pousse les charges électriques à se déplacer.
- ☐ La résistance électrique s'oppose au passage du courant.
- ☐ Un circuit électrique doit toujours être fermé pour que le courant puisse circuler.

Exercice 3 : Question 03

Reliez chaque forme d'énergie à sa description :

Énergie stockée dans les liaisons chimiques
 Énergie associée au mouvement et à la position d'un objet
 Énergie liée à la température d'un corps
 Énergie associée au mouvement des électrons
 Énergie thermique
 Énergie chimique
 Énergie mécanique
 Énergie électrique

Exercice 4 : Question 04

Organisez les étapes suivantes de la production d'électricité dans une centrale hydroélectrique, de la première à la dernière étape :

1. L'eau met en mouvement une turbine.
2. L'énergie cinétique de l'eau est convertie en énergie mécanique.
3. L'eau stockée dans un barrage est libérée et s'écoule à travers une conduite forcée.
4. Un générateur convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

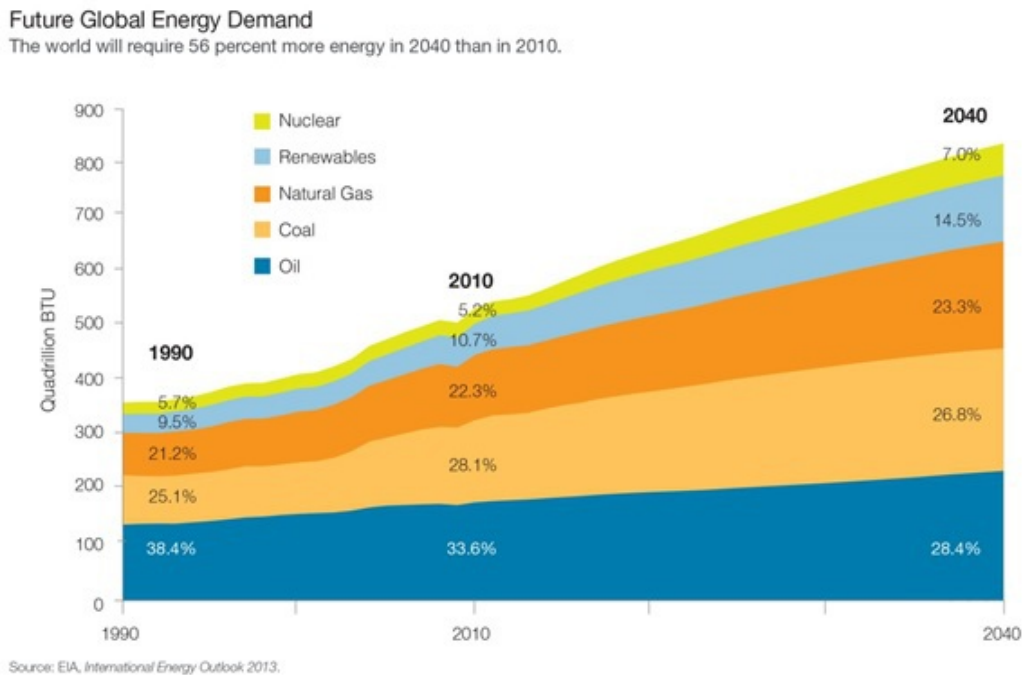
Réponse : ____

5. Production et demande d'énergie

🔗 Définition :

Production d'Énergie : La production d'énergie fait référence au processus de conversion de différentes formes d'énergie en une forme utilisable pour répondre aux besoins de consommation. Cela peut inclure la production d'électricité à partir de sources telles que le charbon, le gaz naturel, le vent, le soleil, l'eau, le nucléaire, ou la transformation de combustibles en chaleur ou en électricité. La production d'énergie peut avoir lieu dans des installations industrielles telles que les centrales électriques ou dans des installations de plus petite échelle, comme les panneaux solaires sur les toits ou les éoliennes.

Demande d'Énergie : La demande d'énergie fait référence à la quantité d'énergie nécessaire pour répondre aux besoins des consommateurs et des utilisateurs finaux. Cette demande peut varier en fonction de divers facteurs, tels que les conditions météorologiques, les activités industrielles, les habitudes de consommation, la croissance démographique et les progrès technologiques. La demande d'énergie est généralement exprimée en termes de quantité (par exemple, kilowattheures pour l'électricité) ou de puissance (par exemple, kilowatts pour la capacité de charge électrique). La gestion efficace de la demande d'énergie est essentielle pour assurer un approvisionnement stable et fiable tout en minimisant les coûts et les impacts environnementaux.



Graphique 1 Demande énergétique globale

La production mondiale d'énergie, englobant diverses sources telles que les combustibles fossiles, les énergies renouvelables et nucléaires, a atteint environ 173 000 térawattheures (TWh) en 2019. Les combustibles fossiles, comprenant le charbon, le pétrole et le gaz naturel, continuaient de dominer le mix énergétique, représentant la majorité de la production. Cependant, les sources d'énergie renouvelable, telles que le solaire, l'éolien, l'hydroélectricité et la biomasse, ont rapidement élargi leur présence, stimulées par la baisse des coûts, les progrès technologiques et les considérations environnementales. Malgré cette croissance, les combustibles fossiles restent des contributeurs essentiels à la production d'énergie mondiale, en particulier dans les régions fortement dépendantes du charbon et du pétrole pour la production d'électricité et les processus industriels. Parallèlement, la demande mondiale d'énergie s'élevait à environ 168 000 TWh en 2019, portée par l'augmentation des populations, les tendances d'urbanisation et le développement économique dans les économies émergentes. Les efforts pour améliorer

l'efficacité énergétique et promouvoir des pratiques durables ont été cruciaux pour atténuer la croissance de la demande d'énergie dans certains secteurs. À l'avenir, la transition vers des sources d'énergie plus propres devrait se poursuivre, avec les énergies renouvelables jouant un rôle de plus en plus important dans la satisfaction des besoins énergétiques mondiaux, tandis que les combustibles fossiles devraient maintenir leur pertinence dans un avenir prévisible, bien que leur part diminue à mesure que les technologies renouvelables mûrissent et deviennent plus compétitives en termes de coûts.

6. Efficacité énergétique d'un stockage

Définition :

L'efficacité énergétique d'un système de stockage d'énergie mesure la proportion d'énergie qui est stockée et récupérée par rapport à l'énergie qui a été initialement introduite dans le système. Elle est généralement exprimée en pourcentage. Plus l'efficacité énergétique est élevée, plus le système est capable de stocker et de restituer efficacement l'énergie sans subir de pertes significatives.

$$\text{Efficacité d'un stockage} = \frac{\text{énergie stockée}}{\text{énergie déstockée}} * 100$$

Les technologies de stockage d'énergie varient en termes d'efficacité énergétique en fonction de leur conception, de leur taille, de leur technologie et de leur application spécifique. Par exemple, les batteries lithium-ion ont généralement une efficacité énergétique élevée, avec des taux de récupération d'énergie pouvant atteindre jusqu'à 90 % ou plus, tandis que d'autres technologies de stockage, telles que le stockage par air comprimé ou le stockage hydroélectrique par pompage, peuvent avoir des efficacités légèrement plus faibles en raison des pertes associées aux processus de compression et de décompression ou de pompage et de turbinage. En général, l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de stockage d'énergie est un objectif clé pour maximiser leur utilité et réduire leur impact environnemental.

Attention :

Sauf dans des cas bien particuliers, il est difficile de stocker directement l'électricité. Il faut d'abord la transformer en une autre forme d'énergie plus facilement stockable

7. Les grandes formes de stockage

7.1. Système de Transfert d'Énergie par Pompage

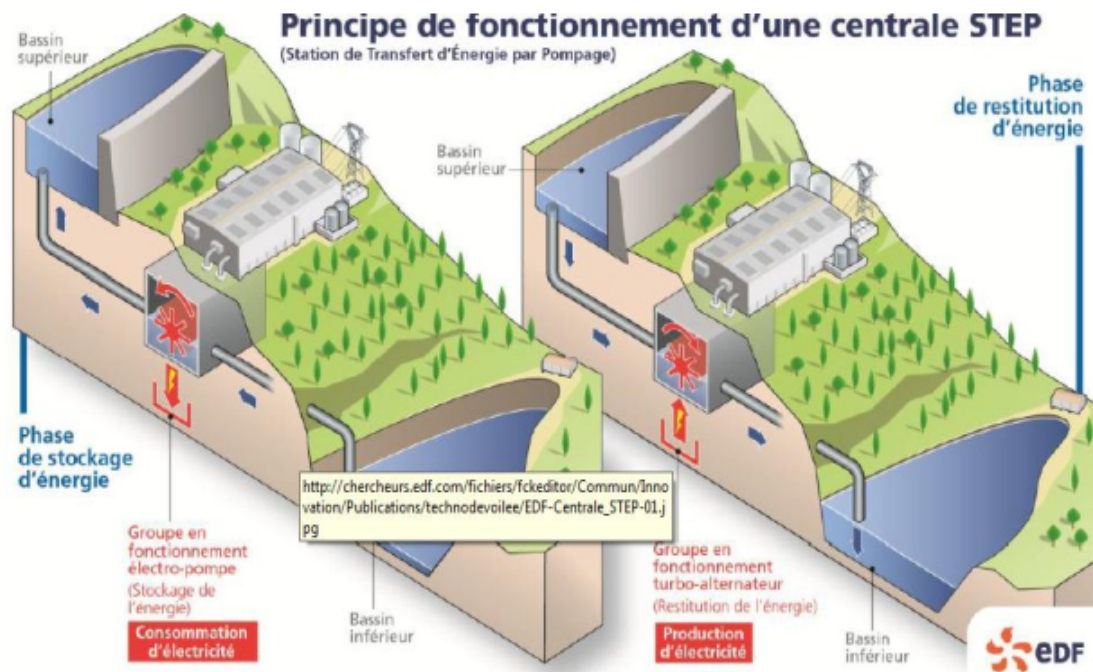
Ces installations comprennent, comme le montre la figure ci-dessous, des réservoirs situés à des altitudes différentes et un dispositif de pompage réversible permettant de transférer une masse d'eau entre eux et dont une énergie potentielle. Il permet de stocker de grandes quantités d'énergie électrique par l'intermédiaire de l'énergie potentielle de l'eau. Une STEP (station de transfert d'énergie par pompage), type de centrale hydroélectrique, est utilisée pour transférer l'eau entre deux bassins situés à des altitudes différentes. Lorsque le réseau fournit un surplus d'électricité, l'eau du bassin inférieur est pompée dans le bassin supérieur. Sous l'effet de la pesanteur, cette masse d'eau représente une future capacité de production électrique. Lors d'un déficit de production électrique, la circulation de l'eau est inversée: la pompe devient turbine et restitue l'énergie accumulée. Avec un rendement pouvant atteindre plus de 80%, il s'agit de la solution la plus employée pour stocker l'énergie des centrales électriques.

Avantages

Mature, bon rendement, durée de vie (+40 ans) et cyclage

Inconvénients

Contrainte d'emplacement, impact environnemental et acceptabilité du public



Graphique 2 STEP

(cf. Comment fonctionne une station de transfert d'énergie par pompage (STEP) ?)

7.2. Stockage par air comprimé

En l'anglais Compressed Air Energy Storage. Grâce à un compresseur, alimenté pendant les heures creuses de demande d'électricité, de l'air comprimé est produit puis stocké dans une cavité sous-terrainne.

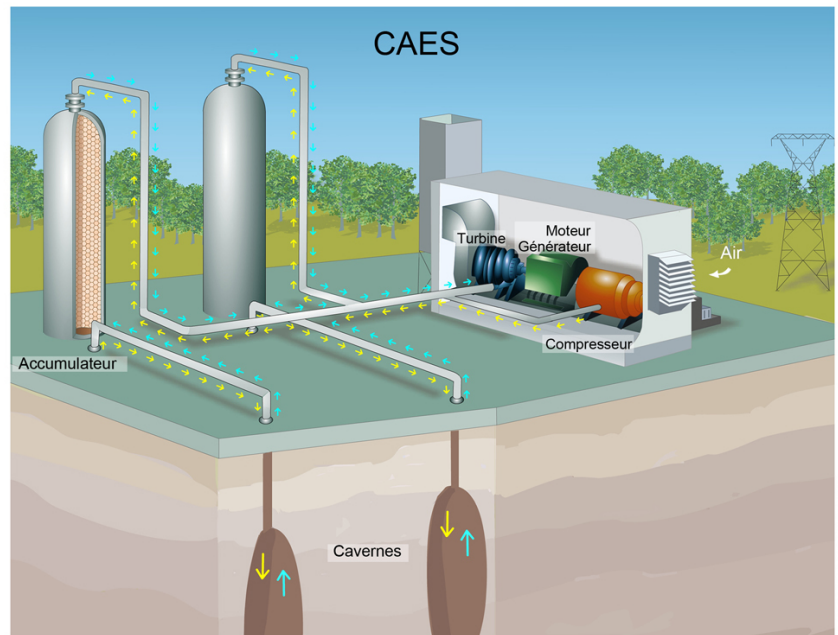
Lors des périodes de pointe, l'air comprimé passe dans une chambre de combustion où il est réchauffé grâce à l'apport de gaz naturel avant d'être détendu dans une turbine. Sans cette étape de réchauffement, la température atteinte lors de la détente de l'air serait beaucoup trop basse et la turbine serait vite endommagée. Celle-ci est reliée à un alternateur qui produit de l'électricité. Si le rendement n'est pas très bon, il reste meilleur qu'une turbine à gaz classique. Une des améliorations en cours d'étude, le CAES adiabatique, vise à stocker la chaleur produite lors de la compression de l'air pour la restituer lors de la détente du gaz, ce qui permet l'utilisation de turbines à air pour régénérer de l'électricité sans aucune émission directe.

Avantages

- Pas d'émission CO₂ (CAES adiabatique)
- Grande puissance et grande capacité

Inconvénients

- Coût d'investissement
- Site de stockage géologique adapté



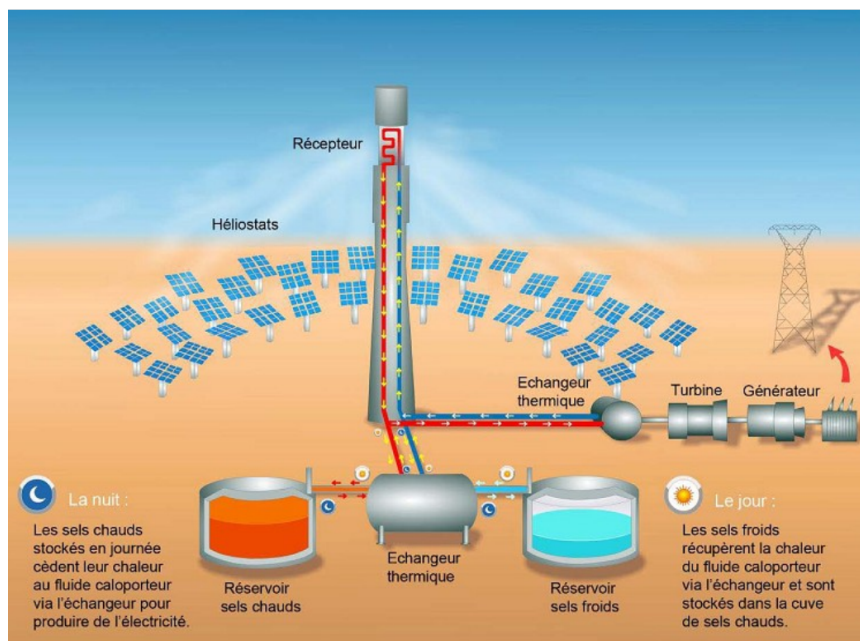
Graphique 3 CAES

(cf. Comment fonctionne le stockage par air comprimé (CAES) ?)

7.3. Stockage de chaleur

Le stockage par chaleur sensible a fait ses preuves depuis des milliers d'années. Il s'agit par exemple du simple fait de poser une pierre près d'un feu, de la déplacer et de profiter de la chaleur qu'elle restitue dans le temps. C'est aussi le principe que l'on retrouve dans l'utilisation d'un ballon d'eau chaude ou d'une simple bouillote. Dans le cas d'une centrale thermodynamique, il s'agit de stocker la chaleur emmagasinée au cours de la journée d'ensoleillement. Le fluide caloporteur (qui transporte la chaleur) circule jusqu'à un échangeur thermique relié à deux réservoirs de sels fondus. Les sels fondus froids passent à travers l'échangeur et emmagasinent à leur tour la chaleur du fluide, ils sont ensuite stockés dans un réservoir de sels chauds.

Au coucher du soleil, le circuit s'inverse et les sels chauds circulent, à travers l'échangeur, vers le réservoir à sels froids. La chaleur est ainsi cédée au fluide caloporteur (autour de 500°) et permet d'alimenter une turbine pour produire de l'électricité.

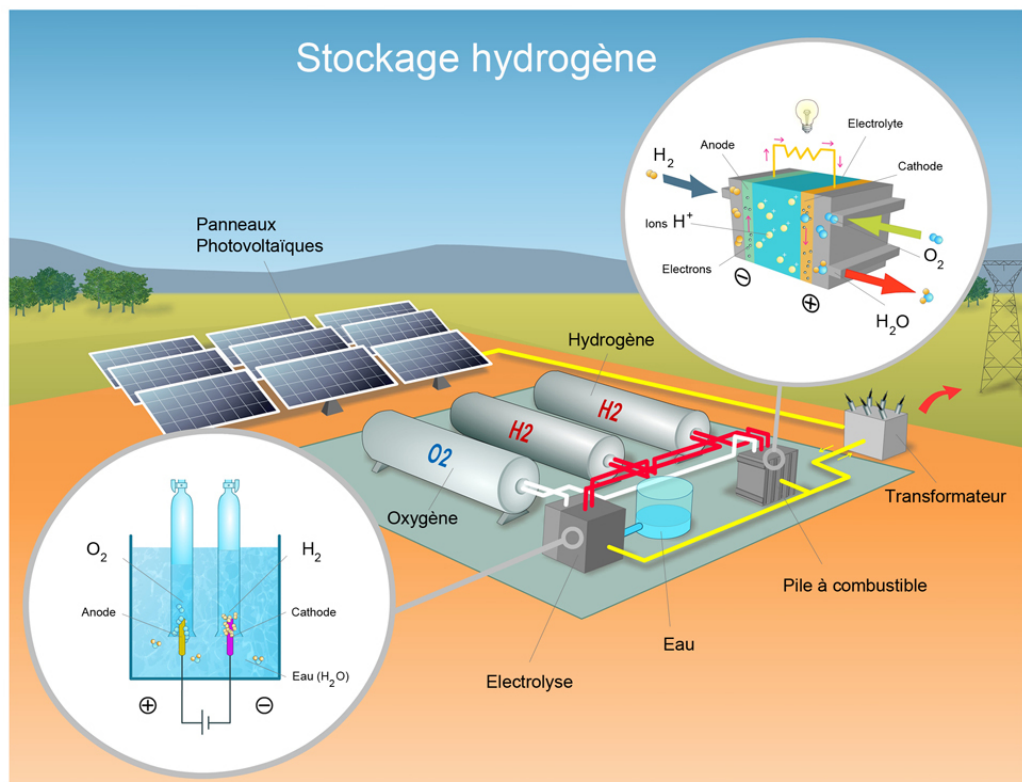


Graphique 4 Stockage de chaleur

7.4. Vecteur hydrogène

Les trois étapes du processus de stockage par le vecteur hydrogène sont : l'électrolyse de l'eau, le stockage de l'hydrogène produit et la pile à combustible.

- Tout d'abord la production d'hydrogène lors des périodes creuses grâce à la décomposition de l'eau par électrolyse. L'apport d'électricité permet à l'électrolyseur de décomposer l'eau H_2O en oxygène et hydrogène
- Ensuite l'hydrogène est stocké dans un réservoir sous forme gazeuse, liquide ou solide.
- Il est enfin retransformé dans une pile à combustible. Selon la réaction inverse de l'électrolyse, l'hydrogène s'associe avec l'oxygène (les ions traversent une membrane tandis que les électrons circulent dans un circuit créant un courant électrique), la réaction ne rejette que de l'eau et de la chaleur



Graphique 5 Vecteur hydrogène

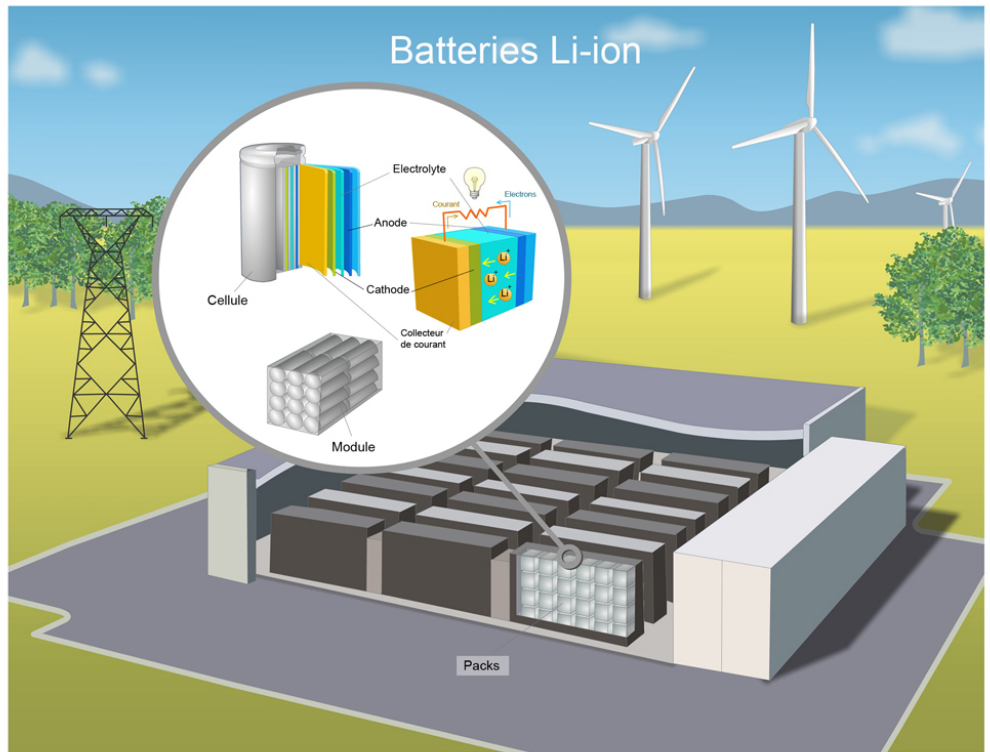
(cf. L'hydrogène, vecteur d'énergie du futur)

7.5. Les batteries

🔍 Définition :

La batterie est un assemblage d'accumulateurs qui stocke l'énergie électrique issue de la circulation des ions entre deux électrodes à travers un électrolyte, et des électrons qui se déplacent à travers un circuit extérieur.

(cf. How Batteries Work - Battery electricity working principle)

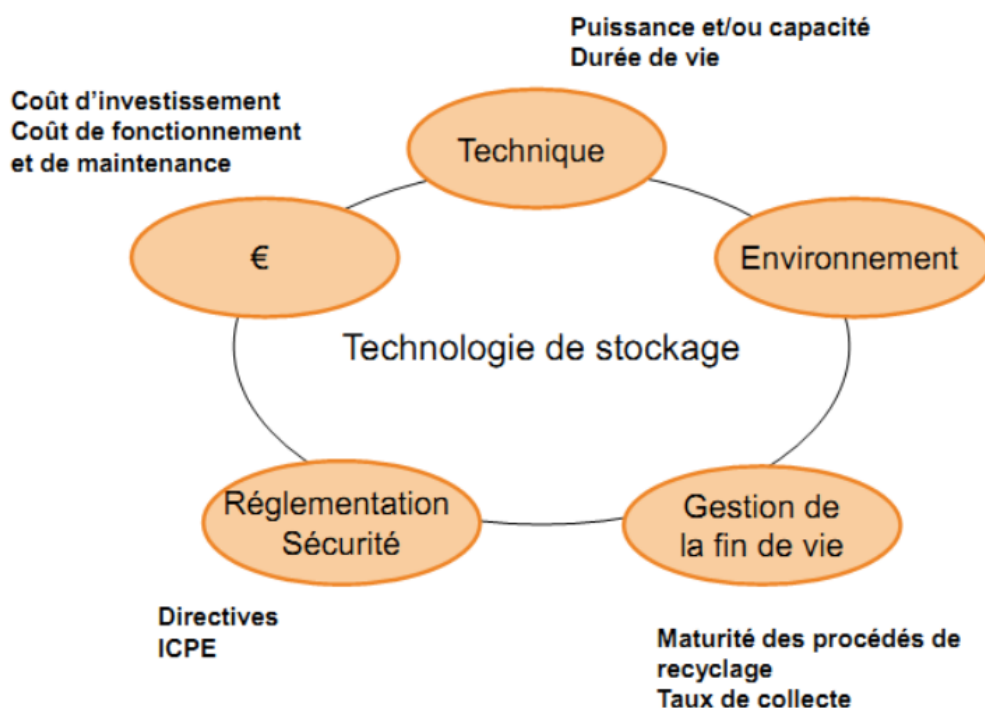


Graphique 6 Stockage par batteries Li-Ion

a) Critères de choix d'une technologie de stockage

Il existe différentes technologies de stockage stationnaire capables de s'adapter au mieux au système de production d'énergie, au besoin, à l'investissement

L'ensemble de ces technologies se complètent et doivent permettre de réfléchir en terme de réseau de stockage. Chaque réseau (thermique, électrique, production d'hydrogène) peut se développer en parallèle et ainsi couvrir l'ensemble des besoins. Les critères de choix d'une technologie de stockage dépendent du besoin, auquel on associe un cahier des charges, des contraintes de réglementation, de coût et d'environnement



Graphique 7 Critères de choix d'une technologie de stockage

b) Stockage d'énergie électrique

La sélection d'un système de stockage sur un site donné dépend de plusieurs critères de choix :

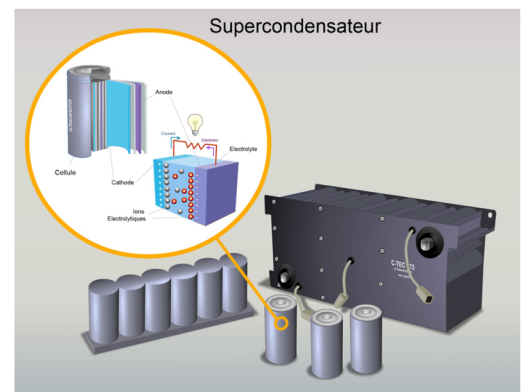
- Quantité et nature d'énergie disponible ;
- Puissances disponibles ;
- Densité de stockage en énergie et puissance, qui conditionne le volume et le poids du système ;
- Coût et maintenance qui sont liés à la maturité de la technologie ;
- Nombre de cycles et profondeur de décharge ;
- Sécurité.

7.6. les super-condensateurs

Un supercondensateur est constitué de 2 électrodes poreuses, généralement en carbone activé, plongées dans un électrolyte liquide et séparées par un séparateur laissant circuler les ions mais pas les électrons. L'interaction des électrodes et de l'électrolyte entraîne l'apparition spontanée d'une accumulation de charges aux interfaces, on parle de formation d'une double couche électrochimique : une couche de charges positives et une couche de charge négatives, l'ensemble étant électriquement neutre.

Les plus gros supercondensateurs ont été développés majoritairement pour une utilisation dans le domaine des transports

(cf. Batterie vs Supercondensateur)



les super-condensateurs

7.7. Les volants d'inertie

Ce système de stockage repose sur le principe physique qui consiste à emmagasiner de l'énergie cinétique en faisant tourner à très grande vitesse une masse autour d'un axe.

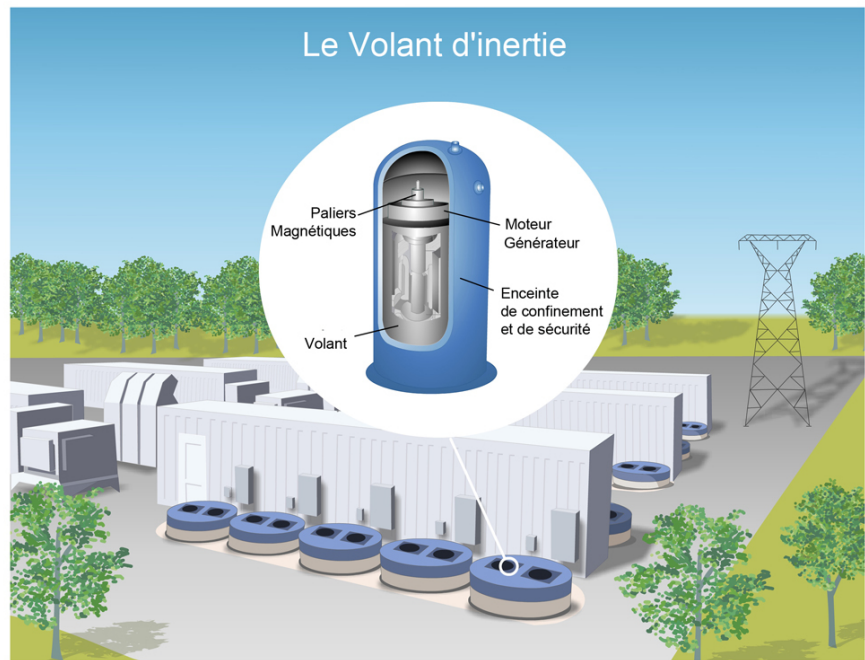
Le volant d'inertie est accéléré ou freiné par un moteur-générateur électrique qui permet ainsi d'effectuer les charges et décharges du système. Pour éviter les frottements, les parties tournantes sont guidées par des paliers souvent magnétiques. L'ensemble du système est logé dans une enceinte de confinement sous basse pression, afin de limiter les pertes aérodynamiques sources d'auto-décharge. Le SISE est utilisé dans de nombreux domaines : régulation de fréquence, lissage de la production éolienne et solaire, stockage et restitution de l'énergie de freinage des véhicules.

Avantages

- Temps de réponse très court
- Très bon rendement
- Longue durée de vie
- Peu de maintenance
- Nombreux constructeur

Inconvénients

- Forte autodécharge
- Problèmes de sécurité
- Coût



Graphique 8 Les volants d'inertie

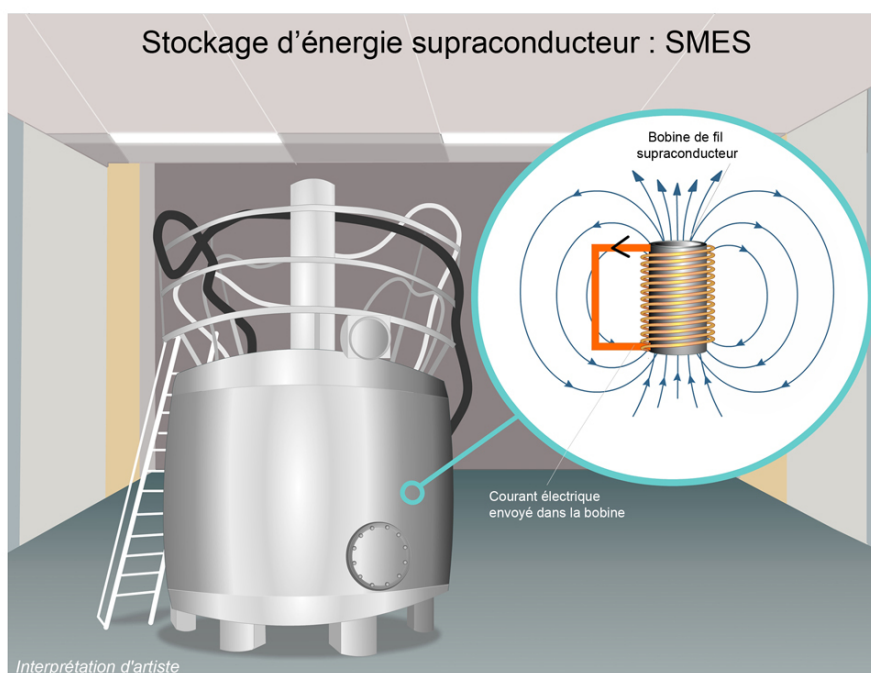
(cf. Comment fonctionne le volant d'inertie ?)

7.8. Le stockage électromagnétique

Le stockage magnétique à supraconducteur est appelé aussi SMES pour Superconducting magnetic energy storage (Stockage d'énergie magnétique par bobine supraconductrice)

Il permet aujourd'hui, encore expérimentalement, de stocker de l'énergie sous la forme d'un champ magnétique créé par la circulation d'un courant de très haute intensité dans un anneau supraconducteur refroidi sous sa température critique de transition vers l'état supraconducteur 4 K, soit - 269 C.

Il suffit de connecter la bobine au réseau pour la décharger. Pour l'instant, le coût des équipements (et l'énergie requise pour la réfrigération) réservent ce type de stockage à des applications de hautes technologies, civiles ou militaires .



Graphique 9 Le stockage électromagnétique

8. Test du Chapitre 02

Exercice 1 : Question 01

Quel est le principal avantage du stockage par air comprimé ?

- ☐ Son faible coût d'investissement
- ☐ Son rendement élevé
- ☐ Sa capacité à stocker de grandes quantités d'énergie
- ☐ Sa faible empreinte environnementale

Exercice 2 : Question 02

Faites glisser chaque technologie dans la colonne appropriée en fonction de sa principale caractéristique : Haute Densité de Puissance, Haute Densité Énergétique, ou Les Deux.

Volant d'Inertie	Supercondensateur	Stockage d'Énergie par Air Comprimé (CAES)
Batterie (Lithium-ion)	Supraconducteur	
Stockage Hydroélectrique par Pompage (STEP)		

Haute Densité de Puissance	Haute Densité Énergétique	Haute Densité Énergétique et Haute Densité de Puissance

Exercice 3 : Question 03

Complétez les phrases suivantes en utilisant les mots clés appropriés de la lecture.

volant d'inertie, Transfert d'Énergie par Pompage (STEP), stockée, récupérée

- Le est une technologie de stockage d'énergie qui utilise l'énergie cinétique d'une masse en rotation.
- Les systèmes de sont utilisés pour transférer l'eau entre deux réservoirs situés à des altitudes différentes.
- L'efficacité énergétique d'un système de stockage d'énergie mesure la proportion d'énergie qui est et par rapport à l'énergie qui a été initialement introduite dans le système.

Crédits des ressources

Carte conceptuelle du module p. 6

Attribution - Dr. Oussama Kheiredine Nehar

Comment fonctionne une station de transfert d'énergie par pompage (STEP) ? p. 10

Planète Energies¹ (YouTube)

Comment fonctionne le stockage par air comprimé (CAES) ? p. 11

Planète Energies² (YouTube)

L'hydrogène, vecteur d'énergie du futur p. 12

CEA³ (YouTube)

How Batteries Work - Battery electricity working principle p. 12

⁴ The Engineering Mindset⁵ (YouTube)

Batterie vs Supercondensateur p. 14

Professeur Sims⁶ (YouTube)

Comment fonctionne le volant d'inertie ? p. 15

Planète Energies⁷ (YouTube)

1. <https://www.youtube.com/@PlaneteEnergies>

2. <https://www.youtube.com/@PlaneteEnergies>

3. <https://www.youtube.com/@CEA>

4. <https://www.youtube.com/@EngineeringMindset>

5. <https://www.youtube.com/@EngineeringMindset>

6. <https://www.youtube.com/@ProfesseurSims>

7. <https://www.youtube.com/@PlaneteEnergies>

Mentions légales

Feel free to share it, it free as in freedom

