1. Analyse en énergie

1.1 Techniques d'estimation en énergie

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

Département de génie mécanique

Inspiration libre et adaptation de :

- Physiciens d'exception : Fermi et Feynman
- Order of Magnitude Physics at Caltech
- Estimation and Scaling in Physics at UCSD

Questions

ENR2020

- Pourquoi fait-on des estimés d'ordre de grandeur?
  - Parce que c'est un bon exercice mental
  - Pour éviter de faire des calculs complexes pour rien
  - Pour éviter de violer les lois de la physique sans le remarquer par la suite
  - Pour éviter de devoir facturer une longue et intense période de calculs et l'usage de logiciels spécialisés à un client alors qu'il peut être assez évident qu'un projet aurait dû être abandonné au départ
  - Pour gagner en efficacité
  - Toutes ces réponses

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Des exemples simples
- Comment une solution approximative peut-elle être plus instructive que la solution exacte?
- Des exemples en énergie
- Le nouvel outil
- Conclusion

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs***
- Des exemples simples
- Comment une solution approximative peut-elle être plus instructive que la solution exacte?
- Des exemples en énergie
- Le nouvel outil
- Conclusion

Introduction

- Outre la faisabilité économique, discutée dans un autre thème de ce module, il faut commencer par se poser la question à savoir si un projet est PHYSIQUEMENT possible.
- Par exemple, viole-t-il la première la loi de la thermodynamique? Celle de l'attraction gravitationnelle?
- Après l'évaluation des ordres de grandeur et le raffinement des estimés, est-il possible d'en arriver à une solution réaliste, plausible et éventuellement démarrer une analyse de faisabilité technico-économique?

Introduction

- Généralement, l'enseignement technique met l'accent sur les réponses exactes:
  - Si vous êtes un physicien, vous résolvez les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène à six décimales;
  - Si vous êtes chimiste, vous mesurez les taux de réaction et les concentrations à deux ou trois décimales;
  - Si vous êtes une étudiant ingénieur, vous tentez de découper une poutre d’acier à trois décimales après le millimètre…
- Dans cette courte présentation:
  - Vous serez confrontés à l’exigence d’acquérir des compétences complémentaires; vous devez être des ingénieurs avec les pieds bien ancrés au sol;
  - Vous apprendrez qu'une approximation de la réponse n'est pas simplement suffisante; **c'est souvent plus utile qu’une réponse exacte**.

Introduction

- Lorsque vous abordez un problème nouveau, vous devez d'abord saisir **les idées principales** et les **principes importants**, parce que ces idées et principes structurent votre **compréhension** du problème.
- Il est, et de loin, plus facile d'affiner cette compréhension que de créer une analyse raffinée en une seule étape.
- D’autant que cette analyse raffinée peut s’avérer inutile une fois l’essentiel déterminé.

Introduction

- L’expression « ordre de grandeur » reflète l’accent mis sur l'approximation.
- Un « ordre de grandeur » est un facteur de 10.
- Être «dans un ordre de grandeur» ou estimer une quantité « par ordre de grandeur » signifie que votre estimation est approximativement dans un facteur de 10 de chaque côté
  - 0,01 ; 0,1 ; 1; 10 ; 100 ; 100 ; 1 000 ; 10 000 ; etc
- Cette présentation vous initie à l’art (car en soi, c’est un art!) de déterminer de telles approximations.

Introduction

- Si le syndrome de la page blanche est rompu par l'écriture, le blocage de l'estimateur est cassé en estimant.
- Cette exploration de l'approximation débute ainsi en utilisant des exemples de tous les jours.
- Ces étirements assouplissent vos muscles d'estimation, qui peuvent être endormis par de nombreuses années d'éducation traditionnelle.

Introduction

- Enrico Fermi et Richard Feynman sont peut-être les deux physiciens les plus illustres à ce sujet:
  - Ils ont popularisé cette méthode
  - Ils ont réalisé des estimés fantastiques.
- Si vous les connaissez, ce sujet vous apparaitra sans doute très familier.
- Dans le cas contraire, cet outil vous servira bien au-delà de ce cours.

Introduction

Wikipédia
L'encyclopédie libre

- Les problèmes célèbres de Fermi
  - Combien y a-t-il d'accordeurs de piano à Chicago?
  - Combien de molécules du dernier souffle de Jules César aspirez-vous à chaque respiration?
  - Quelle est la distance parcourue par une voiture avant qu'une couche d'une molécule du pneu soit usée?
  - Combien de pointeurs laser faudrait-il pour éclairer visiblement la Lune?
  - Quelle est la densité d'un nuage typique?

- Pour les mordus - Livre: Guesstimation, par Weinstein et Adam

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- ***Des exemples simples***
- Comment une solution approximative peut-elle être plus instructive que la solution exacte?
- Des exemples en énergie
- Le nouvel outil
- Conclusion

Des exemples simples

ENR2020

- Combien d'argent y a-t-il dans une voiture blindée Garda entièrement chargée?
  - 100$
  - 1 000$
  - 10 000$
  - 100 000$
  - 1 000 000$
  - 10 000 000$
  - 100 000 000$

Des exemples simples

- Combien d'argent y a-t-il dans une voiture blindée Garda entièrement chargée?
  - Le montant dépend de la taille de la voiture, de la valeur des billets (20$, 50$, 100$), du volume de chaque billet, de la quantité d'air entre les billets, entre chaque piles de billets et de nombreux autres facteurs. Vague? Imprécis?
  - Une compétence importante que vous acquerrez (peut-être) par cette présentation, par la pratique et par l'exemple, est de déterminer **quelles sont les hypothèses** à formuler.
  - Parce qu'une réponse exacte n'est souvent **pas** nécessaire, tout ensemble raisonnable d'hypothèses fera l'affaire. La mise en route est plus importante que de mettre scrupuleusement les points sur les ***i***; faire une hypothèse - n'importe quelle hypothèse - et commencer.

Des exemples simples

- Combien d'argent y a-t-il dans une voiture blindée Garda entièrement chargée?
  - Il est possible de corriger les exagérations grossières après avoir obtenu quelques résultats préliminaires et appris quelles hypothèses sont les plus critiques.
  - Si vous gardez le silence plutôt que de formuler des postulats, aussi grossiers soient-ils, vous ne découvrez jamais quoi que ce soit.

Des exemples simples

- Commençons par les conventions d'égalité ou pseudo-égalité, par ordre croissant de précision.
  1. Le symbole $\propto$ est utilisé pour les proportionnalités, où les unités sur les côtés gauche et droit du $\propto$ ne correspondent pas (nécessairement); par exemple, la 2ème loi de Newton pourrait se lire $F \propto m$.
  2. Le symbole $\sim$ est utilisé pour des relations dont la dimensionnalité est correcte (les unités correspondent), qui sont souvent exactes à un facteur de 5 près dans les deux sens. Par exemple, *énergie cinétique* $\sim mv^2$ ou $\pi \sim 3 \sim sqrt(10) \sim 10/3$
  3. Comme le signe $\propto$, le signe $\sim$ indique l'omission d'une constante; avec le symbole $\sim$, la constante est sans dimension.
  4. Le symbole ≈ est finalement employé pour souligner que la relation est exacte à, disons, 20 ou 30%. C'est souvent ce que recherche un ingénieur.
  5. Parfois, les relations $\sim$ sont aussi exactes; le contexte fera la distinction.

Des exemples simples

- Retour au problème de la voiture blindée.
  Combien d'argent ça peut contenir?
  - Avant d'essayer une méthode systématique, essayez de deviner.
  - Effectuez une supposition:
    - Éclairée si vous avez des connaissances en ce domaine (peut-être travaillez-vous pour une compagnie d'assurance, et vous avez écrit la police d'assurance achetée par la compagnie de véhicules blindés).
    - Grossière si vous n'avez aucune connaissance.
  - Puis après avoir obtenu une estimation plus fiable, comparez-la à votre estimation initiale:
    - La merveilleuse machine à apprentissage qu’est votre cerveau améliorera vos suppositions pour le prochain problème.
    - Vous entraînez votre intuition, et, comme présenté à la fin de cet exemple, vous aidez votre mémoire.

Des exemples simples

- Une première technique : tenter de deviner
  - Procéder avec son intuition et sans employer une méthode systématique, mais en tentant de demeurer logique
- Pour le problème proposé, disons que la voiture blindée contient 1 million de dollars.
  - Pas 10 000$ ou 100 000$. Ces montants semblent un peu faibles pour requérir de telles dépenses.
  - Pas 100M$ ou 1G$. A 100M$, il semble que des malfaiteurs auraient déployé d'importants moyens, et le feraient souvent.
  - Il semble que 1M$ à 10M$ seraient des montant plausibles. Des articles de journaux pourraient faire état de braquages célèbres de tels véhicules blindés.

Des exemples simples

- Une seconde technique : diviser et conquérir
  - Diviser le problème global en sous-problèmes à estimer.
- Pour le problème proposé:
  - V, volume de la voiture blindée
  - v, volume d'un billet
  - $N \sim V/v$, trivial mais pas $N \approx V/v$. Pourquoi?
- Parce que l'erreur sur V et v peut être de 30-40%.
  - Il faut donc faire des estimés de plus petits problèmes: V et v

Des exemples simples

- Une troisième technique : mentir habilement
  - Appliquer un raisonnement simple à une problème compliqué, mal défini, imprécis et flou, en effectuant une hypothèse fausse mais plausible.
- Pour le problème proposé (volume de la voiture, V):
  - L'espace de stockage dans une voiture blindée a une forme irrégulière, avec des rebords, des coins, et recoins; ***aucune formule simple*** n’indiquerait le volume exact, même si on essayait.
  - Cette situation est exactement le genre de problème pour lequel l’estimation de l’ordre de grandeur est conçue; le problème est ***mal posé*** et/ou ***sous-spécifié***. Les dimensions ne sont nullement connues.

Des exemples simples

- Pour le problème proposé (volume de la voiture, V):
  - La forme réelle est irrégulière, mais à un ordre de grandeur près, l'intérieur est **supposé** être un prisme rectangulaire. Une personne peut probablement s'allonger ou se lever avec de la place autour.
  - Ce volume est alors estimé tel que :

$$V \sim 2\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m} \sim 10\text{m}^3 \text{ ou } 10^7 \text{ cm}^3 \ (2 \neq 3 \text{ mais } 8 \sim 10)$$

  - Alors **supposons habilement**: prétendons que l'espace de rangement est d'une forme simple avec un volume que l'on peut **simplement** trouver.

Des exemples simples

- Une quatrième technique : utiliser les moyens du bord
  – Se référer à des données pertinentes connues ou faire une mesure simple avec les instruments disponibles dans son environnement immédiat.
- Pour le problème proposé (volume du billet de banque, v):
  – Poser une règle à côté d’un billet de banque
  – Ou simplement deviner avec vos doigts qu'un billet fait 6 cm × 15 cm. (Pour développer votre sens des tailles, devinez d’abord; puis, si vous vous sentez mal à l'aise, vérifiez votre réponse avec une règle. Comme votre sens des tailles va se développer, vous devriez sortir la règle moins fréquemment)

Des exemples simples

- Pour le problème proposé (volume du billet de banque, v):
  - Qu'est-ce qu'un billet d'un dollar? Une pellicule polymère, mais mentons habilement et supposons qu’un billet d’un dollar n’est que du papier ordinaire.
  - Quelle est l’épaisseur du papier? À côté de l’imprimante laser se trouve une rame de papier : La rame (500 feuilles) fait environ 5 cm d'épaisseur, donc une feuille de papier de qualité a une épaisseur de 10^{-2} cm.
  - Le volume est alors estimé tel que:

$$v \sim 6 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 10{-}2 \text{ cm} \sim 1 \text{ cm}^3.$$

Des exemples simples

- Une cinquième technique : suivre ses intuitions
  - Se faire confiance, sans référence autre que son expérience.
- Pour le problème proposé (nombre de billets de banque, N):
  - $N \sim V/v \sim 10^7\ cm^3/1\ cm^3 = 10^7$ billets.
  - Quelle est la valeur moyenne des billets? 5$,10$, 20$, 50$, 100$?
  - Le billet le plus courant est celui de 20$ (guichets bancaires), le billet de 50$ est une coupure plus rare.
  - Donc, cet estimé donne 200 millions de dollars.

Des exemples simples

- Pour le problème proposé (nombre de billets de banque, N):
  - On pourrait aussi employer une valeur près de la moyenne géométrique sur une échelle log:

$$\sqrt{10\ x\ 100} \sim 30$$

  - Interpoler sur une échelle logarithmique est plus approprié et précis qu'interpoler sur une échelle linéaire, car le nombre calculé est employé dans une chaîne de multiplications (ou de divisions).

Des exemples simples

- Une sixième technique : vérifier par recoupements
  - Faire un autre raisonnement.
- Pour le problème proposé:
  - $N \sim V/v \sim 10^7\ cm^3/1\ cm^3 = 10^7$ billets.
  - Et s'il y avait de la monnaie? Et si le camion n'était pas plein? Et si les billets ne sont pas tous neufs et lisses comme de feuilles d'imprimantes? Et si…

Des exemples simples

- Pour le problème proposé:
  - Quel est le poids de 200 000 000$ en billets de 20$, ou 10 millions de feuilles de papier de 1 cm^3?
  - Billet ⇨ Papier ⇨ Bois ⇨ Flotte sur eau ⇨ $\rho \sim 1\ g.cm^{-3}$
  - $10^7\ cm^3$ de billets auraient alors une masse de 10^7 g = 10 tonnes.
  - Si les gardiens doivent débarquer 10 000 kg à la main et qu'ils soulèvent 20 kg par transport, il y en a pour 500 voyages…

Des exemples simples

- Une septième technique : mettre à jour son estimé
  - Juxtaposer 1, 2 ou 3 estimés différents pour finalement faire un choix.
- Pour le problème proposé:
  - Premier estimé : 1 000 000$
  - Second estimé : 200 000 000$
  - Nouvel estimé : 20 000 000$ (50 déchargements manuels de 20kg)

Des exemples simples

The New York Times

F.B.I. Finds Armored Car Cash

By The Associated Press

Sept. 19, 1997

See the article in its original context from September 19, 1997, Section A, Page 18 | Buy Reprints

New York Times subscribers* enjoy full access to TimesMachine—view over 150 years of New York Times journalism, as it originally appeared.

SUBSCRIBE

*Does not include Crossword-only or Cooking-only subscribers.

F.B.I. agents today recovered as much as $18 million stolen in the nation's largest armored car robbery when they searched a small rented storage unit in the North Carolina mountains.

A trail that began in a construction refuse bin in Asheville, N.C., and led agents to Mexico City finally ended in the tiny community of Mountain Home, where the police say a former armored car driver, Philip Noel Johnson, stashed millions of dollars from the March 29 robbery in Jacksonville, Fla. The authorities said more than $18.8 million had been taken in the robbery.

Des exemples simples

- Cet exemple simple a été résolu en détail pour illustrer un exemple de chacune des techniques:
  – L'utilité de la technique **diviser et conquérir** fut illustrée en divisant le problème de volume en longueur, largeur et hauteur.
  – L'utilité du **mensonge habile** fut illustrée en supposant que le papier et les billets étaient semblables, et que la densité des billets était voisine de celle du bois.
  – L'utilité de **d'utiliser les moyens du bord** fut illustrée en employant la règle pour mesurer un billet ou en regardant une rame de papier à imprimante.

Des exemples simples

- Cet exemple simple a été résolu en détails pour illustrer un exemple de chacune des techniques:
  - L'utilité de **suivre ses intuitions** fut illustrée par le fait que transporter 10 tonnes de papier à la main dans un entrepôt prendrait trop de temps, et par le fait que le billet moyen ne pouvait être un billet de 10$ ou de 50$.
  - L'utilité de la **vérification par recoupement** fut illustrée en basant le raisonnement sur la masse plutôt que le volume, et sur la valeur probable du contenu du véhicule en fonction des mesures prises pour le protéger.

Des exemples simples

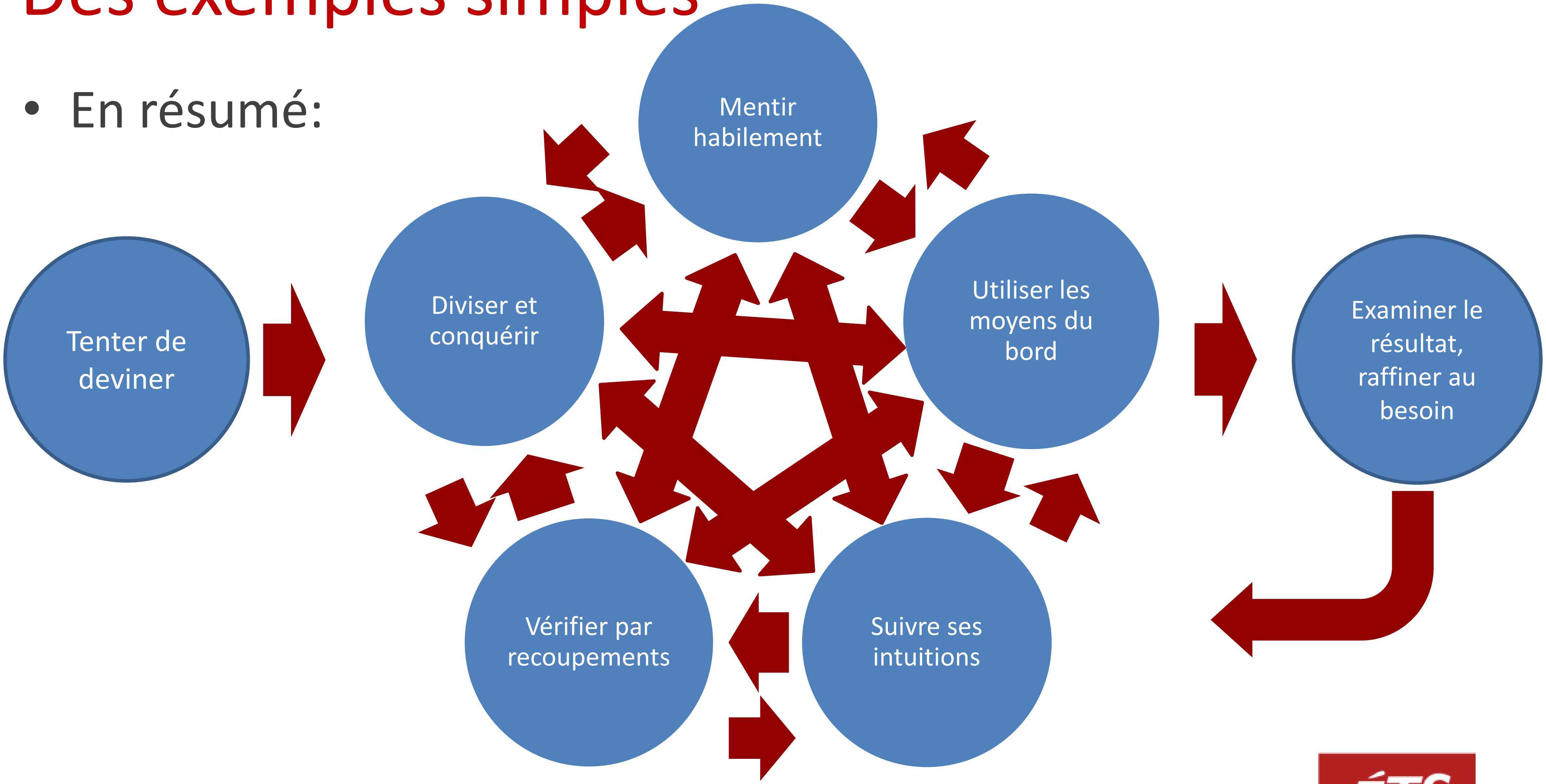
- Un dernier détail sur **diviser et conquérir:**
  - Si on fait n'importe quel estimé sans diviser, il est possible que nous fassions une erreur par un facteur 10 (dans une analyse des ordres de grandeurs).
  - Si on divise l'estimé en 4 parties, l'erreur sur chacune devrait être d'un facteur $\gamma = 10^{1/4}$.
  - Si ces erreurs ne sont pas corrélées, l'erreur globale dans le produit des erreurs est alors $\gamma^{\sqrt{4}} = 10^{1/2}$ ce qui est inférieur à 10.
- Ainsi **diviser** permet de plus facilement **conquérir**

Des exemples simples

- Cet exemple simple a été résolu en présentant chacune des techniques en succession.
- Mais ces techniques :
  - n'ont pas à être employées en séquence;
  - n'ont pas à être employées de manière systématique;
  - sont souvent imbriquées les unes dans les autres;
  - ne sont pas toujours toutes requises pour produire un estimé;
  - ne sont certainement pas infaillibles;
  - sont toujours instructives, et permettent de comprendre le problème étudié à défaut de proposer une solution exacte.

Des exemples simples

- En résumé:



Des exemples simples

ENR2020

- Combien de couches jetables sont consommées aux États-Unis à chaque année?
  - 100 000
  - 1 000 000
  - 10 000 000
  - 100 000 000
  - 1 000 000 000
  - 10 000 000 000
  - 100 000 000 000

Des exemples simples

- En bref
  - Tenter de deviner :
    - Mettons N ~ 10 millions
  - Diviser et conquérir :
    - combien de bébés (Nb), combien de couches par jour par bébé (Nc), jours par an (365).
  - Mentir habilement, Utiliser les moyens du bord, Suivre ses intuitions :
    - Un bébé utilise 7 couches par jour
    - Un bébé a entre 0 et 2 ans
    - Les citoyens des États-Unis vivent 70 ans
    - Il y a 2/70 ~ 3% de bébés (c'est une grande approximation)
    - Il y a 300 millions d'habitants aux États-Unis
    - $Nb \sim 3 \cdot 10^8 \times 0{,}03 \sim 10^7$, $Nc \sim 7$ et $N \sim Nb \times Nc \times 365 \sim 3 \cdot 10^{10}$

En réalité, ils en consomment annuellement $2{,}74 \cdot 10^{10}$.
L'estimation initiale était trop basse (10^6), le calcul de l'ordre de grandeur très près de la réalité.

Des exemples simples (Fermi)

- Combien d'enfants dans le monde rient si fort en ce moment que du lait (ou un équivalent culturel) s'écoule de leur nez?
  - 1
  - 10
  - 100
  - 1 000
  - 10 000
  - 100 000

Des exemples simples (Fermi)

- En bref
  - Tenter de deviner :
    - mettons 100
  - Diviser et conquérir , Mentir habilement , Utiliser les moyens du bord, Suivre ses intuitions :
    - 7 milliards de personnes dans le monde
    - espérance de vie: 60 ans
    - âge vulnérable: 4 à 10 ⇨ 10% de la vie ⇨ 700 millions de personnes à risque
    - la moitié des personnes ont vécu cette expérience ⇨ 350 M à risque
    - événement unique (cela n'arrive en moyenne qu'une seule fois dans une vie)
    - durée de 5s ⇨ pourcentage des victimes 5s / (3600s/h x 8760 h/a x (10-4)a)
    - % ~ 5 / (4000 x 8500 x 6) ~ 5 /(4 x 8,5 x 6 x 10^6) ~ 5/(200 x 10^6) ~ 5/2 x 10^{-8}
    - Donc, $N \approx 7 \times 10^9 \div 10 \div 2 \times 2{,}5 \times 10^{-8} \approx 7 \div 2 \times 2{,}5 \approx 10$

Des exemples simples (Fermi)

- Combien y a-t-il d’accordeurs de piano à Chicago?
  - 1
  - 10
  - 100
  - 1 000
  - 10 000
  - 100 000

Des exemples simples (Fermi)

- En bref
  - Tenter de deviner :
    - mettons 100
  - Diviser et conquérir , Mentir habilement , Utiliser les moyens du bord, Suivre ses intuitions :
    - il y a approximativement cinq millions d'habitants à Chicago ;
    - en moyenne, il y a deux personnes par foyer ;
    - en gros, un foyer sur vingt possède un piano qu'il faut accorder régulièrement ;
    - les pianos accordés régulièrement sont accordés à peu près une fois par an ;
    - un accordeur de piano met à peu près deux heures pour accorder un piano, en comptant le temps de déplacement ;
    - un accordeur de piano travaille huit heures par jour, cinq jours par semaine, cinquante semaines par an ou 2000 h/an ;
    - Donc, $N \approx 5 \times 10^6$ per $\div$ 2 per/f $\div$ 20 f/piano $\times$ 1 fois/an $\times$ 2 h/piano $\div$ 2000 h/an ≈ 125

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Des exemples simples
- ***Comment une solution approximative peut-elle être plus instructive que la solution exacte?***
- Des exemples en énergie
- Le nouvel outil
- Conclusion

Solution approx vs solution exacte

ENR2020

- Quelle est l'accélération gravitationnelle de la Lune?
  - 0,1 g
  - 0,5 g
  - 1 g
  - 1,5 g
  - 2 g
  - 10 g

Solution approx vs solution exacte

- Quelle est l'accélération gravitationnelle de la Lune?
  - Deviner : ça devrait être plus petit que 1 g, puisque la Lune est plus petite que la Terre. On pourrait dire comme point de départ:

    $g_{lune} = 0{,}5\ g_{terre}$

Solution approx vs solution exacte

- Estimation systématique de g_{lune}
  - La loi de gravitation nous indique que $g = \frac{F}{m} = \frac{GM}{R^2}$, où R est le rayon de l'objet à sa surface
  - Il faut alors rechercher les constantes M et R pour la Lune dans un livre ou sur le web, ainsi que la constante universelle G.
  - Alors: $g_{lune} \sim \frac{6{,}7\times10^{-11} m^3 g^{-1} s^{-2} X 7{,}3\times10^{22} kg}{[1{,}7\times10^6 m]^2} \sim 1{,}6\ m\ s^{-2}$
  - Il est aussi possible de calculer les exposants de 10^{11} au numérateur et 10^{12} au dénominateur, ce qui laisse 10^{-1} après division.
  - Alors : $g_{lune} \sim \frac{6{,}7\ X 7{,}3}{[1{,}7]^2} X 10 - 1 = \frac{48{,}91}{2{,}89\ X\ 10} \sim \frac{48}{30} = 1{,}6$

Solution approx vs solution exacte

- Estimation systématique de g_{lune}
  - Cette technique est facile à comprendre et constitue certainement une *bonne* manière de faire.
  - Mais elle ne nous apprend pas grand-chose, et nous force à trouver les valeurs des constantes *R, G* et *M.*
  - Il est possible d'employer une méthode qui ne demande que de connaitre g_{terre}
  - Il s'agit de **mettre la Lune à l'échelle de la Terre** (scaling method)

Solution approx vs solution exacte

- Estimation de g_{lune} par mise à l'échelle
  - On commence par employer la variable « densité » ρ, plutôt que la masse car la densité est indépendante du rayon de l'astre (avec l'expérience, vous deviendrez assez expert pour choisir vos variables);
  - Pour une sphère de densité constante: $M = (4\pi/3)\rho R^3$, et alors $g = \frac{F}{m} = \frac{GM}{R^2} \propto \rho R$
  - Cette relation ***d'échelle*** nous indique comment g varie avec le rayon d'une sphère et avec sa densité. Nous ne retenons ici **que** les facteurs qui varient entre la Lune et la Terre.

Solution approx vs solution exacte

- Estimation de g_{lune} par mise à l'échelle
  - Avec $g \propto \rho R$, dès que l'on suppose (mentir habilement) que la densité de la Lune et son rayon sont identiques à ceux de la Terre, on conclue que g est proportionnel à 1, ce qui indique qu'ils doivent être du même ordre de grandeur.
  - La première chose à corriger ici est que les deux astres n'ont pas le même rayon. Alors quel est le rayon de la Lune?
    - Lors de la pleine lune, le pouce (□ 1cm) tenu à bout de bras (≈1 m) cache la Lune, l'angle est alors de ≈ 0,01 rad
    - Ainsi, puisque la distance Terre-Lune est de ≈ 4 x 10^5 km, son rayon doit être près de ≈ 2 x 10^3 km. Pour estimer la distance Terre-Lune, on peut aussi considérer que la lumière ne met que 1,28 secondes pour s'y rendre…

Solution approx vs solution exacte

- Estimation de g_{lune} par mise à l'échelle
  - Si le rayon de la Lune ne fait que 2000 km, celui de la Terre en fait environ 6000. Ce qui donne un facteur 3 entre g_{lune} et $0{,}5\ g_{terre.}$
  - Pas tout-à-fait suffisant pour expliquer le facteur 6 calculé précédemment (en fait, le rayon de la Lune est plus faible).
  - Ça ne peut s'expliquer que par une différence de densité des deux corps célestes. La densité de la Lune doit donc (et elle l'est effectivement) être plus faible que celle de la Terre.
  - En fait, cette présentation ne concerne pas la géologie des deux corps, mais cette analyse nous renseigne sur les propriétés de ceux-ci.

Solution approx vs solution exacte

- Comparaison des deux approches
  - En fait, la densité de la Lune est celle de la croûte terrestre, soit environ 3000 kg/m^3, alors que celle de la Terre est en moyenne de 5000 kg/m^3 en raison de la constitution de son noyau, qui comporte des éléments plus denses en son centre.
  - Même si cette hypothèse n'est pas vraie, elle est plausible et suggère des expériences qui pourraient la réfuter ou la confirmer. Sa genèse montre un avantage de la méthode de mise à l'échelle sur la méthode exacte : la méthode de mise à l'échelle nous oblige à comparer les propriétés d'un système avec les propriétés d'un autre.
  - En faisant cette comparaison, nous approfondissons notre connaissance du problème et des systèmes en jeu.

Solution approx vs solution exacte

- Comparaison des deux approches
  - La méthode exacte va à l'encontre de l'objectif de l'analyse par ordre de grandeur.
  - Au lieu d'approximer, elle utilise des valeurs précises et donne une réponse précise. Vous combinez alors de nombreux effets physiques en une seule équation, vous ne pouvez donc pas facilement discerner quels effets sont importants.
  - La méthode de mise à l'échelle, où l'hypothèse est faite que la Terre et Lune ont la même densité et le même rayon, puis où des corrections sont progressivement apportées, instruit davantage.

Solution approx vs solution exacte

- Comparaison des deux approches
  – La méthode de mise à l'échelle explique :
    - pourquoi les deux constantes sont du même ordre de grandeur : les deux astres ont à peu près la même densité et la même taille (en comparaison avec les autres astres).
    - Pourquoi un facteur 1/6 existe entre les deux : le matériau lunaire est moins dense, et son rayon est évidemment plus faible.
  – La méthode de mise à l'échelle permet :
    - de construire progressivement la compréhension du problème.

Solution approx vs solution exacte

- Dernière remarque
  - Pour ce problème particulier, puisque toutes les données sont facilement disponibles sur le web (incluant la valeur de g_{lune}), la méthode de mise à l'échelle pourrait apparaitre peu utile, voire inutile.
  - Si c'est votre première réflexion, détrompez-vous. La quasi-totalité des problèmes que vous aurez à résoudre au cours de votre carrière ne seront pas de ceux pour lesquels la réponse, ou les données pour l'obtenir, sont sur le web; on ne vous paiera pas pour faire des recherches en ligne.

Plan de la présentation

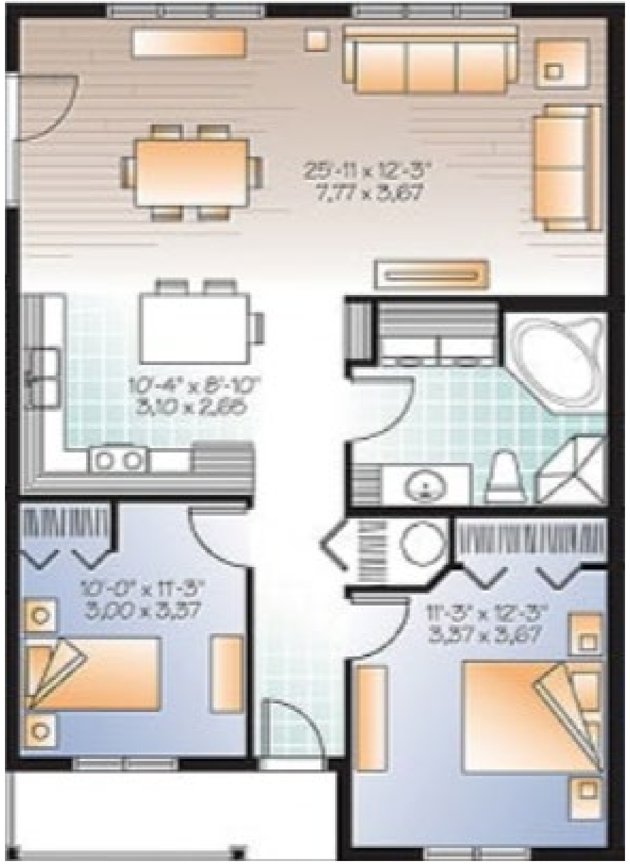
- Introduction et objectifs de la capsule
- Des exemples simples
- Comment une solution approximative peut-elle être plus instructive que la solution exacte?
- ***Des exemples en énergie***
- Le nouvel outil
- Conclusion

Des exemples en énergie

- Les exemples proposés ne concernent pas seulement les méthodes d'estimation.
- Ces exemples invitent à réfléchir à toutes les solutions-miracle qui sont proposées dans le domaine de l'énergie.
- En particulier, le remplacement des carburants fossiles autres techniques classiques par des technologies renouvelables.

Des exemples en énergie: l'appartement

- Combien ça coûte, chauffer un 4 ½ - 5 ½?
  - 4 plinthes de 1500-2000 W ou 6000-8000 W ~ 6-8kW
  - On chauffe six mois par an, donc 8760h/2 ~ 4400 h (six mois, parfois 7 car avril est assez frais)
  - Mais on chauffe 30 min/h lorsqu'il fait très froid donc, à ce taux, ça ferait environ 4400/2 ~ 2200 h de chauffage/an
  - On chauffe cependant 20 min/h en moyenne (peu en octobre et avril) lorsque l'on chauffe : 4500h/3 ~ 1500 h de chauffage/an
  - Le tarif est approximativement de 0,1$/kWh
  - Donc, Coût $ ~ 6-8 kW x 1500 h x 0,1$/kWh ~ 6-8 x 1,5 x 10^3 x 10^{-1} soit 900 à 1200$/an, environ.



Des exemples en énergie: la ferme laitière

- Des propriétaires d'une ferme laitière vous contactent pour déterminer s'il est possible, pour réfrigérer le lait produit localement, de remplacer des refroidisseurs classiques par une banque de glace produite avec des collecteurs PV.
- Les données dont vous disposez sont les suivantes:
  - Chaque traite produit 2400L
  - Il y a deux traites par jour
  - Il faut rafraichir le lait à 4°C en environ 1 heure et le maintenir à cette température jusqu'à la prochaine traite.
  - Après la seconde traite, le réservoir est nettoyé et le cycle recommence le lendemain.

Des exemples en énergie: la ferme laitière

- Les données de consommation sont les suivantes:

BESOIN ENERGETIQUE

Source	Consommation (kWh/an)
Eclairage	800
Tank + machine frigo	12 600
Pompe à lait	300
Chauffe eau	9 600
Pompe à vide	5 500
Nettoyage (sol et paroi)	600
Puits	1 100
Autres	1 000
Total	**31 500**

Des exemples en énergie: la ferme laitière

- L'idée originale est de:
  - Produire de la glace dès qu'il fait soleil;
  - Remplacer le stockage de batteries électriques (coûteuses) par un réservoir de glace (bon marché);
  - Remplacer un fluide réfrigérant potentiellement nocif pour l'atmosphère par un fluide naturel (eau);
  - Retirer la pompe à chaleur requise par les machines frigorifiques et utiliser le transfert naturel (de la glace vers le lait) avec des échangeurs.

Des exemples en énergie: la ferme laitière

- Problème 1: La consommation journalière
  - La consommation des refroidisseurs: 12 600 kWh/an (≈12 600)
  - Le COP du système de refroidissement actuel: 3
  - La quantité d'énergie extraite: 37 800 kWh/an (≈40 000)
  - Nombre de jours de fonctionnement: 365 jours (≈400);
  - Consommation quotidienne: (40 000/400 = 100kWh/j);
  - Consommation des refroidisseurs par traite ≈ **50 kWh/traite**
    - un peu plus en fait….

Les vaches produisent chaque jour de l'année deux traites de 2 400 L.

Des exemples en énergie: la ferme laitière

- Problème 2: Le refroidissement
  - La masse de lait: 2 400L/traite (≈3 000kg/traite)
  - La chaleur spécifique: 4 200J/kgK (≈4000 = 4kJ/kgK);
  - La différence de température: 37°C – 4°C (≈ 30 K);
  - L'énergie requise au refroidissement: 3x4x30 = 360MJ/traite
  - L'énergie requise au refroidissement: 360MJx1h/3600s = **100kWh/traite**

Votre client ne peut pas refroidir en une heure; ou bien sa consommation est trop basse, ou bien il ne tire pas 2400L par traite. Mais les chiffres sont tout de même du même ordre de grandeur. Ouf.

Des exemples en énergie: la ferme laitière

- Problème 3: Le taux de transfert
  - La paroi du fond, où on retire la chaleur, est à ≈ 1°C
  - La surface est de $\pi \times 1^2 \approx 3\ m^2$;
  - Le coefficient de transfert ≈ 100 W/m^2K (car ça brasse);
  - La différence de température 37°C – 1°C (≈33,333)
  - La puissance maximale retirée est de 100 x 3 x 33,333 = 10 kW
  - Cette puissance est le maximum requis; elle diminuera à fur et à mesure que le lait refroidira, $P_{moy} \approx$ 5kW.

Votre client ne peut pas refroidir la traite en une heure avec 5kW de puissance moyenne. Il faut au moins 20 heures pour refroidir 2400L par traite avec de la glace (sans considérer les pertes). Ici, ça ne marche pas!

Des exemples en énergie: la ferme laitière

- Problème 4: Le débit d'eau froide
  - La paroi du fond où on retire la chaleur est à ≈ 1^{o}C, l'eau entre à 0^{o}C et ressort à 2^{o}C. Elle ne peut pas sortir plus chaude que 4^{o}C car elle ne permettait jamais de refroidir le lait à 4^{o}C.
  - Pour retirer 100kWh en une heure, il faut une puissance moyenne de 100kW;
  - Puisque la température baisse pendant tout le processus, la puissance initiale est de 200kW;
  - La différence de température 2^{o}C – 0^{o}C (≈2^{o}C)
  - Le débit massique minimal requis est alors 200 /(4[kJ/kg/K]x2[K])=25kg/s
  - 25kg/s c'est aussi 25L/s ou 5Gal/s ou 300 GPM, c'est énorme.

Votre client paiera très cher le pompage de l'eau réfrigérée s'il lui faut fournir 300 GPM en début de refroidissement.

Des exemples en énergie: la ferme laitière

- Problème 5: La quantité de glace
  - Il faut retirer 360MJ d'énergie par traite (voir problème 2).
  - La chaleur latente de fusion de l'eau est de 334 kJ/kg (≈ 360);
  - La quantité de glace requise par traite est alors de 1000kg;
  - La quantité de glace pour une autonomie de 4 jours sans soleil (mais sans pertes thermiques du stockage de glace) est alors de 8 tonnes.

8 Tonnes de glace requiert un réservoir de 10m^3, car la densité est de 0,92, 4 x plus gros que le réservoir de lait.

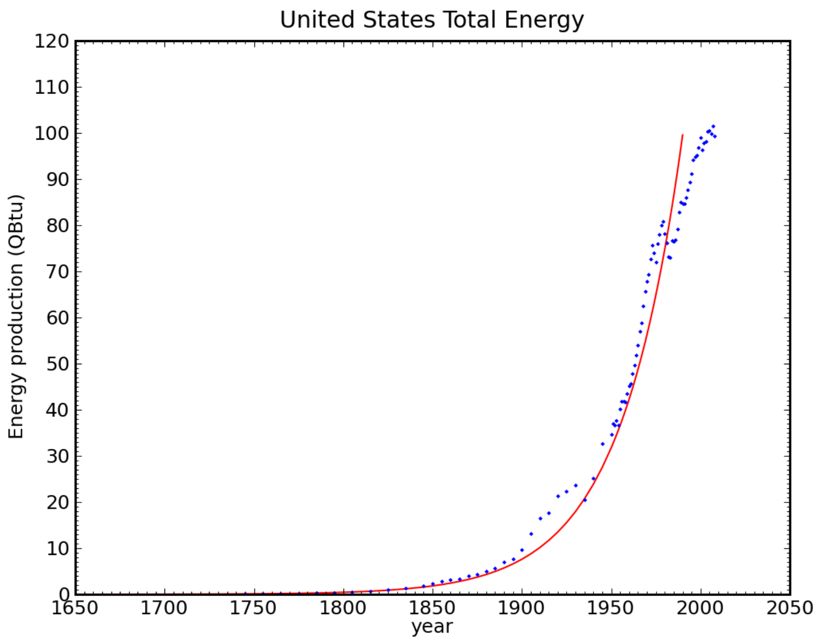
Des exemples en énergie: la ferme laitière

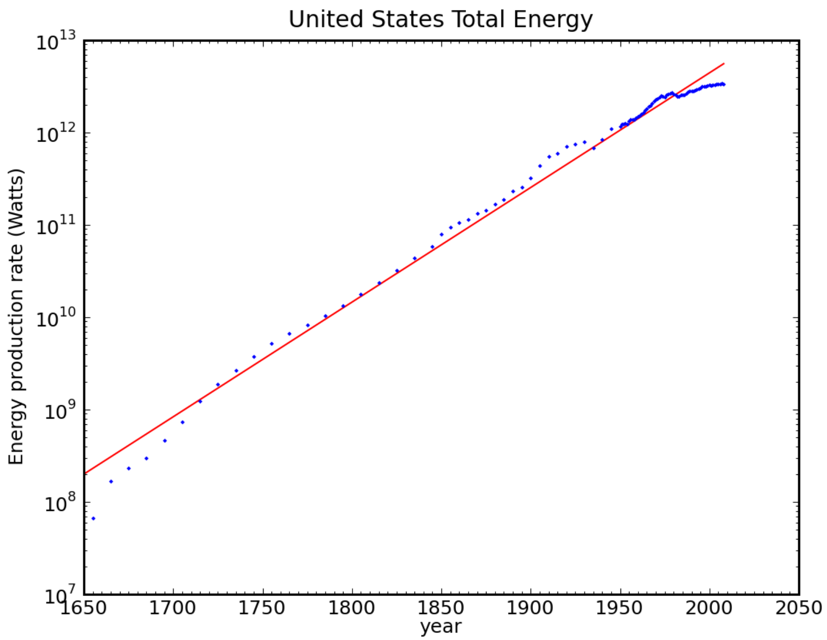
- Problème 6: La taille du système PV
  - Il faut retirer 360MJ ou 100kWh d'énergie par traite
  - La quantité d'énergie à produire en une journée pour une autonomie de 4 jours sans soleil est 800kWh pour produire la glace requise;
  - Si une journée d'ensoleillement dure 8 heures, il faut une puissance installée de 100kWc lors d'une journée parfaite.

Il est excessivement rare que 100kWc puisse produire 800 kWh en une seule journée, et je vous laisse estimer le coût du système, même sans batterie…

Des exemples en énergie: les combustibles

- L'emploi de l'exponentielle selon Enrico Fermi



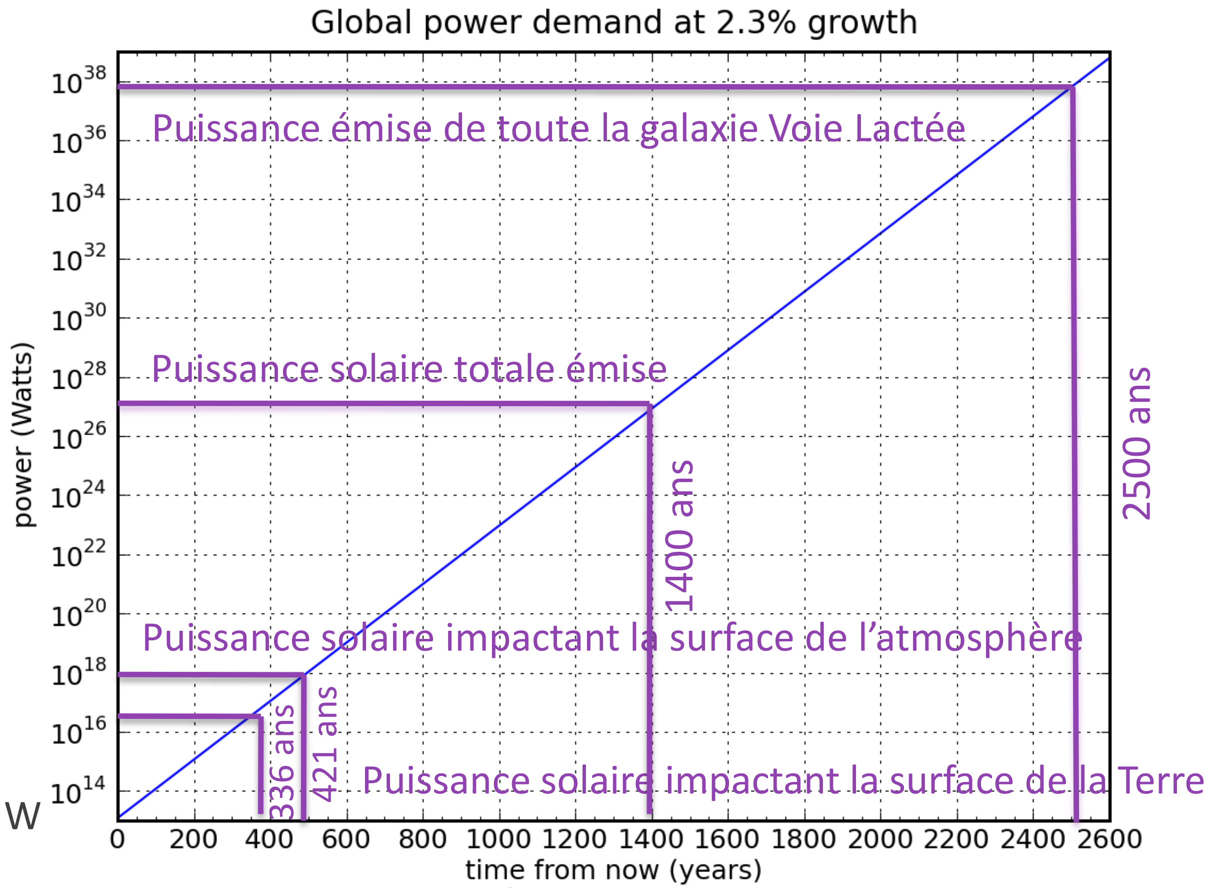


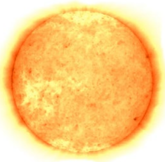
Énergie (puissance) produite par les USA entre 1650 et 2050 (en rouge, une croissance de 2,9%/an)

Le monde produit en moyenne instantanément 12 TW. Avec 2,3% de croissance, que se passerait-il?

Des exemples en énergie: les combustibles

- 2,3% de croissance annuelle, c'est multiplier par 10 par siècle





12 TW aujourd'hui - 1.2×10^{13} W

Le monde produit en moyenne instantanément 12 TW. Avec 2,3% de croissance, que se passerait-il?

Des exemples en énergie : l'éthanol

- Quelle superficie serait requise pour faire pousser assez de maïs pour se passer d'essence dans les voitures au Canada ?
  - L'efficacité de la photosynthèse globale du maïs est de ~ 1,5%
  - La conversion est de ~ 30%
  - La production dure ~ 3 mois ou 25% de l'année
  - L'efficacité annuelle de conversion solaire est de 0,015 x 0,3 x 0,25 ~ 0,1%
  - Il tombe 350 W/m^2 de soleil en moyenne sur une surface horizontale pendant l'été
  - La puissance annuelle moyenne du champ de maïs est alors de 350 x 0,001 x 1000m/km x 1000m/km ~ 350 kW/km^2

Des exemples en énergie : l'éthanol

- Quelle superficie serait requise pour faire pousser assez de maïs pour se passer d'essence dans les voitures au Canada ?
  - L'énergie annuelle correspondante est 350 kW/km^2 x 8760 h x 3,6 x 10^6 J/kWh
    $\sim$ 350 x 10^4 x 3 x 10^6 $\sim$ 1000 x 10^{10} J/km^2
    $\sim$ 10 TJ/km^2
    $\sim$ 0,01 PJ/km^2
    $\sim$ 0,00001 EJ/km^2

Des exemples en énergie : l’éthanol

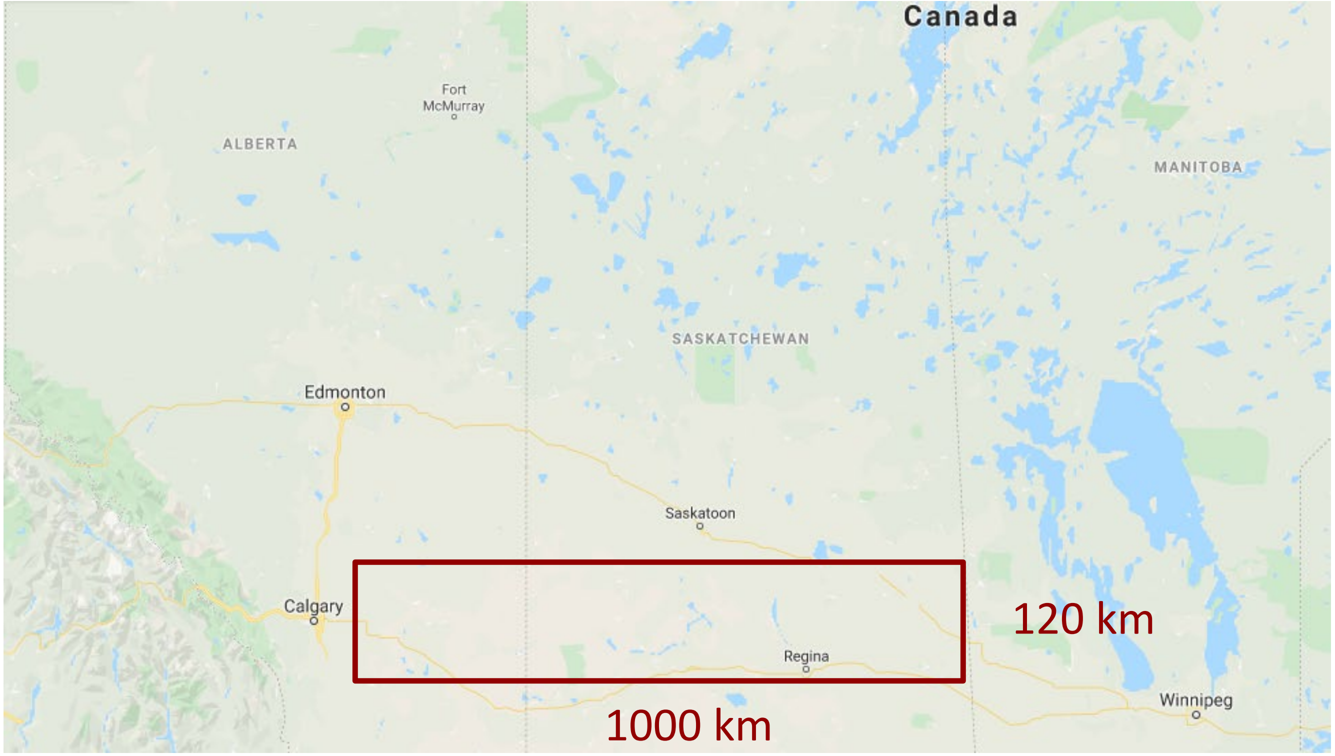
- Quelle superficie serait requise pour faire pousser assez de maïs pour se passer d’essence dans les voitures au Canada ?
  - Chaque voiture consomme 10L/100 km et parcourt 10 000km/an
  - Il y a 1 voiture par Canadien
  - Donc : 35 x 10^6 voitures x 10 L/100km x 10 000km/an ~ 35 x 10^9 L d’essence sont requis
  - La densité énergétique de l’éthanol est de ~ 0,8 donc il faudrait 40 milliards de litres d’éthanol.
  - En termes d’énergie:
    E~35 x 10^9 L x 0,85 kg/L x 40 MJ/kg ~1 200 x 10^{15} J/an~1 200 000 TJ/an

Des exemples en énergie : l’éthanol

- Quelle superficie serait requise pour faire pousser assez de maïs pour se passer d’essence dans les voitures au Canada ?
  - Le maïs produit en moyenne ~ 10 TJ/km^2
  - Les voitures canadiennes exigent l’équivalent de ~ 1 200 000 TJ/an
  - Il faut alors environ une superficie de 1 200 000/10 ~120 000 km^2, soit un rectangle de 1000 km x 120 km

Des exemples en énergie : l'éthanol

- Quelle superficie serait requise pour faire pousser assez de maïs pour se passer d'essence dans les voitures au Canada ?



Le Canada ne dispose pas d'assez de surfaces cultivables pour se permettre une telle chose.

Des exemples en énergie : l’éthanol

- Et en France?
  - Il y a deux fois plus de Français que de Canadiens
  - Ils ont deux fois moins de voitures
  - Leurs voitures consomment deux fois moins
  - L’ensoleillement moyen est comparable
  - Ils auraient donc besoin d’une superficie deux fois moindre, environ
  - Mais la France est 15 fois plus petite que le Canada
  - Alors c’est 8 fois plus ridicule d’y penser, environ.

Des exemples en énergie : le stockage

- Le stockage (M17) est au cœur des énergies renouvelables
- Le système le plus économique pour les micro-réseaux et équipements non-connectés fut la batterie ordinaire au plomb.
- Les systèmes étudiés dans cette section sont :
  – La gravité
  – La batterie classique (AA, plomb-acide)
  – L'air comprimé
  – Le volant d'inertie

Des exemples en énergie : le stockage

- L'analyse se limite à une application à l'échelle domestique
- Elle démarre en postulant que le besoin est de 100 kWh
  - Une résidence moyenne consomme 20 000 kWh en environ 400 jours, ou 50 kWh/jour
  - Ceci 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 on fait un calcul côté minimal;
  - Une maison canadienne moyenne consomme davantage car elles n'ont pas toutes été construites après 2016*.

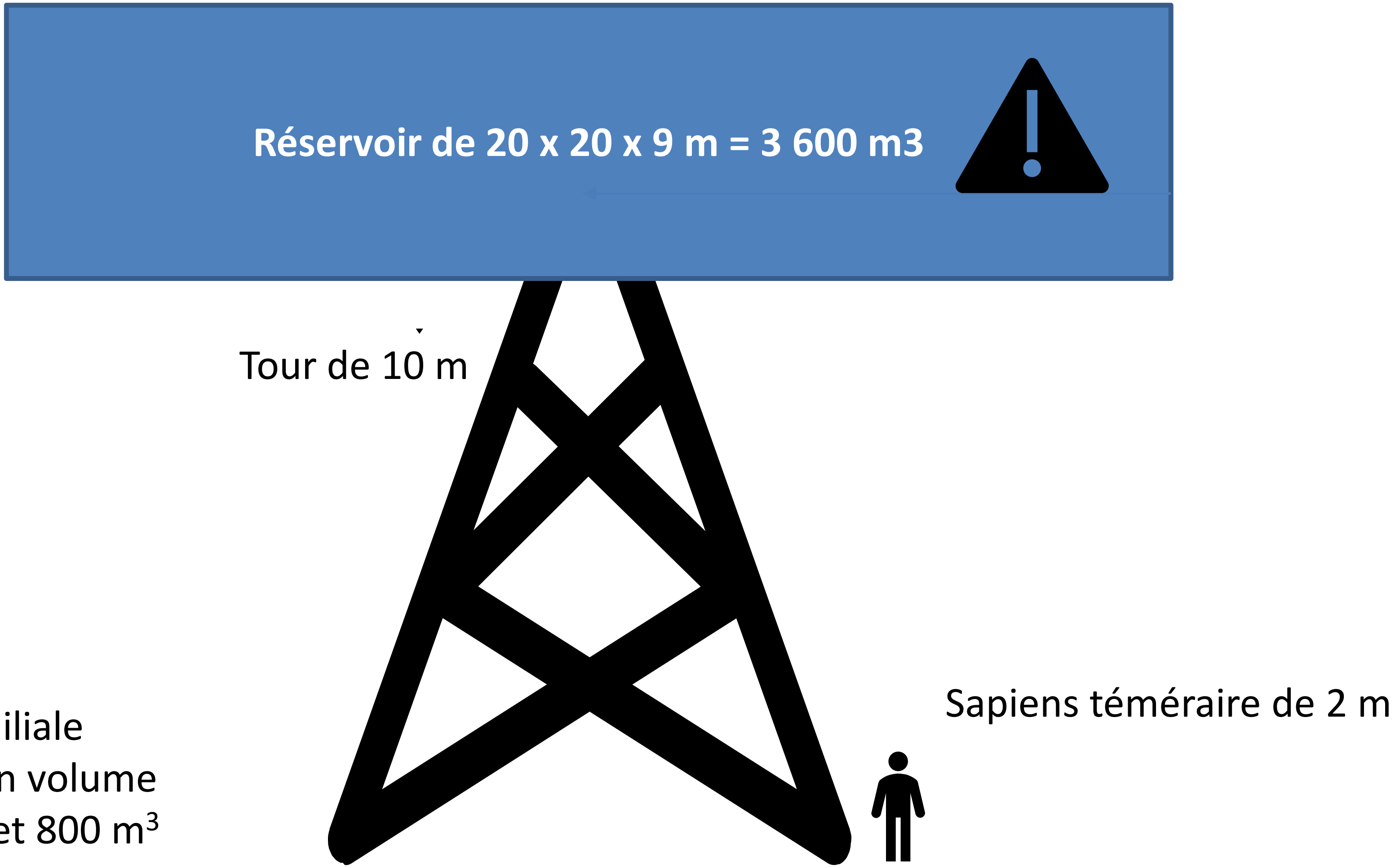
* RNCan, 2017: Maison unifamiliale moyenne bâtie après 2016 (Chauffage, 16 298 kWh, Clim: 793 kWh, Surface: 201 m^2)

Des exemples en énergie : le stockage

- Gravité
  - Élever des rochers ou des masses, ou encore pomper de l'eau
  - Élever une masse de 300 kg de 3 m donne mgh ~ 10 kJ
    - une batterie AA rechargeable (1,5V, 2 Ah) contient 3 Wh ~ 10 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 kWh x 3,6 MJ/kWh = 3 600 MJ), $m = E/(gh)$ = 3 600 MJ /10 x 10 = 3 600 Tonnes
  - Habiteriez-vous dans une maison où une masse de 3 600 tonnes en pierre (ou un volume de 3 600 m^3 d'eau, au choix) serait suspendue à 10 mètres au-dessus de votre tête? Oups…

Des exemples en énergie : le stockage

- Gravité



Une maison unifamiliale moyenne occupe un volume compris entre 400 et 800 m^3

Des exemples en énergie : le stockage

- Batterie rechargeable (besoin: 3 600 MJ)
  - Une batterie AA rechargeable (1,5V, 2 Ah) contient 3 Wh ~ 10 kJ
  - Il faut N = 3 600 MJ/10 kJ = 360 000 batteries AA.
  - Un pile pèse 23 g, il faut donc 360 000 x 23 ~ 7 200 000 g ~ 7,2 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.
  - Le volume d'une pile AA est 50 mm x 15 mm environ, ce qui correspond à un volume (incluant l'air autour de la forme cylindrique) de 0,05 x 0,015 x 0,015 m3 ~ 5 x 1,5 x 1,5 ~ 11,25 x 10^{-6} m^3 par pile ou V ~ 360 000 x 11,25 x 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).

Des exemples en énergie : le stockage

- Batterie rechargeable
  - Une batterie AA rechargeable (1,5V, 2 Ah) coûte environ 1$ (en achat de 24), cette solution coûterait donc 360 000$
  - Cependant, cette présentation 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* au Canada.

* Soumissionrenovation.ca: 150$/pi.ca ou 1500$/m^2 ou 300 000$, davantage plausible à Montréal qu'à Vancouver, Calgary, Halifax ou Toronto)

Des exemples en énergie : le stockage

- Batterie ordinaire au plomb (besoin: 3 600 MJ)
  - Chaque réaction implique un atome de Pb dans l'anode et une molécule de PbO_2 dans la cathode avec deux électrons de 2 eV chacun;
  - 3 600 MJ demande donc* 10^{28} atomes de Pb.
  - La masse requise est alors 207/ (6 x 10^{23}) x 1 x 10^{28} ~ 34 x 10^{5} g ~ 3,4T - un peu moins lourd que des piles AA, mais on néglige les autres éléments de la batterie
  - 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.
  - Mais les réserves (US Geological survey 2014) sont de 89 MT pour une durée de 18 ans. Bien entendu, la ressource est plus vaste…avec 2GT…

* Relation de base : 1 MJ = 6.2415096471204E+24 eV

Des exemples en énergie : le stockage

- Air comprimé (besoin: 3 600 MJ)
  - Pression de charge à 200 atm
  - Energie $= P_0V_0\ln(P_f/P_0) = \ln(200)P_0V_0 = 5.3P_0V_0$ =3 600MJ
    - Intégration $PdV = NkT(dV/V)$
  - $P_0 = 10^5$ Pa
  - Ainsi, $V_0 = 700\text{m}^3$ et $V_f = 3{,}5\text{m}^3$
  - Un cube de 1,5 m de côté ou ceci

  - Aussi volumineux que les batteries
  - Ici, on fait l'hypothèse d'une détente adiabatique, ce qui n'est pas le cas.

Des exemples en énergie : le stockage

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

- Volant d'inertie (besoin: 3 600 MJ)
  - Note: utile pour du stockage à très courte durée, M17
  - Cylindre plein ; $I = ½MR^2$
  - Vitesse périphérique, $v \to \omega = v/R$; $E = ½I\omega^2 = ¼Mv^2$
  - Si v = 300 m/s, alors il faut 16 tonnes d'acier
  - 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.
  - Financièrement, il est possible d'acquérir 4 appareils tels que celui illustré ci-haut.
  - Les volants d'inertie ne sont pas faits pour cette application!

Des exemples en énergie : le biogaz

- Un récent article paru dans *PhysOrg* disait en substance ceci:
  - "This is a paradigm shift. We'll be truly fuel-independent and no longer held hostage by other countries. This is the epitome of sustainability, where we're taking an endless stream of human waste and transforming it to transportation fuel and electricity. This is the first time this has ever been done."
  - "a third of all cars on the road in the U.S. could eventually be powered by 'biogas,' made from human waste, plant products and other renewable elements."

Des exemples en énergie : le biogaz

- Est-ce possible avec des « résidus » humains?
  - Le métabolisme humain moyen est d'environ 2000 kcal/jour ≈ 100 W
  - L'efficacité de conversion est d'environ 90%, reste 10W de puissance moyenne disponible dans nos « résidus »
  - L'efficacité de conversion en biogaz est marginale…
  - Par ailleurs (vérification par recoupement), environ 0,02 m^3 de biogaz par kg sec et 0,15 kg/j, donc 0,02 x 0,15 ≈ 3 x 10^{-3} m^3/jour de biogaz.
  - Le PCI du biogaz (CH_4) est ~ 35 MJ/m^3
  - La puissance moyenne disponible par personne par an est alors de 35 MJ/m^3 x 3 x 10^{-3} m^3/j x 365 j/an ~ 100 x 400 x 10^{-3} MJ/an ~ **25 MJ/an**

Des exemples en énergie : le biogaz

- Est-ce possible avec des « résidus » humains?
  - Une voiture consomme en moyenne chaque année 1000 L d'essence, ce qui représente 1000 L/an x 0,85 L/kg x 40MJ/kg ≈ **34 GJ/an**
  - Or, chaque humain ne produit que ~ **25 MJ/an** au mieux, il faut alors ~ 1200 Canadiens pour approvisionner une seule voiture.
  - Or, nous en avons en moyenne presque chacun une.
  - Pour que 1/3 des voitures canadiennes soient propulsées aux résidus humains, il faudrait réduire le nombre de voitures **drastiquement**, une bonne chose, en somme!
  - De façon plus réaliste, cette approche est irréaliste.

Des exemples en énergie : la voiture

- Peut-on faire une voiture berline normale ne consommant que 1L/100km (235 MPG-US)?
  - Deviner: l'Université de Colombie Britannique (UBC) a obtenu les résultats suivants aux compétitions SAE et SEMA :

2016	SAE	6th	715 mpg
2017	SEMA	20th	521 mpg
2017	SAE	6th	566 mpg
2018	SEMA	7th	960 mpg
2018	SAE	3rd	1407 mpg
2019	SEMA	2nd	1372 mpg
2019	SAE	2nd	2229 mpg

Des exemples en énergie : la voiture

- Peut-on faire une voiture berline normale ne consommant que 1L/100km (235 MPG-US)?
  - Vitesse ≈ 30 m/s (autoroute)
  - Surface ≈ 2,5 m^2
  - Densité ≈ 1,2 kg/m^3
  - $C_D \approx 0,3$
  - Trainée ≈ 0,3 x (½ x 1,2 x 2,5 x 30^2) ≈ 400 N
  - Résistance au roulement ≈ 0,01 x m x g ≈ 0,01 x 1500 kg x 10 ≈ 150 N
  - Force totale ≈ 550N

Des exemples en énergie : la voiture

- Peut-on faire une voiture berline normale ne consommant que 1L/100km (235 MPG-US)?
  - Essence 1 L x 0,85 kg/L x 40MJ/kg ≈ 34 MJ
  - Efficacité globale de la voiture à combustion ≈ 0,25
  - Travail, W = F x d, donc d ≈ 34MJ / 550 N x 25% ≈ 16 km
  - Ainsi, ce n'est pas impossible (16 km ≈ 100km), mais TRÈS difficile (un ordre de grandeur inférieur à priori, car de plus:
    - Le dénivelé parcouru est négligé
    - Il ne faut pas dépasser 100 km/h (30 x 3,6)
    - Il faudrait réduire la masse, qui ici est implicitement de 1500 kg environ, incluant les passagers.
    - Dans ce contexte, la Citroën 2CV est-elle une voiture du futur?

Des exemples en énergie : la voiture

- Peut-on créer une 2CV électrique avec une batterie de 50 kWh et 400 km d'autonomie?
  - Vitesse ≈ 25 m/s (autoroute)
  - Surface ≈ 1,65 m^2
  - Densité ≈ 1,2 kg/m^3
  - $C_D \approx 0{,}5$
  - Trainée ≈ 0,5 x (½ x 1,2 x 1,6 x 25^2) ≈ 310 N
  - Résistance au roulement ≈ 0,01 x m x g ≈ 0,01 x 700 kg x 10 ≈ 70 N
  - Force totale ≈ 380 N

Des exemples en énergie : la voiture

- Peut-on créer une 2CV électrique avec une batterie de 50 kWh et 400 km d'autonomie?
  - Énergie disponible: 80% de 50 kWh ≈ 40 kWh x 3,6 MJ/kWh = 144 MJ
  - Efficacité globale de la voiture électrique ≈ 0,9
  - Travail, W=Fxd, donc d = 144 MJ/380 N ≈ 15/40 ≈ 400 km
  - Bingo! 380 km ≈ 400 km.

Des exemples en énergie : la voiture

- Peut-on créer une 2CV électrique avec une batterie de 50 kWh et 400 km d'autonomie?
  - Ainsi, ce n'est pas impossible car du même ordre de grandeur, mais difficile:
    - Le dénivelé parcouru est encore négligé mais la régénération est ici possible
    - Il ne faut pas dépasser 90 km/h (25 x 3,6)
    - Il faudrait réduire la trainée (0,5 ⇨ 0,25) mais ce ne serait plus une 2CV…et la friction (0,01 à 0,007) en améliorant les roulements originaux
    - Il ne faut pas négliger la masse des batteries elles-mêmes
    - **Si un tel projet de maitrise en conversion électrique vous intéresse, contactez-moi, j'aimerais en convertir une avant ma retraite…**

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Des exemples simples
- Comment une solution approximative peut-elle être plus instructive que la solution exacte?
- Des exemples en énergie
- ***Le nouvel outil***
- Conclusion

Le nouvel outil

- Outre une calculatrice simple pour l’étape de **vérification par recoupements**, quel outil est désormais disponible pour documenter les analyses d’ordre de grandeur?

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Des exemples simples
- Comment une solution approximative peut-elle être plus instructive que la solution exacte?
- Des exemples en énergie
- Le nouvel outil
- ***Conclusion***

Conclusion

- Cette conclusion contrevient aux conventions, car elle introduit un élément qui n’est pas dans la partie « développement ».
- Prenons un instant le rôle d’avocat du diable:

Pourquoi, dans la section sur le stockage d’énergie, ne pas simplement stocker l’énergie sous forme de « combustible fossile »?

Conclusion

On constate que l'essence est très difficile à battre en termes de densité énergétique.

- La génératrice
  - Essence 1 L x 0,85 kg/L x 40MJ/kg ≈ 34 MJ ≈ 34 x 0,2778 kWh/MJ ≈ 10 kWh
  - Efficacité globale de la génératrice chez Canadian Tire ≈ 0,20, donc 2 kWh disponible par litre d'essence

Type de stockage	Volume requis pour 100 kWh [m^3]
Essence	0,05
Gravité	3 600 ou **72 000** x +
Batteries AA rechargeables	4 ou **80** x +
Batterie au plomb	1 ou **20** x +
Air comprimé	3,5 ou **70** x +
Volant d'inertie	10 ou **200** x +

Conclusion

- Le premier objectif de cette présentation consistait à vous présenter une technique :
  - Pour aiguiser vos instincts de résolution de problèmes;
  - Pour éviter de faire des calculs complexes et savants pour rien;
  - Pour éviter de violer les lois de la physique;
  - Pour éviter de devoir facturer une longue et intense période de calculs et l’usage de logiciels spécialisés à un client alors qu’il peut être assez évident qu’un projet aurait dû être abandonné au départ;
  - Pour gagner en efficacité.

Conclusion

- Le second objectif de cette présentation consistait à vous préparer à réaliser une analyse de faisabilité économique (thème 1.2) lorsque la solution estimée semble réaliste physiquement.
- Le troisième objectif consistait à vous expliquer que la solution exacte à 3 décimales n'est pas celle à laquelle le client va s'attendre.
- Corollairement, votre directeur de thèse, de mémoire ou de rapport ne sera pas impressionné si vous calculez un diamètre de conduite d'égout au millième de millimètre ou la température au millième de degré.

Conclusion

- L'objectif le plus important de cette présentation est de comprendre que lorsque vous abordez un problème nouveau, vous devez d'abord saisir les **idées principales** et les **principes importants**, parce que ces idées et principes structurent votre compréhension du problème.
- Ensuite, et seulement ensuite, vous vous lancez dans des calculs complexes.

Conclusion

- Puisque cette technique est davantage un art qu'une science, elle fut présentée à l'aide d'exemples.
- Aucune des solutions proposées ne prétend être la SEULE et la BONNE solution au problème.
- En employant cette technique, vous devriez réaliser que vous en connaissez, de manière implicite, beaucoup plus que vous ne le croyez sur une foule de sujets.
- Les problèmes réels sont tous mal définis, alors pourquoi commencer par des calculs?

Référence principale

- *Order-of-Magnitude Physics: Understanding the World with Dimensional Analysis, Educated Guesswork, and White Lies*
  - Peter Goldreich, California Institute of Technology
  - Sanjoy Mahajan, University of Cambridge
  - Sterl Phinney, California Institute of Technology

  - https://www.e-booksdirectory.com/details.php?ebook=3541

Merci de votre attention !

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

Période de questions