



1.1 EXERCICES DE TECHNIQUE D'ESTIMATION EN ENERGIE

Exercice 1.1.j Estimation stockage :

L'objectif de cet exercice est d'estimer le dimensionnement de chaque système de stockage demandé pour un besoin de 100 kWh (3600 MJ) pour des applications résidentielles. En effet, une résidence moyenne consomme 20 000 kWh en environ 400 jours, ou 50 kWh/jour. Ainsi un système de stockage de 100kWh, confère deux jours d'autonomie électrique pour pallier à l'intermittence des renouvelables. Il aurait été possible de considérer 3 jours d'autonomie ou plus, mais l'exercice suggère un calcul côté minimal sans perte de généralité.

Cependant, il faut savoir qu'une maison canadienne moyenne consomme davantage car elles n'ont pas toutes été construites après 2016¹. Dans l'exercice, des résolutions aux questions sont proposées, mais celles-ci ne sont pas uniques. L'important est d'arriver le plus proche de la réalité possible (une relation exacte à 20% ou 30% est souvent ce que recherche un ingénieur dans ses estimations) avec logique et réflexion, davantage qu'avec des calculs sophistiqués.

Question 1 : Estimez le dimensionnement du stockage par gravité.

Question 2 : Estimez le dimensionnement du stockage par la batterie classique électrochimique (pile rechargeable AA puis plomb-acide).

Question 3 : Estimez le dimensionnement du stockage par l'air comprimé.

Question 4 : Estimez le dimensionnement du stockage par le volant d'inertie.

¹ RNCAN, 2017 : Maison unifamiliale moyenne bâtie après 2016 (Chauffage, 16 298 kWh, Clim : 793 kWh, Surface : 201 m²)

RÉPONSES

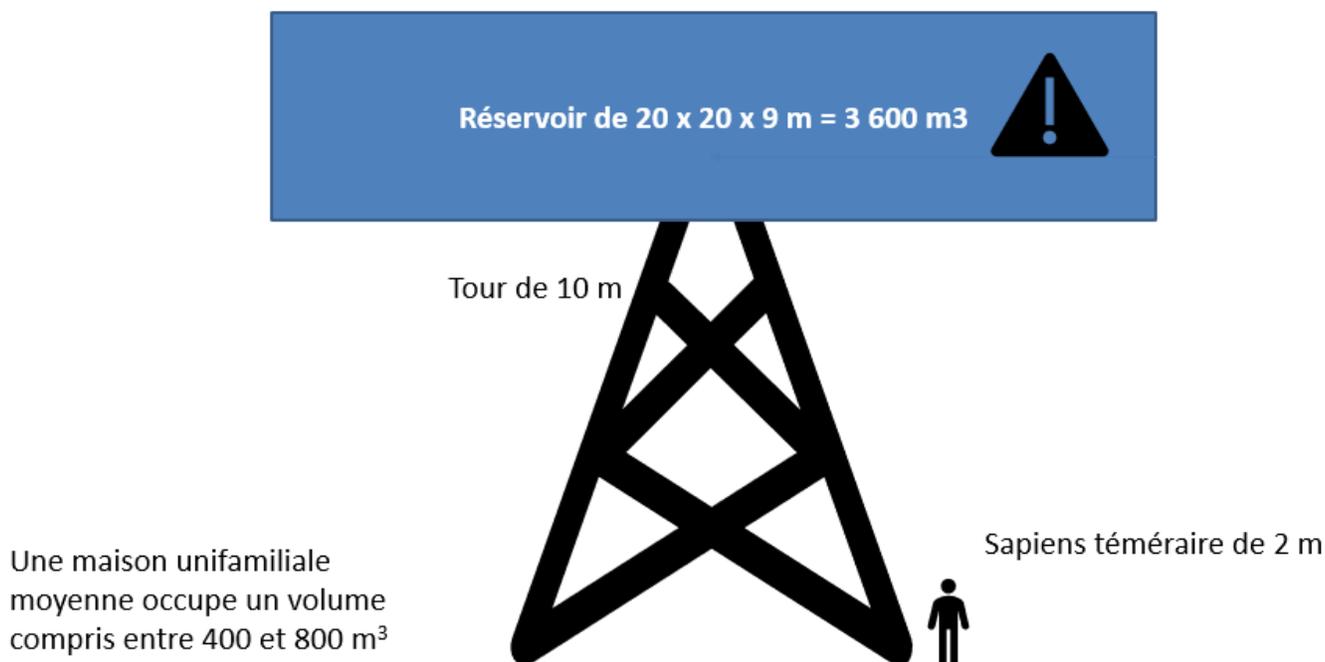
Question 1 : Estimez le dimensionnement du stockage par gravité.

Pour réaliser ce stockage on peut élever des rochers ou des masses, ou encore pomper de l'eau. Ainsi, élever une masse de 300 kg de 3 m donne $mgh \sim 10 \text{ kJ}$:

- Une batterie AA rechargeable (1,5V, 2 Ah) contient 3 Wh $\sim 10 \text{ kJ}$;
- Le stockage gravitationnel a une densité d'énergie TRÈS faible.

Pour obtenir 100 kWh de stockage gravitationnel à 10 m (ouille!) de hauteur, il faut ($100 \text{ kWh} \times 3,6 \text{ MJ/kWh} = 3\,600 \text{ MJ}$), $m = E/(gh) = 3\,600 \text{ MJ} / 10 \times 10 = 3\,600 \text{ Tonnes}$.

Habiteriez-vous dans une maison où une masse de 3 600 tonnes en pierre (ou un volume de $3\,600 \text{ m}^3$ d'eau, au choix) serait suspendue à 10 mètres au-dessus de votre tête? Oups...



Question 2 : Estimez le dimensionnement du stockage par la batterie classique électrochimique (pile rechargeable AA puis plomb-acide).

Pour une batterie AA :

Par intuition, une batterie AA rechargeable (1,5V, 2 Ah) contient 3 Wh \sim 10 kJ. Ainsi, il faut $N = 3\,600\text{ MJ}/10\text{ kJ} = 360\,000$ batteries AA. Sachant, par les moyens du bord, qu'une pile pèse 23 g, il faut donc $360\,000 \times 23 \sim 7\,200\,000\text{ g} \sim 7,2\text{ T}$ de batteries AA rechargeables classiques, ce qui risque fort d'exercer une charge non prévue sur la structure de la résidence, à moins de les installer au garage ou au sous-sol.

De plus, le volume d'une pile AA est de 50 mm x 15 mm environ, ce qui correspond à un volume (incluant l'air autour de la forme cylindrique) de $0,05 \times 0,015 \times 0,015\text{ m}^3 \sim 5 \times 1,5 \times 1,5 \sim 11,25 \times 10^{-6}\text{ m}^3$ par pile ou $V \sim 360\,000 \times 11,25 \times 10^{-6}$ ou 4 m^3 , ce qui risque fort d'encombrer l'une des pièces de la résidence, le garage ou le sous-sol (le cas échéant).

Par expérience, une batterie AA rechargeable (1,5V, 2 Ah) coûte environ 1\$ (en achat de 24), cette solution coûterait donc approximativement 360 000\$.

Cependant, cet exercice n'insiste que sur la physique, l'aspect coût est abordé dans le thème 1.2. Il importe toutefois de mentionner que l'ordre de grandeur du coût de cette solution de stockage est comparable (et supérieur) à celui de la construction d'une résidence moyenne (Soumissionrenovation.ca: 150\$/pi.ca ou 1500\$/m² ou 300 000\$, davantage plausible à Montréal qu'à Vancouver, Calgary, Halifax ou Toronto) au Canada.

Pour une batterie au Plomb :

Chaque réaction implique un atome de Pb dans l'anode et une molécule de PbO₂ dans la cathode avec deux électrons de 2 eV chacun.

On a 3 600 MJ (100 kWh) de demande donc (Relation de base : 1 MJ = 6.2415096471204E+24 eV) 10^{28} atomes de Pb. Ainsi, la masse requise est alors de $207 / (6 \times 10^{23}) \times 1 \times 10^{28} \sim 34 \times 10^5\text{ g} \sim 3,4\text{T}$ soit un peu moins lourd que des piles AA, mais on néglige les autres éléments de la batterie.

De plus, la production mondiale de Pb est 5 000 000T/an, il est alors permis de penser qu'il serait possible de consacrer TOUT le plomb pour fournir 1 000 000 de maisons/an. Cependant, les réserves (US Geological survey 2014) sont de 89 MT pour une durée prévue de 18 ans. Bien entendu, la ressource est plus vaste...avec 2GT...

Si vous ne comprenez pas la différence entre la **réserve** et la **ressource**, elle est abordée dans le Module 2 Notions fondamentales.

Quoiqu'il en soit, cette solution ne peut être généralisée puisque le Pb est employé ailleurs que pour fabriquer des batteries stationnaires et que ses réserves sont limitées.

Question 3 : Estimez le dimensionnement du stockage par l'air comprimé.

Par intuition, on considère une pression de charge à 200 atm. L'énergie demandée est de $E = P_0 V_0 \ln(P_f/P_0) = \ln(200) P_0 V_0 = 5.3 P_0 V_0 = 3\,600 \text{ MJ}$. Par intégration de $PdV = NkT(dV/V)$ on retrouve $P_0 = 10^5 \text{ Pa}$. Ainsi, $V_0 = 700 \text{ m}^3$ et $V_f = 3,5 \text{ m}^3$ soit un cube de 1,5 m de côté ou ceci :



C'est aussi volumineux que les batteries. Or, on fait l'hypothèse d'une détente adiabatique, ce qui n'est pas le cas. Pour davantage d'information sur le stockage par air comprimé, consultez le module 17.

Question 4 : Estimez le dimensionnement du stockage par le volant d'inertie.

Pour un volant d'inertie on a un cylindre plein ; $I = \frac{1}{2}MR^2$. Avec une vitesse périphérique de $v \rightarrow \omega = v/R$; $E = \frac{1}{2}I\omega^2 = \frac{1}{4}Mv^2$. Par intuition, si $v = 300 \text{ m/s}$, alors il faut 16 tonnes d'acier. Puis en considérant la densité de l'acier, il en faut 2 m^3 :

- 2 m de haut et 1,2 m de diamètre ;
- Accélération périphérique $v^2/R = 16,000g$, ça pète!
- En abaissant la vitesse à 125 m/s, le diamètre est alors de 2,5 mais la masse de 80 tonnes. L'accélération chute à seulement 1250g.



25 kWh, 2m x 3 m, 150 000\$

Financièrement, il est possible d'acquérir 4 appareils tels que celui illustré ci-haut. Cependant, les volants d'inertie ne sont pas faits pour cette application !