

Bonjour à tous et bienvenue dans cet épisode où on va parler du stockage de l'énergie. En fait, on va parler plus précisément du stockage de l'énergie sous forme mécanique et introduire des notions clefs pour comprendre le stockage. Il faut bien commencer quelque part notre petit voyage à travers le monde étrange et merveilleux du stockage de l'énergie. On ne va donc pas parler des batteries ou de l'hydrogène, par exemple, qui seront traités dans d'autres vidéos. Donc c'est parti pour le stockage d'énergie sous forme mécanique.

Je dois vous prévenir que mes vidéos sur le stockage vont aller moins en profondeur que celles sur l'éolien et le photovoltaïque par exemple, parce qu'il y a beaucoup de choses à comprendre et pas mal de technologies différentes. On doit d'abord comprendre ce qu'est le stockage. En fait, quand on utilise de l'énergie il y a deux cas de figures. Soit on utilise directement un flux d'énergie, par exemple en utilisant le vent pour propulser un voilier ou pour faire tourner un moulin. Dans ce cas là, le vent va directement mettre en mouvement le voilier ou la structure du moulin. Soit on convertit une énergie potentielle en une énergie directement utilisable. Dans ce cas là, on utilise un stock d'énergie. Par exemple, quand j'appuie sur le bouton de ma lampe torche, l'énergie potentielle chimique contenue dans la pile est convertie en électricité pour produire de la lumière. Et cette énergie potentielle qui attend notre action pour être libérée peut prendre bien des formes: bûches de bois, essence dans notre réservoir de voiture, piles ou eau bloquée derrière un barrage hydroélectrique au milieu des Alpes. Tous ces exemples sont des exemples de stockage de l'énergie.

En fait on utilise beaucoup d'énergie stockée.

Et oui ! Du carburant de nos transports aux batteries de nos téléphones en passant par le gaz de notre chauffe-eau, on fait très souvent appel à de l'énergie stockée. Ce sujet est extrêmement vaste alors on va devoir l'attaquer par petit bout. Dans cette vidéo, on va se concentrer sur le stockage sous forme d'énergie mécanique. Le premier exemple qui devrait vous venir à l'esprit c'est celui des barrages puisqu'on en a déjà parlé dans une vidéo. Un barrage hydroélectrique permet de stocker de l'eau pour produire de l'électricité quand on a besoin. Mais, en plus, c'est aussi un moyen parfois de stocker un surplus de production électrique.

Ah oui... on en avait déjà parlé, certains barrages peuvent être utilisés dans les deux sens.

Oui, c'est exactement cela. C'est ce qu'on appelle les systèmes de transferts d'énergies par pompage ou STEP, un mot que je vais pas mal utiliser dans ce script. Une STEP, c'est ça. Il nous faut donc deux bassins à différentes altitudes. Quand on a trop d'électricité sur le réseau, on peut pomper l'eau dans le bassin supérieur et quand on a besoin de produire de l'électricité, on en produit exactement comme dans un barrage, en laissant l'eau mettre en mouvement un turbo-alternateur. On ne va pas passer trop de temps là-dessus parce qu'on en a déjà parlé dans la vidéo sur l'hydroélectricité et je vous y renvoie si vous ne l'avez pas vue. Cette solution de stockage de l'électricité est la plus présente dans le monde, elle représente 99% de la puissance installée.

En fait on parle toujours de batteries, de stockages révolutionnaires qui vont changer le monde mais l'essentiel du stockage est fait par une technologie qui a peu évolué en plusieurs décennies.

Et cette technologie a de très gros avantages. Elle permet de stocker de grande quantité d'énergie. C'est une des technologies de stockage les moins coûteuses, même si l'investissement initial est très important. Les plus vieux barrages ayant un siècle, certains tablent sur des durées de vie de cet ordre de grandeur. Mais même si on ne prend que 75 ou 50 ans comme durée de vie, on est bien au-delà de beaucoup de systèmes de stockage. Les STEP peuvent réagir relativement rapidement, en quelques minutes et ont un bon rendement, entre 70 et 85%. On récupère donc entre 70 et 85% de l'électricité utilisée pour stocker de l'eau.

Mais quelles sont les défauts de ce type de stockage ?

Il faut avoir la possibilité d'en construire ! En gros, avoir deux bassins avec une différence de relief significative. Il faut aussi être capable de faire un gros investissement à long terme, ce qui semble de plus en plus difficile dans une économie libéralisée où le court terme s'impose. Autre défaut: la densité énergétique de ces systèmes est assez faible. Il faut donc compenser en déplaçant d'énormes quantités d'eau. Pour info: 1 mètre cube d'eau, donc 1000 litres, à une altitude de 100 m a une énergie potentielle de 0,272 kWh.

Ok donc là tu penses nous aider avec une quantification mais personnellement je ne vois pas du tout ce que ça peut représenter.

Si on prend un frigo A+, il va consommer annuellement autour de 200 kWh, donc il faudrait plus de 740 000 litres d'eau s'écoulant sur 100 m pour le fonctionnement annuel de ce frigo. Et encore, là je t'épargne le rendement. Ce qui fait tout de même 2000 litres par jour, soit plus de 10 baignoires. Et comme l'idée de grimper 100 m avec 10 baignoires de 200 litres tous les jours... juste pour mon frigo... me paraît assez pénible. Je remercie sincèrement l'évaporation et les précipitations.

Ok donc là effectivement on se rend compte de la quantité énorme d'énergie qu'on utilise !

Du coup, trouver des endroits où on peut coincer énormément d'eau avec une différence d'altitude significative n'est pas si facile. De plus, ce sont de grosses installations qui demandent de lourds investissements et peuvent avoir des conséquences écologiques, ne serait-ce que par la place qu'ils occupent. Enfin, dans des pays à peu près démocratiques, ce sont des travaux difficiles à mettre en place parce que ça implique d'importantes modifications du territoire et potentiellement d'inonder des villages entiers. En France, le cas du barrage de Sivens abandonné en 2015 montre assez bien les difficultés que peuvent poser les projets de barrage.

Et une fois qu'on a blindé nos montagnes de barrages, on est un peu coincé non ?

Oui mais il y a encore des possibilités de construire des STEP. Pas trop en France pour les plus gros modèles, mais dans le monde l'agence internationale de l'énergie prévoit une multiplication de 3 à 5 des capacités installées. Ce qui serait logique parce que c'est un moyen de stockage complémentaire des énergies intermittentes que l'on voudrait davantage déployer à l'échelle mondiale pour diminuer notre dépendance aux ressources fossiles. Dans les STEP, on peut stocker une surproduction quand les conditions météorologiques sont favorables à la production éolienne et photovoltaïque et la récupérer quand ce n'est

plus le cas. Au delà, des grosses STEP, un intérêt se développe pour ce qu'on appelle des micro-STEP. Ce sont des structures plus petites donc stockant moins d'énergie mais provoquant également moins d'impacts. Et il y a aussi beaucoup plus de sites disponibles pour des micro-STEP. Les STEP jouent un rôle important pour le réseau électrique à l'échelle nationale et européenne mais les micro-STEP pourraient être intéressantes à l'échelle locale et permettre une intégration plus facile des énergies renouvelables intermittentes. Ce n'est pas encore beaucoup développé mais il faut garder ça à l'oeil. Pour les plus grosses STEP, il y a également des projets qui essaient de s'affranchir des contraintes topographiques.

Et comment on s'affranchit des contraintes topographiques ?

Vu tous les avantages des STEP, on essaye d'en construire sans avoir de montagnes. Et pour ça, il y a plusieurs techniques. Une des idées, c'est d'utiliser des trous existants, comme d'anciennes mines pour pouvoir faire une STEP. En gros, on a une cavité sous le sol, on fait un bassin en surface. Quand on a de l'électricité en trop, on pompe l'eau présente dans la cavité souterraine vers le bassin de surface et quand on veut récupérer cette électricité, on laisse s'écouler l'eau à travers des turbo-alternateurs vers le stockage souterrain. Il y a plusieurs projets de ce style envisagés sérieusement mais, à ma connaissance, pas encore en fonctionnement.

Et du coup, on a une STEP sans montagne, c'est plutôt malin !

D'autres projets envisagent d'en faire au bord de mer. Si il y a une falaise suffisamment haute, on peut faire un lac de retenue en haut de la falaise et se servir de la mer comme réservoir bas. Des contraintes s'ajoutent à cause de l'eau de mer plus corrosive, ce qui rend les projets plus chers. Mais c'est sérieusement envisagé et on sait faire. Une STEP marine a été en fonctionnement sur l'île japonaise d'Okinawa entre 1999 et 2016.

Et quand on en a ni montagne ni mine, ni falaise on peut encore faire quelque chose ?

Cela devient plus incertain mais il serait envisageable de faire des digues en pleine mer pour pouvoir créer un réservoir bas plus bas que le niveau de la mer environnant. On aurait donc une STEP en forme d'atoll artificiel. Evidemment, ce serait un projet bien plus cher et complexe. Construire des digues en mer, c'est du gros chantier. Enfin, on pourrait très bien creuser un gros trou n'importe où sur Terre et utiliser les remblais pour faire une colline à côté. Si on met un lac en haut de la colline et qu'on remplit le trou d'eau, on a une STEP. Bon, là les travaux deviennent colossaux et on utilise du territoire qui pourrait servir à autre chose... donc ça devient un peu plus gênant.

Mais attends ce dont tu parles là c'est un peu démesuré non ?

Certains proposent encore mieux dans la démesure. On pourrait construire deux grandes digues entre la France et le Royaume-Uni: une entre Calais et Douvres et l'autre entre Cherbourg et Portsmouth. La Manche servirait de réservoir aval de stockage et la capacité de stockage serait assez importante. Evidemment, il faudrait des écluses de grosses capacité pour ne pas trop perturber le trafic maritime et les conséquences écologiques d'un

chantier au gigantisme probablement inégalé de toute l'histoire de l'humanité seraient assez importantes.

Tu es en train de dire qu'on pourrait transformer La Manche en STEP et bien moi qui croyait être sur une chaîne sérieuse là c'est chaud tu crois vraiment que cela peut être pertinent comme projet?

Okay, je crois qu'il faut qu'on ait une conversation difficile sur le stockage...

Okay est-ce que je dois commencer à m'inquiéter?

Comment tu juges qu'un moyen de stockage est pertinent ?

Bah... il faut que cela soit un système qui puisse stocker de l'énergie.

Effectivement mais on ne va pas construire une STEP sur chaque voiture électrique.

Okay, donc un moyen de stockage doit répondre à une problématique précise.

Oui, on va parler du stockage en général pendant quelques vidéos pour comprendre les grands principes mais il faut bien voir que c'est une boîte à outil dans laquelle on vient piocher en fonction des besoins. D'ailleurs, suivant les paris sur l'évolution technique et économique de certaines technologies, tout le monde n'utilise pas cette boîte à outil de la même manière dans sa façon de concevoir le futur ou dans les scénarios de transition écologique qui sont imaginés. Bref, une fois qu'on a une idée de ce qu'on veut faire, quel autre paramètre te semble pertinent ?

Bon je suppose qu'on va avoir besoin d'un taux de retour énergétique, vu que c'est le truc avec lequel tu nous rabats les oreilles dans chaque vidéo .

Vu que la physique est cruelle, il y a toujours des pertes dans les transformations: perte de chaleur, frottement, fuite... etc. Du coup, on récupère toujours moins d'énergie en sortie d'un stockage qu'en entrée. Le taux de retour énergétique c'est l'énergie qu'on récupère divisé par celle qu'on a dépensée. Donc si on voulait calculer un taux de retour énergétique d'un moyen de stockage on aurait toujours moins de 1 à cause des pertes. Un stockage n'est pas là pour fournir de l'énergie à nos sociétés mais pour la stocker parce qu'on se trouve dans des situations où un stockage est nécessaire. On peut cependant trouver un concept qui se rapproche du taux de retour énergétique. On peut se demander quelle quantité d'énergie un système va être capable de stocker par rapport à l'énergie totale qu'il va demander sur toute sa durée de vie. Et dans ce cas là, les STEP s'en sortent extrêmement bien par rapport à d'autres systèmes. Elles pourront stocker plusieurs centaines de fois l'énergie nécessaire à les construire et les entretenir. Mais le taux de retour énergétique peut quand même avoir une importance...

Sauf que tu viens de dire que cela ne servait à rien pour évaluer un moyen de stockage seul.

Oui. Mais quand on regarde les moyens de production d'électricité qui nécessitent des

moyens de stockage, comme les éoliennes ou le photovoltaïque, il faudrait regarder le taux de retour énergétique du moyen de production et des moyens de stockage associés. Évidemment, ajouter un stockage va faire baisser le taux de retour énergétique par rapport au moyen de production seul. Mais ce n'est pas la seule variable importante.

Mais il y a aussi les impacts environnementaux de ces moyens de stockage.

Ce n'est pas toujours bien pris en compte mais c'est aussi une question qu'on se posera en regardant les différentes possibilités. En plus des impacts environnementaux, il faudra se demander si des contraintes matérielles empêchent le déploiement à grande échelle.

Et le rendement ? On devra bien en parler

Effectivement, le rendement est un aspect important, vu qu'on veut éviter de perdre de grandes quantités d'énergie en faisant appel au stockage.

Et bien sûr il y a le prix ?

Le prix, c'est sans doute l'aspect le plus important d'un système de stockage, c'est ce qui fait une bonne partie de l'arbitrage au moment de choisir entre des alternatives. Mais, le prix d'un système de stockage n'est pas une question si évidente que ça.

Et pourquoi ce n'est pas évident ?

Pour un moyen de production, comme une centrale nucléaire ou une éolienne, tu peux avoir une idée de la quantité d'électricité qui sera produite sur la durée de vie et en divisant tous les coûts par cette quantité, tu peux te faire une idée des coûts par kWh de ce moyen de production. C'est un exercice complexe mais le principe est relativement simple et c'est ce qui nous intéresse puisqu'à la fin c'est ce qu'on paye sur notre facture: les kWh consommés.

Ben on peut faire la même chose pour les moyens de stockage... on prend une STEP on regarde ce qu'elle produit en électricité sur toute la vie on regarde tous les coûts on divise les coûts par toute l'électricité produite. On a un coût par kWh. C'est exactement la même chose. Je ne vois pas où est le souci...

Okay, prenons un petit cas complètement imaginaire. Une STEP d'une puissance d'1 kW qui peut produire 1 kWh d'électricité en vidant entièrement son réservoir. Et pour rappel, la puissance c'est la quantité d'énergie par unité de temps. Réussir à ouvrir un pot de confiture est un problème de puissance alors que courir le marathon est un problème d'énergie. Une fois, son réservoir plein ma STEP imaginaire peut fournir une puissance d'1 kW pendant une heure. Cette STEP, que j'ai installée dans mon jardin imaginaire, m'a coûté 300€. Tu en déduis quoi ?

Que tu payes 300€ pour 1 kWh. Je crois que tu as fait la plus mauvaise affaire du siècle là. C'est complètement con ton truc.

Sachant qu'un français paye le kWh autour de 15 centimes d'euros... ça me revient effectivement très cher. Mais, je n'ai pas dit mon dernier mot. En fait je charge et je

décharge ma STEP tous les jours. Et je parie qu'elle va tenir 50 ans. Sur 50 ans, je vais donc faire plus de 18 000 cycles. Tu en déduis quoi ?

Comme je suis un génie du calcul mental, j'en déduis que tu payes moins de 1,7 centimes ton kWh. Et là tu as fait une bonne affaire. En fait pour qu'un moyen de stockage soit rentable, il faut l'utiliser !

Mais là tu oublies un aspect fondamental, il y a des coûts de fonctionnement qu'il faut également prendre en compte et surtout il faut acheter l'électricité vu que ma STEP stocke de l'électricité pour la rendre. Dans mon exemple, je remplis ma STEP imaginaire la nuit en achetant de l'électricité sur le réseau quand elle n'est pas chère parce que les besoins sont plus faibles et je décharge ma STEP la journée en revendant l'électricité sur le réseau quand elle est plus chère. Si on suppose un rendement de 80%, il faut que j'achète 1,25 kWh pour en revendre 1 puisqu'il y a malheureusement des pertes. Si le prix la nuit est plus bas que la journée, ma STEP peut me rapporter de l'argent. Pour ça, il faut que la différence soit suffisante pour compenser les pertes dues au rendement de 80%, les coûts fixes répartis sur la durée de vie et les coûts variables liés à l'utilisation, à l'entretien... etc. Et ce que je viens de décrire ici, c'est le modèle économique des STEP. Acheter l'électricité quand elle n'est pas chère pour la revendre quand elle l'est plus. Pendant longtemps, c'était une variation jour/nuit mais ça peut changer avec les énergies renouvelables intermittentes comme le solaire ou l'éolien.

Du coup... ça pose deux questions. D'abord comment on estime le coût du stockage ?

On peut donner les coûts initiaux en puissance quand c'est ce qui nous intéresse. On aura donc un coût par kW installé. On peut aussi donner les coûts initiaux en kWh pouvant être stocké dans le cas où l'énergie fournie par le système est la variable qui nous intéresse. Mais, il ne faut pas comparer ça avec le prix de l'électricité. Pour comparer avec le prix de l'électricité, il faut faire pas mal d'hypothèses en plus, notamment sur la façon dont on utilisera ce stockage.

Du coup cela m'amène à une seconde question... Quelle est l'utilité d'un stockage ? est-ce que cela doit être rentable en soi ?

En fait, il y a plusieurs usages à un stockage et c'est un point très important. L'usage des STEP c'est le stockage massif de l'électricité sur du long terme. C'est le stockage auquel on pense naturellement. Avant l'arrivée des énergies intermittentes. Les STEP stockaient la nuit l'électricité produite par des centrales nucléaires ou des centrales au charbon qu'on laissait tourner pour des raisons économiques. Elles permettaient donc de ne pas perdre une partie de la production nocturne et de rendre cette production la journée au moment des pics de demande et donc d'éviter la construction de centrales supplémentaires qui n'auraient été utilisées que pour ces pics de demande. Si elle sont rentables, leur rentabilité économique est donc une conséquence directe de leur utilité pour le réseau électrique. Mais, un stockage peut ne pas être rentable en soi si il rend des services indispensables au réseau électrique. En fait, le stockage est souvent un coût supplémentaire nécessaire. Et dans le coût qu'on paye sur notre facture d'électricité, on paye la production de l'électricité mais aussi son transport et des moyens de stockage qui rendent des services indispensables au

réseau électrique. Pour les autres services qu'on attend du stockage, on va en parler un peu plus loin, on va maintenant utiliser ce qu'on vient de développer pour reparler des STEP.

Okay... Retournons voir les STEP avec ce qu'on a appris ici?

On a dit une STEP est un moyen de stockage avec un bon rendement qui a une très bonne durée de vie. Les STEP demandent de grandes quantités de matériaux mais des matériaux communs. Si on regarde la STEP de Grand'Maison, la plus grande de France, on voit qu'il a fallu de grandes quantités de roche qui ont été extraites dans le voisinage du barrage. La possibilité de construire des STEP se heurte à des limites topographiques. Pour dépasser ces limites, il n'est pas impossible d'en construire au milieu de nulle part mais le coût est plus élevé.

Donc plus difficile pour des contraintes économiques... coûts qui reflètent en partie, des contraintes physiques et énergétiques.

Des STEP marines vont probablement se développer dans des endroits où il y a besoin de stockage parce qu'on sait faire même si on fait encore peu de ces systèmes et qu'ils sont chers. Sur le plan écologique, ces STEP marines présentent également des soucis supplémentaires. En particulier, il faut bien imperméabiliser le bassin supérieur pour ne pas contaminer les terres alentours et les nappes phréatiques avec de l'eau salée. Pour des solutions entièrement en mer, donc un bassin entouré de digue, le coût est encore plus élevé puisqu'il faut construire les digues. Mais le coût augmente avec la taille de la digue donc proportionnellement au rayon du réservoir alors que la capacité de stockage augmente proportionnellement à la surface donc avec le carré du rayon du réservoir. Du coup, si tu fais grandir la taille ça finit forcément par être rentable si les besoins sont là, si les besoins sont là ! Parce qu'un moyen de stockage géant qui n'est jamais utilisé ne sera évidemment jamais rentable. Le cas extrême et un peu loufoque étant celui de faire une énorme STEP dans la manche. Et là ça veut dire des travaux pharaoniques... et ça paraît très peu probable mais on a peu d'éléments sur des moyens de stockage qui n'existent pas encore. Et ça va être un problème de ce sujet. Je peux parler de ce qui existe physiquement mais juger des propositions est beaucoup plus difficile, surtout que la pertinence des propositions dépend aussi des hypothèses qu'on fait sur les besoins.

Et aujourd'hui, avec ces STEP, on en est où ?

Tu as raison, c'est important d'avoir des ordres de grandeur. En France on a 5 GW de puissance installée en STEP, soit l'équivalent en puissance et pas en production d'électricité, l'équivalent en puissance d'un peu plus de 3 fois l'EPR ou de 2000 éoliennes terrestres. J'ai essayé de calculer la quantité totale que ces STEP peuvent stocker et on est probablement autour de 170 GWh. Cela veut dire qu'en remplissant toutes les STEP au maximum, on a moins d'un millième de la production électrique française annuelle. La majorité des STEP peuvent fonctionner à puissance maximale entre quelques heures et une journée avant d'être entièrement vides. L'exception est le barrage de Bissorte en Savoie qui pourrait fonctionner à pleine puissance pendant presque une semaine pour vider entièrement son réservoir de 39 milliards de litres d'eau. Une fois qu'on sait ça, je peux glisser un mot sur les micro-STEP. En France, une étude a estimé le potentiel à 33 GWh, on voit donc que ce n'est pas ridicule même devant les 170 GWh des grosses STEP.

Okay, c'est cool d'avoir la puissance et les réserves... Mais, cela ne donne aucune idée de l'importance de ces structures pour la production électrique française ?

Ces STEP fournissent 6 à 7 TWh annuellement sur environ 530 TWh de la production électrique française. On a donc un peu plus de 1% de l'électricité en France qui passe par ce système de stockage. Et évidemment, elles consomment davantage d'électricité qu'elles n'en fournissent. On voit qu'une faible part de l'électricité produite en France est passée par un stockage. C'est un rappel qu'il est difficile de stocker l'électricité même avec le meilleur moyen de stockage qu'on ait à notre disposition pour la stocker massivement. Il est bien plus facile de stocker l'énergie avant sa conversion en électricité que ce soit sous forme d'uranium, de charbon, de gaz naturel ou d'eau bloquée par nos barrages.

Et à part les STEP, est-ce qu'il y a d'autres moyens de stockage sous forme d'énergie mécanique ?

Oui il y en a d'autres et y jeter un coup d'oeil va permettre de mieux comprendre les enjeux du stockage. On va donc se pencher sur les volants d'inertie.

Le principe est assez simple, ce sont de grosses roues ou cylindres qui tournent très vite autour d'un axe.

Et en quoi ça stocke de l'énergie?

L'énergie est stockée sous forme cinétique. C'est l'énergie que possède un corps du fait de son mouvement. Cette énergie se calcule avec une formule assez simple utilisant le carré de la vitesse. Si on prend une voiture d'une tonne à 130 km/h, elle a une énergie cinétique d'environ 0,18 kWh. Et on a dit qu'un frigo A+ consomme annuellement autour de 200 kWh. Du coup, il faut 1100 voitures d'une tonne à 130 km/h pour avoir autant d'énergie sous forme cinétique qu'il n'en faut sous forme électrique pour l'alimentation annuelle d'un frigo A+

Okay pour cette comparaison étrange... Et les volants d'inertie du coup?

Dans les applications pour le stockage de l'énergie, les volants d'inerties sont le plus souvent de lourds cylindres qui peuvent tourner autour d'un axe. Pour limiter les frottements, et donc les pertes, on fait le vide dans l'enceinte dans laquelle se trouve le cylindre. Le volant d'inertie ressemble donc de l'extérieur à un grand et lourd cylindre en acier qui est le plus souvent enterré sur la majorité de sa hauteur. Quand on veut stocker de l'électricité, on utilise un alternateur qui met en rotation le volant d'inertie. Des volants d'inertie qui sont utilisés aujourd'hui peuvent monter jusqu'à 50 000 tours par minute. Cette énergie cinétique peut ensuite être récupérée sous forme d'électricité quand on en a besoin en utilisant l'alternateur dans l'autre sens.

Mais attends... Un volant d'inertie ne peut pas rester éternellement en mouvement, si ?

Non, il perd de l'énergie. Suivant les technologies, il va s'arrêter au bout de quelques heures ou de quelques jours mais ce n'est évidemment pas fait pour stocker sur une longue durée, ce qui est une limite à garder à l'esprit et une différence avec les STEP. Un volant d'inertie

en rotation perd constamment un peu d'énergie, il faut donc compenser les pertes si on veut le garder à vitesse de rotation constante. En plus, les volants d'inertie ont une faible densité énergétique. Il faudrait donc beaucoup de volants ou de très gros volants pour stocker massivement de l'énergie. Ce qui explique pourquoi on ne les utilise pas pour ça.

Mais pourquoi tu nous en parles si ça ne sert à rien ?

Ce n'est pas ce que j'ai dit. C'est juste que les volants d'inertie ne sont pas utilisés pour stocker massivement de l'énergie sur de longues périodes. Mais, les volants d'inertie ont d'autres gros avantages. Ils sont capables de répondre extrêmement rapidement en déployant une grande puissance, même si c'est pour une faible durée. Un volant d'inertie se décharge au maximum de sa puissance dans des temps compris, en général, entre 15 et 30 minutes.

Et quelle utilité pour des formes de stockage puissantes et réactives ?

Des systèmes de stockage puissants à réponse très rapide sont importants pour la stabilité du réseau électrique, par exemple pour stabiliser la fréquence ou pour lisser des variations rapides de moyens de production intermittents comme l'éolien ou le solaire. Si une partie de l'électricité produite par une installation de panneaux photovoltaïques est stockée dans des volants à inertie, ceux-ci peuvent rendre très rapidement une partie de l'énergie stockée quand un nuage passe et permettent donc d'assurer une production électrique plus stable. L'application majeure des volants d'inertie quand on touche à la production électrique, c'est du lissage de production ou de la stabilisation de fréquence. Et ce sont de vrais problèmes que posent les moyens de production intermittents en plus de la question du stockage à long terme. Des améliorations au niveau des volants d'inertie ont donc leur importance pour le déploiement de moyens de production intermittent.

Et là vous savez peut être où je veux en venir Je dois faire un petit encart, parce que vous avez été nombreux à m'envoyer la vidéo d'André Genesseeux dans laquelle il parle de son idée de volants d'inertie en béton. Ici, je ne peux juger que des promesses parce que même quelques années après, le produit est encore en développement. Si on suppose que ce produit finira par être à la hauteur des promesses et si on juge que les coûts donnés sont réalistes, ce qui fait quand même deux hypothèses fortes que je suis incapable de vérifier, cette innovation peut être très intéressante pour les volants d'inertie.

Est-ce qu'il y aurait des raisons de douter de ces hypothèses?

Le béton est un matériau très mal adapté aux importantes contraintes mécaniques d'un volant d'inertie, il faut donc rester sceptique. Après, il suffirait d'avoir un prototype fonctionnel pour être convaincant mais ça fait déjà trois ans que la vidéo a été enregistrée et le site associé n'a encore que des promesses. Pour les coûts, ils ne viennent pas nécessairement des matériaux utilisés mais de la complexité de créer une masse extrêmement bien équilibrée, une enceinte sous vide et des roulements pour limiter les frottements. Un volant d'inertie est un objet technique complexe et la moindre erreur à sa fabrication peut entraîner sa destruction à l'usage. Si on inclut les coûts d'installation et d'entretien, j'ai du mal à croire que remplacer le volant d'inertie en acier par un volant en béton entouré d'acier divise par 10 le coût... Là encore, je ne demande qu'à être convaincu

par le produit promis. Mais, en attendant, je reste sceptique.

Mais si ça fonctionne... Est-ce que ça va changer l'usage que l'on a des volants d'inertie ? Est-ce qu'on va en mettre partout pour faire du stockage de masse ?

Probablement pas et pour différentes raisons. On l'a dit, les volants d'inertie ont une faible densité énergétique par rapport à des concurrents comme les batteries. Il faudrait donc énormément de volants d'inertie ou de très gros volants d'inertie pour couvrir des besoins conséquents de stockage, ce qui pose des problèmes économiques, techniques et écologiques. Ensuite, il ne faut pas oublier que c'est un moyen de stockage qui perd continuellement de l'énergie, ce qui reste un défaut majeur pour du stockage massif d'énergie. Enfin, depuis trois ans, le coût des batteries a considérablement diminué et elle continue de s'améliorer très vite. Il va donc être très difficile de leur faire concurrence et on parlera de ça dans un autre épisode.

En gros, cette invention ne résout probablement pas le problème de stockage de grandes quantités d'énergie.

Oui et de façon général, il faut faire attention aux promesses des uns et des autres. Les inventeurs ont intérêt à exagérer un peu les inventions, même utiles, pour attirer les financements et pouvoir les développer. De notre côté, nous avons tendance à les croire facilement parce qu'on aimerait bien que tous ces problèmes trouvent des solutions. Peut-être aussi parce qu'on a une tendance culturelle à croire que la technologie résoudra tout ça naturellement. Cette innovation peut-être intéressante pour la technologie des volants d'inertie si elle remplit ses promesses et peut trouver un usage dans ce que font déjà les volants d'inertie: fournir beaucoup de puissance sur un temps court. Mais, il faudrait des preuves, des éléments tangibles avant de commencer à croire que ça va révolutionner le stockage massif d'énergie. Avec ce que j'ai lu sur les volants d'inertie, je juge ça peu probable même si j'aimerais évidemment que l'avenir me donne tort comme souvent sur les questions écologiques.

Et est-ce qu'on se sert des volants d'inertie pour autre chose que du stockage d'électricité?

Oui ! Quand il faut beaucoup de puissance d'un coup, c'est une solution de choix. Par exemple, pour des expériences liées à la fusion nucléaire, une installation, le JET, dispose de gros volants d'inertie qui sont mis en mouvement grâce à l'électricité fournie par le réseau électrique. Puis, l'énergie stockée dans les volants d'inertie est relâchée plus rapidement que le temps de charge. Ces volants d'inertie permettent donc d'atteindre des puissances bien plus importantes que ce que pourrait fournir le réseau, des puissances nécessaires pour les expériences sur la fusion. Des volants d'inertie permettent aussi d'éviter de courtes coupures de courant sur des installations stratégiques. Dans le cas de coupures prolongées, ils permettent de gérer la bascule vers d'autres systèmes de production d'électricité. Des volants d'inertie peuvent par exemple permettre de maintenir un réseau électrique dans une installation clef comme un hôpital ou un centre de données en attendant qu'un générateur de secours, au diesel par exemple, démarre. En fait, pour ces applications sur le réseau électrique, un volant d'inertie est plus en concurrence avec les batteries dont on parlera dans une autre vidéo qu'avec les STEP.

Et est-ce qu'il y a des applications qui n'ont aucun rapport avec le réseau électrique ?

Oui, on peut l'utiliser pour la mobilité par exemple. A Rennes, un volant d'inertie d'une masse de 2,5 tonnes, est mise en mouvement au freinage des rames de métro et l'énergie stockée est restituée quand la rame repart. Cette installation permet d'économiser 250 000 kWh par an, soit une dizaine de jours de fonctionnement pour ce métro. Sans cette récupération, l'énergie serait perdue sous forme de chaleur au freinage. On ne va pas faire toutes les applications possibles parce qu'elles sont nombreuses mais c'est pour ce type d'installation que le volant d'inertie est le plus avantageux parce qu'il faut stocker cette énergie peu de temps mais être capable de réagir rapidement et d'absorber et fournir beaucoup de puissance.

Et est-ce que c'est mieux que des batteries pour ce type d'usages ?

Sur le plan économique ils ne sont pas forcément compétitifs. Mais l'avantage du volant d'inertie par rapport aux batteries c'est qu'il peut faire beaucoup plus de cycles et a donc une bien meilleure durée de vie. Certaines installations électriques, pour des centres de données par exemple, utilisent les deux. Les volants d'inertie sont là pour les interruptions les plus courtes et les batteries ne prennent le relais qu'en cas de panne plus longue. Dans ce cas là, les volants d'inerties permettent d'augmenter la durée de vie des batteries en limitant leur utilisation. Les volants d'inertie utilisent aussi des matériaux bien plus communs et avec moins d'impact écologique que des batteries. Si on ajoute la plus grande durée de vie, les volants d'inertie sont une des solutions de stockage les plus écologiques. C'est également une technologie éprouvée et donc fiable.

Si la majorité des volants d'inertie se déchargent en moins d'une heure est-ce qu'on peut vraiment parler de stockage d'énergie?

Physiquement oui même si c'est pour du court terme. Les différents moyens de production sont comme une grosse boîte à outil et suivant les problèmes auxquels on veut répondre, on utilise différentes technologies. Ici, on a un peu vu les deux extrêmes. D'un côté les STEP qui permettent le stockage de l'électricité en grande quantité sur de longues échelles de temps mais sont relativement lentes et demandent d'importants investissements. Et de l'autre côté les volants d'inertie qui sont extrêmement rapides et puissants mais incapables de stocker de grande quantité d'énergie. C'est une des premières distinctions très importante quand on parle de moyen de stockage. D'un côté l'énergie stockée et de l'autre la puissance que le système est capable de fournir. Pour le réseau électrique et sa stabilité, la vitesse de réaction est également un paramètre qu'il faut garder à l'esprit.

Et est-ce qu'il y a d'autres technologies de stockage d'énergie sous forme mécanique ?

Une autre technologie bien connue est le stockage sous forme d'air comprimé.

Comme dans des pistolets à air comprimé ?

Et oui... dans ce cas là, ton réservoir d'air comprimé est un stock d'énergie que tu utilises pour propulser un projectile à chaque fois que tu appuies sur la gâchette. L'utilisation de l'air

comprimé est énorme. En Europe, 10 % de toute l'électricité utilisée par l'industrie sert à produire de l'air comprimé, donc à stocker de l'énergie sous forme d'air comprimé. On fait ça avec des compresseurs électriques qui permettent d'atteindre des pressions de 100 à 300 bars.

Je ne savais pas que c'était autant utilisé dans l'industrie... vu les quantités on doit aller au-delà des bouteilles de plongée.

On s'en sert pour faire fonctionner un paquet de machines, de la fraise de dentiste au foreuses et meuleuses pneumatiques en passant par les marteaux burineurs, les agrafeuses, cloueuses, les tournevis ou les marteaux pneumatiques. On utilise l'air comprimé pour nettoyer, poser des rivets, scier ou polir. On peut aussi utiliser l'air comprimé comme énergie motrice, notamment dans certaines mines où l'usage d'électricité ou de ressources fossiles posent de gros risques d'explosion. Bref, on utilise énormément l'air comprimé, plus qu'on pourrait le penser et pour plein d'utilisations différentes.

Et pourquoi c'est si populaire ?

Parce que ce n'est pas très cher, c'est propre, c'est robuste, il n'y a aucune émission polluante à l'usage, c'est utilisable en milieu explosif... etc les avantages sont nombreux. Parmi les défauts, le plus important est le faible rendement de ce moyen de stockage. Vu les contraintes techniques importantes pour réussir à tenir des pressions élevées, les réservoirs dans lesquelles se fait cette compression ne sont pas capables de stocker la chaleur. Or, quand on comprime un gaz, il chauffe et cette chaleur, c'est de l'énergie perdue. On perd environ la moitié de l'énergie au moment de la conversion entre électricité et air comprimé.

La moitié, mais les pertes sont énormes !

Et encore, je parle de cas où c'est optimisé parce que je parle d'une application particulière: le stockage d'électricité par air comprimé. Dans ce cas, on stocke un surplus de production électrique sous forme d'air comprimé qu'on utilise pour produire de l'électricité quand on a besoin. Dans ce cas, le rendement total est autour de 50%. Il faut stocker 2 kWh d'électricité pour en récupérer 1. Pour les compressions dans l'industrie, le rendement est probablement encore moins bon. L'air comprimé a des avantages incontestables mais on perd pas mal d'énergie par rapport à un usage direct d'électricité quand celui-ci est possible.

Mais pour le stockage de l'électricité... avec des pertes de 50%, c'est un peu mort non ?

Pas forcément parce que c'est une technologie qui s'améliore. L'idée serait de stocker la chaleur provoquée à la compression séparément de l'air comprimé pour pouvoir la récupérer au déstockage. Avec ce type de système, on peut faire monter le rendement à 70%. Si on arrivait à faire des systèmes de stockage isotherme dans lesquelles la chaleur est extraite et stockée au fur et à mesure de la compression, on pourrait encore accroître l'efficacité de ce type de stockage. La pertinence du stockage par air comprimé dépend des avancées potentielles sur le rendement.

Et quelle est l'utilité de ce stockage par air comprimé ?

En fait, ça va beaucoup dépendre de la capacité de stockage utilisée pour l'air comprimé. La plus grosse installation a été installée aux Etats-Unis en 1991. Oui, là encore, c'est une technologie relativement ancienne. Cette installation stocke l'air comprimé dans une cavité géologique de 538 000 mètres cubes. Ce réservoir important permet à ce système de stockage de faire des opérations sur une échelle hebdomadaire. On se situe donc plus proche des STEP que des volants d'inertie dans l'usage. Mais trouver ce type de réservoir est une contrainte géologique importante. Des systèmes de stockage par air comprimé existent aussi dans des réservoirs en acier que l'on enterre. Dans ce cas, le volume est évidemment bien plus faible et on a d'autres utilisations, comme le lissage de moyens de production électrique intermittent.

En même temps si la plus grosse installation date de 91... ça ne doit pas être un moyen de stockage très répandu.

Effectivement c'est une possibilité de stockage très peu utilisée. Cela peut changer dans les années à venir parce que nos besoins en terme de stockage sont plus élevés et différents qu'à l'époque avec le déploiement de moyens de production intermittents. Mais, le stockage par air comprimé souffre de son rendement faible Il n'arrive pas à faire le poids face à la concurrence qu'on parle de batteries dont le prix ne cesse de chuter ou de turbines au gaz naturel qui sont souvent utilisées en parallèle des moyens de production intermittents. La dynamique est donc mal engagée pour un moyen de stockage qui dépendrait d'importants développements technologiques pour avoir une chance de se déployer. Cette technologie a été longtemps pressentie comme prometteuse mais n'a jamais réussi à décoller.

Bon est-ce qu'on a fait le tour des moyens de stockage mécanique ?

On a parlé des trois principales technologies qu'on retrouve sous cette étiquette: les STEP, les volants d'inertie et le stockage par air comprimé. Mais, on pourrait imaginer beaucoup de moyens de stockage utilisant l'énergie mécanique. Certains ne s'en privent pas pour vendre du rêve. C'est assez difficile de se faire une opinion vu les nombreuses propositions même si certaines pourraient peut-être rapidement se retrouver sur le marché.

Ok un petit exemple rapide ?

A l'échelle pilote, il y a par exemple l'idée de mettre des sphères en béton remplies d'air au fond de la mer. Quand on veut de l'électricité, on laisse l'eau entrer dans la sphère qui produit de l'électricité en faisant tourner un turbo- alternateur. Quand on a un surplus d'électricité, on fait tourner la turbine dans l'autre sens pour chasser l'eau. Ces sphères seraient situées jusqu'à 700 m de profondeur. La force qu'on utilise ici est donc le poids de la colonne d'eau au-dessus des sphères mais le principe se rapproche des STEP. Ce stockage a plus d'intérêt si il est assez proche des moyens de production d'électricité pour éviter les pertes en ligne et pourrait donc être un atout pour les parcs éoliens offshore par exemple... Bon, je dis "pourrait" parce qu'on en est à des expériences pilotes.

En fait pour le stockage Il y a vraiment plein de trucs différents.

Et Oui. Et Il y a aussi de très nombreuses propositions qui sont difficiles à juger sans que ça prenne pas mal de temps. Surtout que beaucoup d'idées ne disposent pas d'expériences

pour démontrer physiquement leur intérêt. Certains proposent par exemple d'avoir des dispositifs au milieu de l'océan capables de maintenir de grandes masses de béton. En cas de surplus d'énergie, on fait remonter les masses vers la surface et on les laisse retomber vers le fond de l'océan quand on veut récupérer de l'énergie. Dans ce cas, l'acheminement de l'électricité, la corrosion du milieu marin et la complexité d'un système de cette taille sont des freins. A plus petite échelle, on pourrait faire des rails inclinés et faire monter un train quand on a trop d'énergie pour le faire redescendre quand on veut en récupérer. En fait, des systèmes qui stockent de l'énergie sous forme gravitaire sous forme mécanique peuvent être inventés par tout le monde. La pertinence d'une telle invention dépend de caractéristiques techniques et économiques qui demandent pas mal de temps à examiner et dépend également des hypothèses qu'on fait sur les besoins de moyens de stockage. Il faut se rendre compte qu'on parle d'enjeux importants avec d'énormes potentiels économiques si une solution miracle apparaissait du jour au lendemain ce serait une telle opportunité économique qu'elle serait rapidement mise en pratique. Si on vous parle de solutions miracles qui n'existent pas, c'est sans doute qu'il y a des raisons même si ce n'est pas toujours facile de les comprendre. Après, des solutions de petite échelle sont plus faciles à expérimenter, démontrer et déployer que des propositions pharaoniques comme transformer la Manche en STEP.

On commence à déblayer le sujet du stockage, on a donc appris pas mal de chose en commençant par l'existence de besoins très différents. Pour le stockage de l'électricité, on peut avoir besoin de stocker de grandes quantités d'énergie sur des durées assez longues pour pallier l'intermittence de moyens de production ou reporter une surproduction nocturne d'électricité vers les pics de demande en journée. Ce rôle peut-être rempli par les STEP et, théoriquement, par du stockage à air comprimé mais il est très peu déployé aujourd'hui.

Mais, on a aussi besoin de moyens de stockage capable de réagir très rapidement et de fournir une grosse puissance pendant une faible durée pour réguler la fréquence sur le réseau électrique, permettre à des générateurs de secours de démarrer lisser la production du renouvelable intermittent ou protéger des installations clefs de courtes interruptions d'alimentation. Les volants d'inertie sont des candidats intéressants pour ces besoins. On peut représenter tout ça sur une slide. Sur un axe, on voit le temps de décharge et sur l'autre la puissance. On place les moyens de stockage dont on a parlé aujourd'hui et on complétera tout ça petit à petit.

Il est important de comprendre les différents besoins de stockage parce qu'un moyen de stockage vient répondre à une problématique précise et que son coût dépend de l'utilisation qu'on en fait. Il faut également garder à l'esprit qu'on a recours au stockage que lorsqu'il est nécessaire et que c'est un coût supplémentaire qui se répercute ultimement sur le consommateur. C'est également un coût écologique qui s'ajoute aux moyens de production qu'il vient supporter.

Dans cette vidéo, on s'est concentré sur le stockage par énergie mécanique. On a vu que les STEP sont le moyen de stockage le plus répandu et de très loin et que la capacité installée va continuer d'augmenter mondialement dans les années à venir. C'est une technologie fiable, qui dispose d'un bon rendement avec des installations qui ont une longue durée de vie. Du fait de ces nombreux avantages, il y a des projets pour adapter le principe

des STEP et les sortir des montagnes.

Les moyens de stockage par air comprimé pourraient être intéressants mais cette technologie n'a pas l'air de décoller. Sans développements technologiques qui amélioreraient le rendement celui-ci reste leur principal défaut. Enfin, on a parlé des volants d'inertie qui sont utilisés pour certaines applications très précises mais qui ne constitue pas un moyen de stocker massivement l'énergie.

Merci à tous d'avoir regardé cette vidéo en entier. Si vous l'avez trouvée cool, vous pouvez la partager autour de vous puisqu'il y a souvent beaucoup de questions autour du stockage.

Vous l'aurez compris, le stockage est un sujet compliqué. Je remercie tous ceux qui m'ont aidé à produire ce script en m'apportant leurs conseils et connaissances sur ce sujet technique. J'ai l'impression qu'on n'a pas beaucoup de notions sur ces questions alors je ratisse large mais si vous trouvez qu'il y a des choses inutiles ou manquantes, signalez-le moi et j'essaierai d'adapter le contenu en conséquence. Je pense que dans la prochaine vidéo, je parlerai du stockage dans les batteries.

Je remercie sincèrement tous ceux qui me soutiennent sur tipeee et sur Utip. C'est grâce à vous que je peux continuer de faire ce que je fais ! C'était le Réveilleur et à bientôt sur le net.