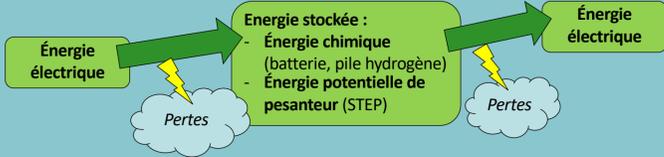


## MISE EN CONTEXTE

L'énergie électrique prend une part de plus en plus importante dans le mix énergétique. Il faut donc prévoir de quoi stocker cette énergie, car on ne produit pas forcément l'électricité au moment où le consommateur en a besoin. Cette problématique est d'autant plus présente du fait que les sources d'énergies renouvelables sont de plus en plus utilisées, mais fonctionnent de manière intermittente.



En raison de l'impossibilité de stocker de l'électricité telle quelle, l'innovation autour des modes de stockage est fondamentale. Par ailleurs, les systèmes d'aujourd'hui demeurent perfectibles dans leur efficacité énergétique, notamment lors des 2 phases de conversion de l'énergie (stockage et destockage). Notre étude se focalise sur la rentabilisation du stockage électrique, c'est pourquoi on cherche à maximiser le profit créé grâce à l'achat et revente d'électricité, on utilise donc un algorithme d'optimisation implémenté sur python.

## METHODOLOGIE

On pose le problème d'optimisation :

Un problème d'optimisation est un problème où l'on cherche à maximiser/minimiser une fonction sous certaines contraintes mathématiques imposées par le système. On se place sur un intervalle de temps  $[0, T]$  avec  $T$  en heures. Dans notre cas précis, on cherche à obtenir le maximum de la fonction :

$$f(t) = \sum_{t=1}^T (E_t \times \text{décharge}(t) \times \eta_d - \frac{E_t \times \text{charge}(t)}{\eta_c})$$

A laquelle on soustrait le coût horaire constant :

$$OPEX_c \times S_{max} \times T - OPEX_p \times P_{max} \times T$$

Paramètres du problème :

- $E_t$  : le prix de l'énergie au temps  $t$
- $\eta_d$  : rendement de décharge
- $\eta_c$  : rendement de charge
- $S_{max}$  : Capacité de stockage maximale
- $P_{max}$  : Puissance maximale de décharge ou de charge
- $OPEX_p$  : Coûts de puissance
- $OPEX_c$  : Coûts de capacité de stockage par heure

Variables du problème :

- Charge(t) : la quantité chargée au temps  $t$
- Décharge(t) : quantité déchargée au temps  $t$

Contraintes du problème :

- Bilan énergétique :  $\text{stockage}(t) = \text{stockage}(t-1) + \text{charge}(t) - \text{décharge}(t)$
- Capacité de stockage :  $0 \leq \text{stockage}(t) \leq S_{max}$
- Puissance max de charge et de décharge :  $0 \leq \text{charge}(t) \leq P_{max}$  et  $0 \leq \text{décharge}(t) \leq P_{max}$
- Stockage cyclique :  $\text{stockage}(T) = S_{init}$  avec  $S_{init}$  le stockage à  $t = 0$

## COMPARAISON DES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE

### BATTERIE



Une batterie lithium-ion accumule et libère de l'énergie grâce au déplacement des ions lithium entre l'anode et la cathode au travers d'un électrolyte.

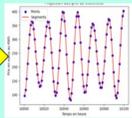
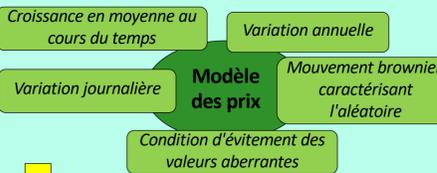
Valeurs des paramètres pour la technologie batterie :

- Efficacité du processus de charge = 0.85
- Efficacité du processus de décharge = 0.85
- CAPEXs = 250 et 350 €/kWh et 100 à 225 €/kW
- OPEXs = 2,5 à 10 €/kWh/an et 4 à 5 €/kW/an

CAPEX : coût d'investissement initial  
OPEX : coût d'entretien  
Un de chaque pour puissance et capacité

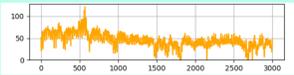
### Modèle simulant l'évolution des prix

On simule les prix sur 4 mois (~3000 heures), à pas horaire. Notons qu'en réalité, les prix de l'électricité obéissent à un mécanisme dépendant du mix électrique et des prix des combustibles. Par conséquent, ils peuvent être anticipés.



Simulation des prix de l'électricité (restreinte sur 100 heures)

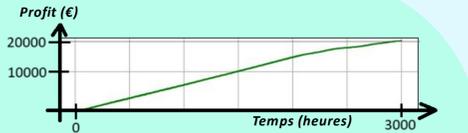
Nous avons préféré utiliser les valeurs historiques des prix de l'électricité issu de février 2019 (ci-dessous) pour obtenir des profits plus réalistes.



### Résultats obtenus :

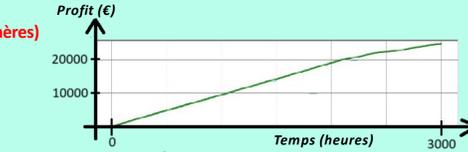
Batteries actuelles

Profit réalisé (OPEX décompté) : 20830€  
Investissement (CAPEX) : 750000€  
dont 80% pour la capacité de 2MWh et 20% pour la puissance de 1MW



Batteries en 2030 (+ efficaces et - chères)

Profit réalisé (OPEX décompté) : 24687€  
Investissement (CAPEX) : 493750€  
dont 80% pour la capacité de 2MWh et 20% pour la puissance de 1MW

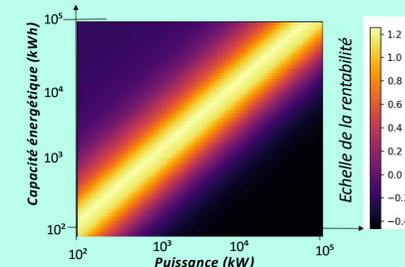


### Paramètres influençant la rentabilité :

Le programme nous permet d'optimiser la rentabilité, en revanche les investisseurs souhaitent aussi savoir quels sont les paramètres qui influencent cette rentabilité.



### Simulation : Heat map de la rentabilité

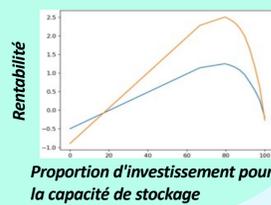


Ici, nous avons étendu nos calculs de profit sur 15 ans, la durée de vie de la batterie, (extrapolation) pour différentes valeurs de stockage et puissance. Le rendement tracé ici est donc égal au ratio entre profit total et investissement initial. On remarque que la diagonale jaune, est la plus rentable.

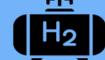
Remarque : pour un même rapport énergie/batterie on a un même rendement

### Optimisation de l'investissement sur 15 ans

Cette courbe compare la rentabilité entre 2030 (orange) et actuelle (bleue). On peut ainsi espérer un meilleur rendement à l'avenir.



### HYDROGENE P2H2P



L'énergie électrique peut aussi être stockée par électrolyse de l'eau, créant du dihydrogène gazeux, suivant le principe d'une pile à combustible.

L'énergie électrique est ensuite récupérée par oxydation du dihydrogène et réduction du dioxygène en eau.

Valeurs des paramètres pour la technologie :

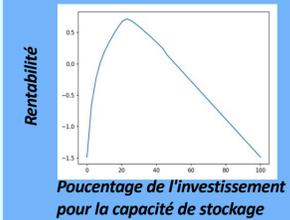
- Efficacité du processus de charge = 0.70
- Efficacité du processus de décharge = 0.55
- CAPEXs = 10 à 12 €/kWh et 600 à 750 €/kW
- OPEXs = de 7 à 10% du CAPEX

### Résultats obtenus :



Profit réalisé : 2197€ Investissement : 110000€  
dont 20% pour la capacité de 2MWh et 80% pour la puissance de 130kW

### Optimisation de l'investissement sur 15ans



Grâce à cette courbe on observe que la rentabilité maximale est de 70% donc cette technologie n'est pas rentable.

### STEP

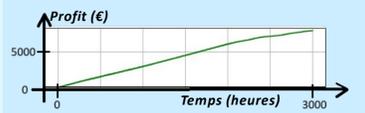


Une STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage) permet de stocker de l'énergie électrique sous forme d'énergie potentielle de pesanteur. En effet, grâce à une pompe, on accumule de l'eau en hauteur. Lorsqu'on souhaite obtenir de l'électricité, il suffit de faire s'écouler l'eau par la turbine.

Valeurs des paramètres pour la technologie STEP :

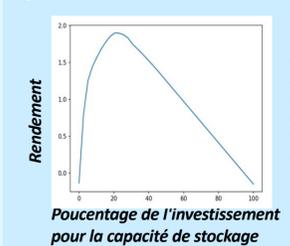
- Efficacité du processus de charge = 0.75
- Efficacité du processus de décharge = 0.75
- CAPEXs = 10 €/kWh et 600 €/kW
- OPEXs = 0,15 €/kWh/an et 6 à 12 €/kW/an

### Résultats obtenus :



Profit réalisé : 7330€ Investissement : 180000€  
dont 17% pour la capacité de 2MWh et 80% pour la puissance de 110kW

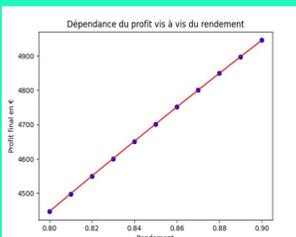
### Optimisation de l'investissement sur 15 ans



Grâce à cette courbe on peut planifier un investissement permettant d'avoir un rendement de 190%

## SENSIBILITÉ DU PROFIT AU RENDEMENT

### Linéarité du profit selon le rendement



On voit donc qu'il existe une relation linéaire entre efficacité de la batterie sur un cycle et profit réalisé. D'où l'importance de réaliser des batteries minimisant les pertes énergétiques de conversion.

## CONCLUSION

Pour conclure, on remarque que pour toutes les technologies de stockage, un investissement réfléchi entre capacité de stockage et puissance de charge/décharge permet la maximisation du profit (voir heat-map).

De plus, on remarque que parmi les technologies de stockage, toutes présentent des avantages notables, comme un faible CAPEX et OPEX pour le stockage concernant la STEP et l'hydrogène électrique, et des coûts élevés en puissance. Inversement, la batterie présente des coûts élevés pour le stockage, mais plus faibles pour avoir une forte puissance de charge et de décharge. Ce qui incite à avoir des stockages plus longs, alors que la batterie se positionne surtout sur des stockages courts.

De plus, parmi les trois technologies étudiées, seul l'hydrogène n'est pas encore assez développé pour être rentable.

Pour aller plus loin, il faudrait étudier d'autres sources de revenus qui se basent sur d'autres stockages d'électricité, comme la prise en compte des marchés de capacité et de réserve.



### Sources :

