

Enjeux énergétiques

par le prisme d'objets du quotidien

Pierre Haessig

CentraleSupélec — IETR
<http://pierreh.eu>

Rennes, 19 octobre 2015

Plan de la présentation

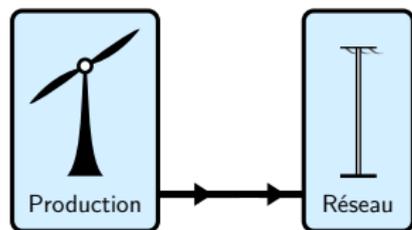
1. Préambule
2. Consommations d'énergie : une large plage d'ordres de grandeur
3. Production d'énergie électrique

Plan de la présentation

1. Préambule
2. Consommations d'énergie : une large plage d'ordres de grandeur
3. Production d'énergie électrique

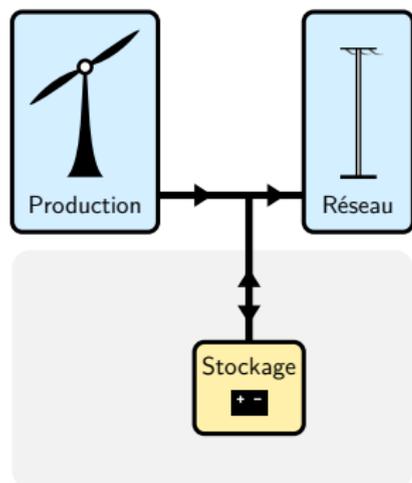
Mon travail de recherche

Thèse (ENS Rennes) : gestion & dimensionnement de batteries pour garantir la production des éoliennes.



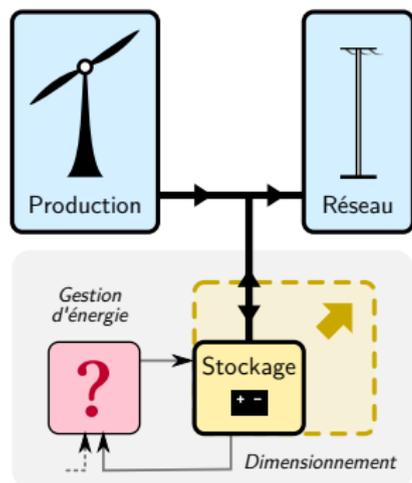
Mon travail de recherche

Thèse (ENS Rennes) : gestion & dimensionnement de batteries pour garantir la production des éoliennes.



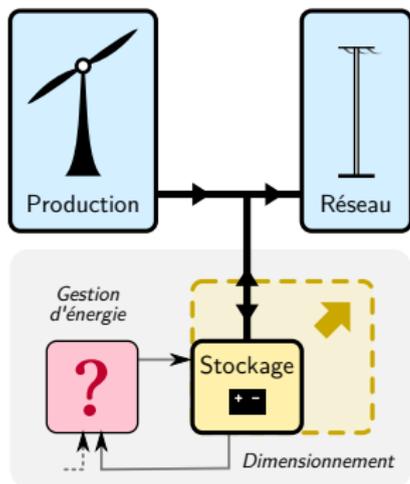
Mon travail de recherche

Thèse (ENS Rennes) : gestion & dimensionnement de batteries pour garantir la production des éoliennes.



Mon travail de recherche

Thèse (ENS Rennes) : gestion & dimensionnement de batteries pour garantir la production des éoliennes.



ex. projet Venteea : batterie 2MW / 1,3MWh (juin 2015, près de Troyes)
<http://www.enerzine.com/14/18472+venteea---le-plus-gros-stockage-par-batterie-de-france+.html>

Énergie : enjeu citoyen

L'énergie fait partie des **enjeux citoyens** actuels (développement durable, précarité énergétique, transition énergétique ...).

Or l'énergie est une grandeur **abstraite**

→ difficile de se forger un regard actif/critique.

Énergie : enjeu citoyen

L'énergie fait partie des **enjeux citoyens** actuels (développement durable, précarité énergétique, transition énergétique ...).

Or l'énergie est une grandeur **abstraite**

→ difficile de se forger un regard actif/critique.

Les objets du quotidien peuvent servir à **matérialiser** l'énergie et la puissance

Ma proposition

tenter d'analyser des enjeux de l'énergie
par le prisme d'objets quotidiens.

Relation énergie-puissance

puissance = vitesse de variation de l'énergie



p variable

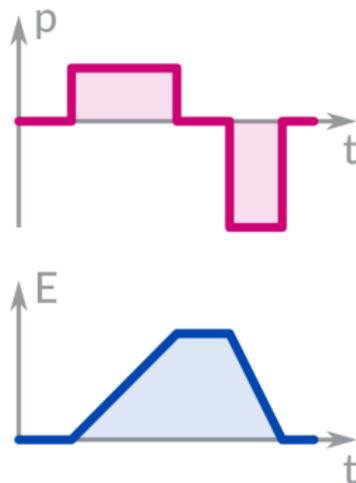
$$p = dE/dt$$

$$E = \int p \cdot dt$$

p const.

$$\Delta E / \Delta T$$

$$p \times \Delta T$$



Unités énergie-puissance

Puissance : Watt

produit d'un "effort" et d'un "flux" :

- $W = V \times A$ (électricité)
- $W = N \times (m/s)$ (mécanique)

Énergie : Joule (W.s)

mais aussi beaucoup de multiples usuels, dont :

- $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$
- $1 \text{ tep} = 42 \text{ GJ} = 11,6 \text{ MWh}$

Plan de la présentation

1. Préambule
2. Consommations d'énergie : une large plage d'ordres de grandeur
3. Production d'énergie électrique

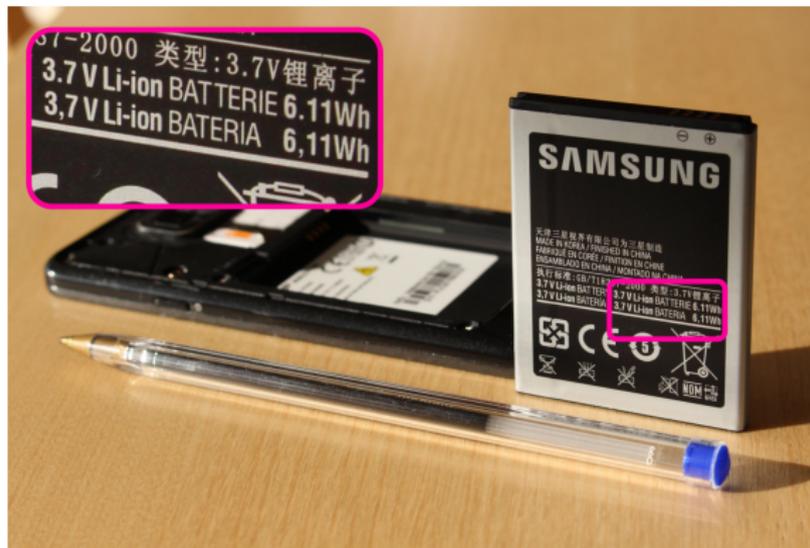
Énergie d'un appareil portable 1/2

quelques Wh dans notre poche...



Énergie d'un appareil portable 1/2

quelques Wh dans notre poche...



batterie de téléphone portable : **~5 Wh** (~5 €)

Énergie d'un appareil portable 2/2

l'ordinateur portable est plus gourmand...



batterie d'ordinateur portable : ~**50 Wh**

processeur d'ultrabook typique : TPD **15 W** (Intel i7-4510U)

Appareil non portable 1/2

Lorsqu'on lève la contrainte portabilité : bouilloire 2,2 kW



Question : quelle durée pour chauffer 1l d'eau 15→100°?

Appareil non portable 1/2

Lorsqu'on lève la contrainte portabilité : bouilloire 2,2 kW



chauffer 1l d'eau 15→100°C : ~3 minutes. Peut-on le calculer ?

Chauffer l'eau

1) Énergie thermique nécessaire

$$C_{th} = 4,18 \text{ kJ/kg/K}$$

$$\Delta E = C_{th} \times \Delta\theta$$

$$\rightarrow 4,18 / 3,6 \times 85^\circ = \mathbf{100 \text{ Wh}}$$
 (20 batteries de téléphone)

Chauffer l'eau

1) Énergie thermique nécessaire

$$C_{th} = 4,18 \text{ kJ/kg/K}$$

$$\Delta E = C_{th} \times \Delta\theta$$

$$\rightarrow 4,18 / 3,6 \times 85^\circ = \mathbf{100 \text{ Wh}}$$
 (20 batteries de téléphone)

2) Temps de chauffage

$$\frac{100 \text{ Wh}}{2200 \text{ W}} \times 60 = 2,7 \text{ minutes}$$

Appareil non portable 2/2

Consommation ~ 1 kWh/jour,
dépend du volume et de l'isolation
(10 bouilloires/jour)



Appareil non portable 2/2

Consommation ~ 1 kWh/jour,
dépend du volume et de l'isolation
(10 bouilloires/jour)

Aller plus loin dans l'expérimentation

Mesurer les consommations avec un
énergimètre (dès 20 €)



Consommations d'énergie des appareils domestiques

Faits observés :

- Une grande plage d'ordre de grandeur (Wh \rightarrow kWh)
- Appareil portable : faible énergie (Wh), par nécessité
- Appareil connecté au réseau électrique :
 - forte puissance (kW)
 - et forte énergie *si consommation longue*.
 - gros consommateurs : production de chaud et de froid

Consommations d'énergie des appareils domestiques

Faits observés :

- Une grande plage d'ordre de grandeur (Wh \rightarrow kWh)
- Appareil portable : faible énergie (Wh), par nécessité
- Appareil connecté au réseau électrique :
 - forte puissance (kW)
 - et forte énergie *si consommation longue*.
 - gros consommateurs : production de chaud et de froid

Intérêt de comprendre les ordres de grandeur

Utile pour trouver les gisements d'économie d'énergie *les plus pertinents*

Plan de la présentation

1. Préambule
2. Consommations d'énergie : une large plage d'ordres de grandeur
3. Production d'énergie électrique

Les réseaux électriques

Intérêt économique : le réseau électrique est une mutualisation à l'échelle continentale (→ solidarité, foisonnement)

Difficultés pédagogiques : complexité du système, opacité des coûts
→ les systèmes **autonomes** sont plus intéressants à analyser.

Les réseaux électriques

Intérêt économique : le réseau électrique est une mutualisation à l'échelle continentale (→ solidarité, foisonnement)

Difficultés pédagogiques : complexité du système, opacité des coûts
→ les systèmes **autonomes** sont plus intéressants à analyser.

Ordres de grandeur économiques en France

- 15-20 €/kW/an d'abonnement
"droit à consommer une certaine puissance",
3 à 15 kW pour un particulier
- **€/kWh** (frais de transport et taxes inclus)

Les réseaux électriques

Intérêt économique : le réseau électrique est une mutualisation à l'échelle continentale (→ solidarité, foisonnement)

Difficultés pédagogiques : complexité du système, opacité des coûts
→ les systèmes **autonomes** sont plus intéressants à analyser.

Ordres de grandeur économiques en France

- 15-20 €/kW/an d'abonnement
"droit à consommer une certaine puissance",
3 à 15 kW pour un particulier
- **0,15 €/kWh** (frais de transport et taxes inclus)

Application au frigo (1 kWh/j) : 500 € + 50 €/an d'électricité

Production autonome 1/2 : Groupe électrogène

Investissement extrêmement bas :

400€ pour 2,5 kW

(0,5 €/W centrale gaz industrielle)

Fonctionnement : coût du carburant :

- PCI essence : $43 \text{ MJ/kg} = 12 \text{ kWh/kg}$
(kWh thermique)
- densité 0,7 : 8,4 kWh/l
- rendement moteur 25 % : 2,1 kWh/l
(kWh électrique)
- prix essence 1,3 €/l → **0,62 €/kWh**



Production autonome 1/2 : Groupe électrogène

Investissement extrêmement bas :

400€ pour 2,5 kW

(0,5 €/W centrale gaz industrielle)

Fonctionnement : coût du carburant :

- PCI essence : $43 \text{ MJ/kg} = 12 \text{ kWh/kg}$
(kWh thermique)
- densité 0,7 : 8,4 kWh/l
- rendement moteur 25 % : 2,1 kWh/l
(kWh électrique)
- prix essence 1,3 €/l → **0,62 €/kWh**



Aller plus loin

Calcul d'impact environnemental : gramme CO₂/kWh

Production autonome 2/2 : Panneaux photovoltaïques

Investissement élevé, mais pas de carburant à payer.

Petit système 3 kW crête : 10 000 €

- 3€/W petites installations
- bcp moins pour les grandes (MW)



Source : SMA

<http://www.sma-france.com/solutions/solutionsbatiment/vue-densemble.html>

Source coût :

<http://www.photovoltaique.info/Couts-d-investissement.html>

Production PV : Ressource solaire

Outil d'estimation PVGIS (JRC Union Européenne)

The screenshot displays the PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) web application. The interface includes a navigation menu with options like 'PV Estimation', 'Monthly radiation', 'Daily radiation', and 'Stand-alone PV'. The main content area is titled 'Performance of Grid-connected PV' and contains several configuration options:

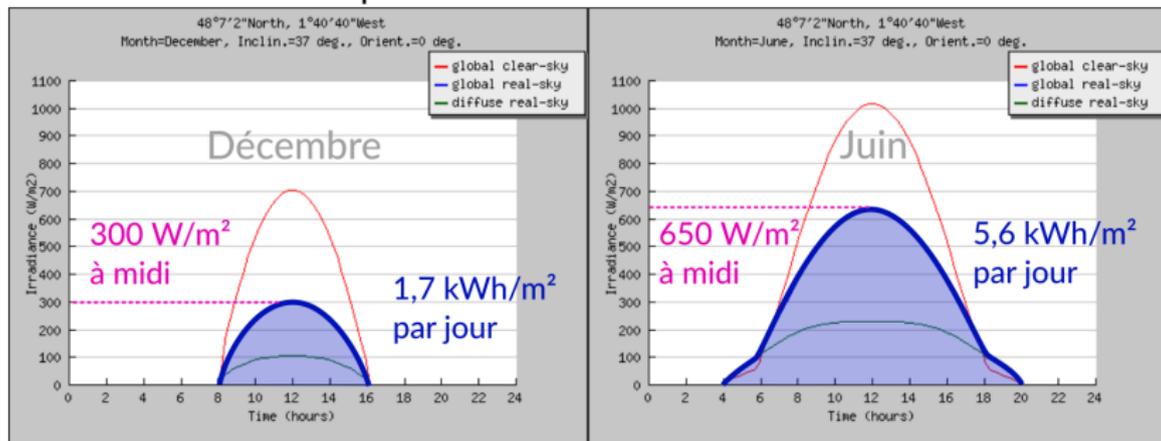
- Radiation database:** Climate-SAF PVGIS
- PV technology:** Crystalline silicon
- Installed peak PV power:** 3 kWp
- Estimated system losses:** 14%
- Fixed mounting options:**
 - Mounting position: Building integrated
 - Slope: 37° (with 'Optimize slope' checked)
 - Azimuth: -1° (with 'Also optimize azimuth' unchecked)
- Tracking options:**
 - Vertical axis: Slope 0° (with 'Optimize' unchecked)
 - Inclined axis: Slope 0° (with 'Optimize' unchecked)
 - 2-axis tracking: (unchecked)
- Output options:**
 - Show graphs: (checked)
 - Web page: (selected)
 - Show horizon: (unchecked)
 - Text file: (unchecked)
 - PDF: (unchecked)

A 'Calculate' button is located at the bottom of the configuration panel. The map on the left shows a location in France near Rennes, with a red pin and a search bar above it.

Production PV : Ressource solaire

Flux solaire : $\sim 1 \text{ kW/m}^2$ (ciel clair)

mais ensuite tout dépend du mois et de l'heure et du lieu :

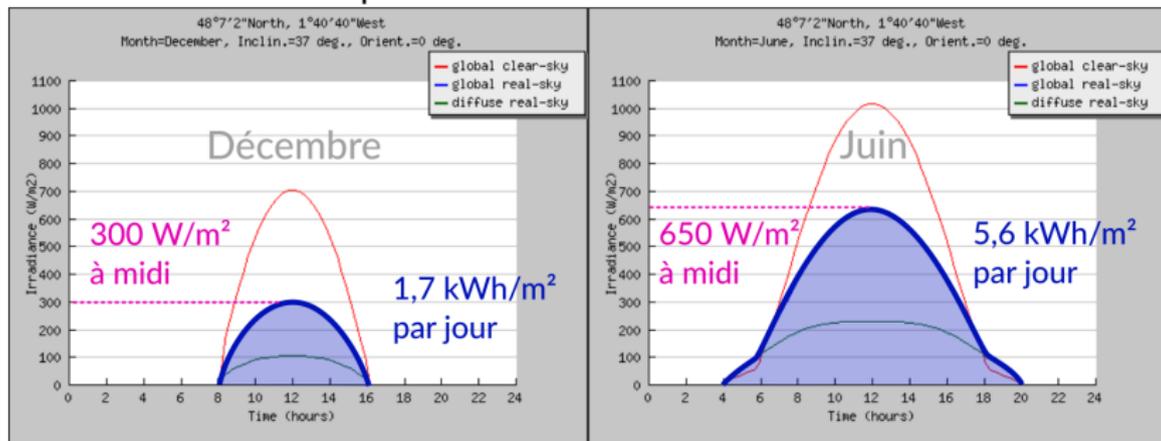


Eclairement solaire à Rennes - panneau incliné 37°

Production PV : Ressource solaire

Flux solaire : $\sim 1 \text{ kW/m}^2$ (ciel clair)

mais ensuite tout dépend du mois et de l'heure et du lieu :



Eclairement solaire à Rennes - panneau incliné 37°

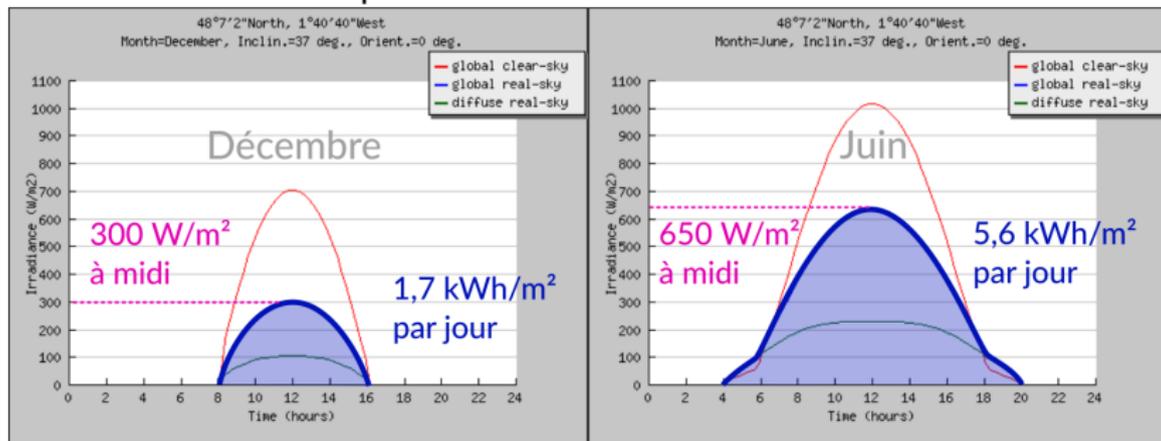
Au final, en moyenne sur l'année :

- **4,0 kWh/jour**
- **1450 kWh/an** (sud de la France : kWh/an)

Production PV : Ressource solaire

Flux solaire : $\sim 1 \text{ kW/m}^2$ (ciel clair)

mais ensuite tout dépend du mois et de l'heure et du lieu :



Eclairement solaire à Rennes - panneau incliné 37°

Au final, en moyenne sur l'année :

- **4,0 kWh/jour**
- **1450 kWh/an** (sud de la France : 2000 kWh/an)

Production PV des panneaux

Pour calculer la production à partir de la ressource :

- Puissance crête installation : 3 kW crête (@ 1kW/m²)
- $4,0 \times 3 \rightarrow 8,6$ kWh/j
- $1450 \times 3 \rightarrow$ **3150 kWh/an**

(PVGIS fait directement le calcul)

Production PV des panneaux

Pour calculer la production à partir de la ressource :

- Puissance crête installation : 3 kW crête (@ 1kW/m²)
- $4,0 \times 3 \rightarrow 8,6$ kWh/j (déduction 25 % de pertes "système" !)
- $1450 \times 3 \rightarrow$ **3150 kWh/an** (idem)

(PVGIS fait directement le calcul)

Coût de l'électricité photovoltaïque

Coût de l'électricité

1) Version simple, à partir de la **productivité** et **durée de vie** :

$$\frac{10\,000 \text{ €}}{3150 \text{ kWh/an} \times 20 \text{ ans}} = 0,16 \text{ €/kWh}$$

Coût de l'électricité photovoltaïque

Coût de l'électricité

1) Version simple, à partir de la **productivité** et **durée de vie** :

$$\frac{10\,000 \text{ €}}{3150 \text{ kWh/an} \times 20 \text{ ans}} = 0,16 \text{ €/kWh}$$

2) Version détaillée, avec **maintenance** et **actualisation** de l'argent : CalSol http://ines.solaire.free.fr/pvreseau_1.php

0,20 à 0,25 €/kWh (selon taux d'actualisation)

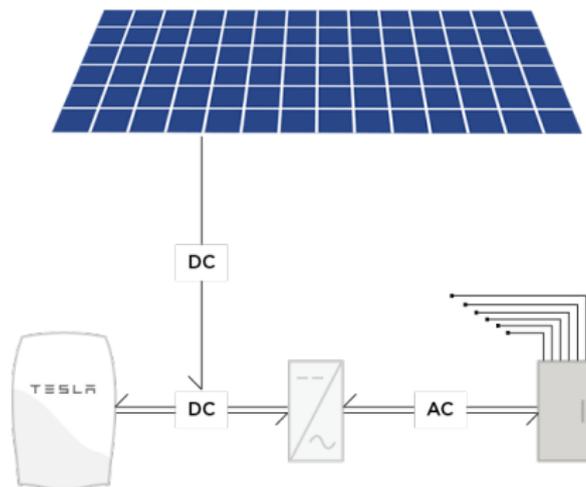
Remarques sur les tarifs d'achats en France :

- tarif T1 (intégré au bâti, été 2015) : 0,2578 €/kWh
- grande centrale au sol 2015 (MW) : < 0,10 €/kWh

Stocker l'énergie électrique

pour préparer la tisane du soir

Batterie pour la maison Tesla : 2 kW / 7 kWh pour 3 k€
(marché naissant/immature)

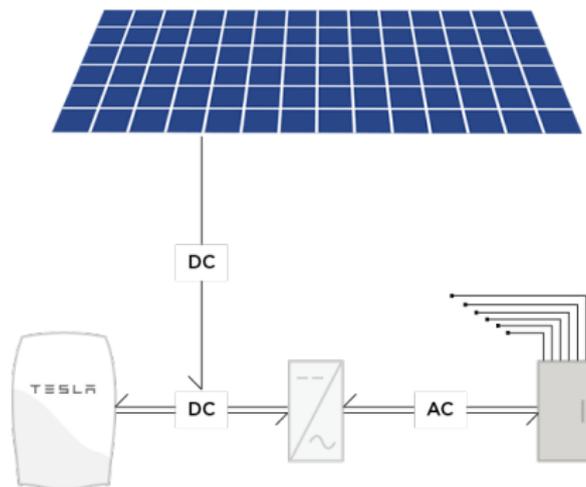


Source : Tesla motors <http://www.teslamotors.com/powerwall>

Stocker l'énergie électrique

pour préparer la tisane du soir

Batterie pour la maison Tesla : 2 kW / 7 kWh pour 3 k€
(marché naissant/immature)



Source : Tesla motors <http://www.teslamotors.com/powerwall>

Question : comment quantifier le coût du kWh stocké ?

Coût de l'énergie stockée

Le coût du kWh dépend de la **durabilité** de la batterie
(années & nombre de cycle) :

Exemple de la batterie Tesla powerwall :

- Coût investissement : 3 k€ / 7 kWh \approx 500 €/kWh
(pas cher pour du Lithium-ion !)
- Hypothèse 3000 cycles de charge-décharge : 500 / 3000 \approx
0,15 €/kWh ("service stockage" uniquement, élec. en sus)

Coût de l'énergie stockée

Le coût du kWh dépend de la **durabilité** de la batterie
(années & nombre de cycle) :

Exemple de la batterie Tesla powerwall :

- Coût investissement : 3 k€ / 7 kWh \approx 500 €/kWh
(pas cher pour du Lithium-ion !)
- Hypothèse 3000 cycles de charge-décharge : 500 / 3000 \approx
0,15 €/kWh ("service stockage" uniquement, élec. en sus)

Observations :

- c'est cher, mais pas *incroyablement cher*
- pertinent pour des sites isolés (montagne, îles ...)

référence : Bernard Multon *et al.* "Ressources énergétiques et solutions pour l'alimentation en électricité des populations isolées" <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00674833>

Production d'énergie électrique

Renouvelable vs fossile : répartition investissement/fonctionnement totalement inversée

L'analyse technico-économique de moyens de production autonomes montre la difficulté de produire de l'énergie électrique.
→ À mettre en perspective avec l'intérêt d'économiser l'énergie.

Conclusion

À partir de l'observation d'objets quotidiens, on peut construire une série d'ordres de grandeur pour rendre concret les unités de puissance et d'énergie.

Conclusion

À partir de l'observation d'objets quotidiens, on peut construire une série d'ordres de grandeur pour rendre concret les unités de puissance et d'énergie.

L'énergie solaire : sujet riche en transdisciplinarité ?
(calcul d'intégrale, statistiques, rayonnement, spectre, climat...)