MR's Blog
On & Off the Line

ENERGIE VADEMECUM

Ce qu'il faut savoir pour pouvoir en parler.

DÉFINITIONS

PRINCIPES

CONSÉQUENCES

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Les faits sont tenaces

Savoir la difference entre :
- puissance [kW] et énergie [kWh].
- énergie primaire à récolter et vecteurs secondaires produits.

Respecter les principes de la thermodynamique:
équilibre, conservation, désordre (entropie), zéro absolu.

La récolte d'énergie primaire doit produire plus d'énergie qu'il n'en coûte ! ERoEI >> 1

Le facteur de charge décrit le taux d'utilisation moyen d'une installation.

Le facteur de charge d'une installation dépendante d'une première ne peut lui être qu'inférieur.

Pour la stocker il faut transformer l'électricité.

Rien n'est exponentiel, tout est limité.

L'efficience de tout processus n'est jamais de 100 %.

Dans quelque système que ce soit, et en toute proportion, lesdites énergies renouvelables
- ne satisfont pas la demande en tout temps,
- réduisent l'efficacité de la production électrique,
- en augmentent les coûts,
- multiplient les besoins en capitaux,
- déstabilisent le réseau,
- imposent une plus vaste empreinte environnementale.

Sauf la vie, rien n'est renouvelable.

Le progrès va dans un sens, celui d'une meilleure utilisation des ressources et non de leur dilution, dispersion et gaspillage.

L'approvisionnement en énergie doit satisfaire une demande, et non l'inverse.

Recycler consomme, a des rendements diminuants et donc des limites.

Toute évaluation économique ou environnementale doit se faire entre des systèmes comparables qui fournissent un même service.

Des arbitrages sont nécessaires, fondés sur la raison et sans déraison.

La production des centrales au charbon et au gaz en Allemagne est le cache sexe de « renouvelables » dont les défauts congénitaux doivent être pudiquement occultés.

Aucun pays n'est assez riche pour se permettre un "quoi qu'il en coûte."

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Pas de changement sans énergie

Haut potentiel

cinétique

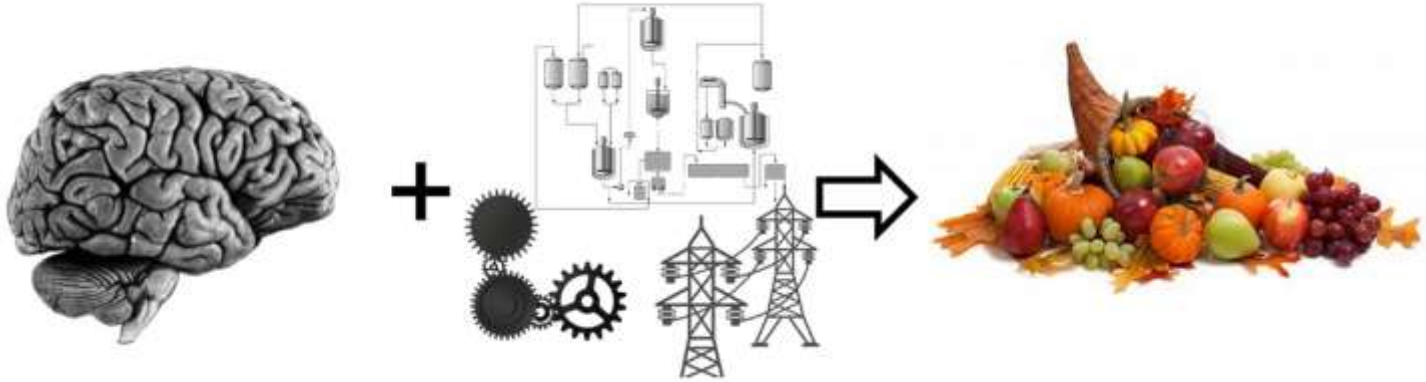
Bas potentiel

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Pas de prospérité sans énergie

AVANT

MAINTENANT



© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Capacité d'agir ?

Force → Énergie → Puissance

N **newton**
X distance
J **joule**
÷ temps
W **watt**

Capacité à exercer ou supporter une action physique, intellectuelle ou morale.

S'exerce dans un champ, par exemple de gravité ou de potentiel.

$$Force = masse \times accélération$$

$$1\,N = 1\,kg \times 1\,\frac{m}{s^2} = 1\,\frac{kg \cdot m}{s^2}$$

Force agissante, physique ou morale.

Capacité qu'a un corps ou un système de produire un travail, un changement d'état. Par exemple, celui de déplacer un objet dans un champ de gravité (force · distance).

$$1\,J = 1\,N \cdot m$$

$$1\,kWh = 1000\,W \times 3600\,s = 3\,600\,000\,J$$

Pouvoir que possède un être, un groupe, une entité d'imposer son autorité, sa domination à un autre.

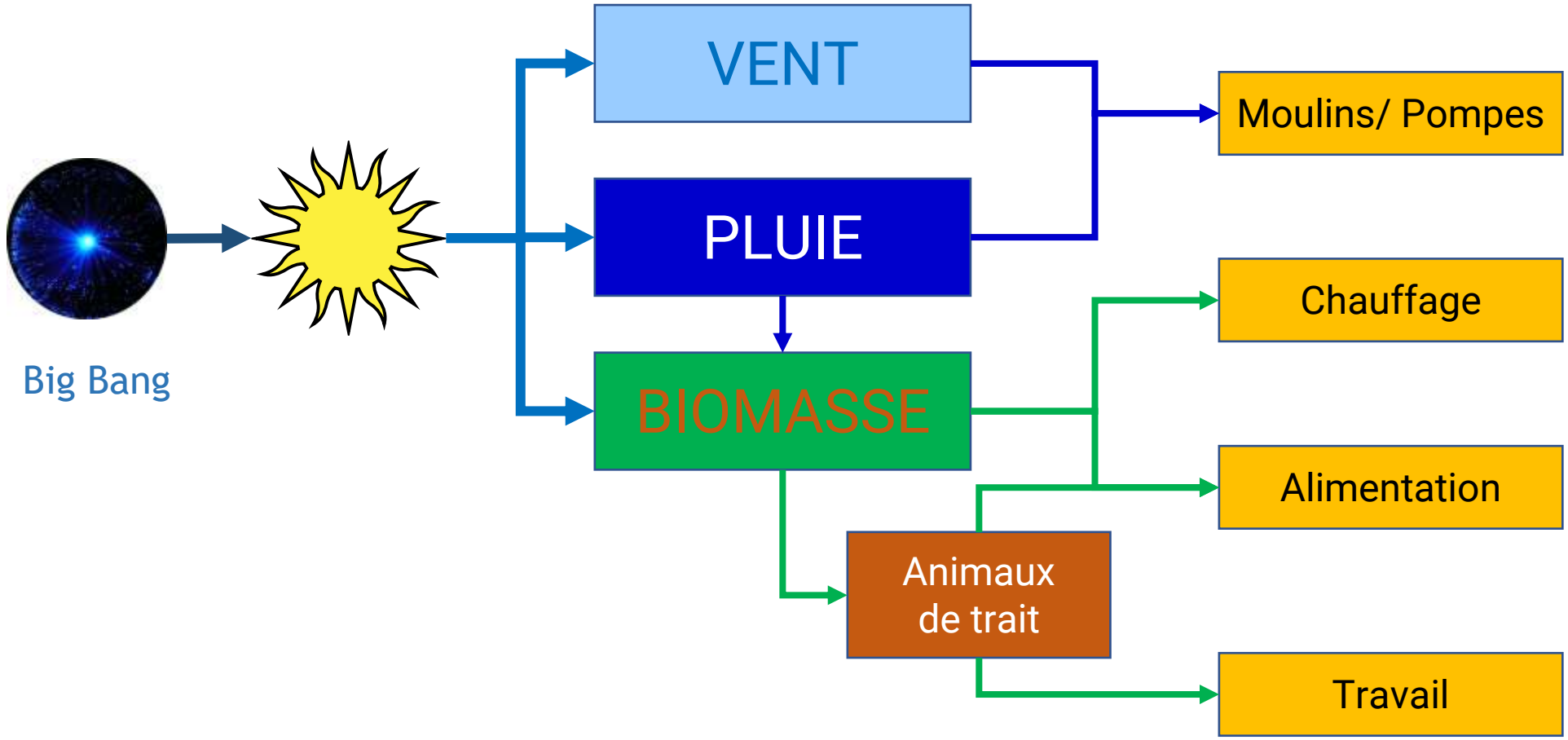
Quantité de travail ou d'énergie libérée par un système ou transférée d'un système à un autre au cours d'une unité de temps.

$$1\,W = 1\,\frac{J}{s}$$

$$1\,CV = \frac{75\,kg \times 9.81\,\frac{m}{s^2} \times 1\,m}{1\,s} = 736\,W$$

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Origine



© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Quelle énergie ?

- **Énergie potentielle :** Énergie que possède un corps en raison de sa position (par rapport à une référence).

  Tant que la pomme n'était pas tombée de l'arbre, elle avait de l'énergie potentielle.

- **Énergie cinétique :** Énergie que possède un corps du fait de son mouvement.

  Lorsque la pomme atteignit le crâne d'Isaac Newton, elle libéra son énergie cinétique.

- **Énergie primaire :** Forme naturelle d'énergie disponible en un lieu et un moment donné.

  Exemples : irradiation solaire (et ses dérivés vent et pluie), flux géothermique, gisement de charbon, pétrole ou gaz, mine d'uranium, biomasse.

- **Énergie secondaire :** Forme d'énergie transformée à partir d'une énergie primaire ou d'une autre secondaire. Vecteur énergétique.

  Exemples : électricité, carburants raffinés, masse d'eau pompée en altitude, énergie électrochimique contenue dans une batterie, hydrogène ou autres carburants synthétiques.

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Gestion de l'énergie

- **Energy fatale** : Energy primaire dont la disponibilité ne dépend pas de l'action humaine.

  Exemples : Irradiation solaire, vent, précipitations, géothermie, biomasse.

- **Energy intermittente** : Energie primaire dont la disponibilité n'est pas contrôlable.
  La prévisibilité est partielle et le seul moyen de gestion est de renoncer à la récolter, partiellement ou complètement.

  Exemples : PV, éolien, hydraulique au fil de l'eau
  qui ne peuvent pas non plus être stockés.

- **Energy pilotable** : Energy primaire ou secondaire dont la disponibilité peut être modulée selon ses vœux.

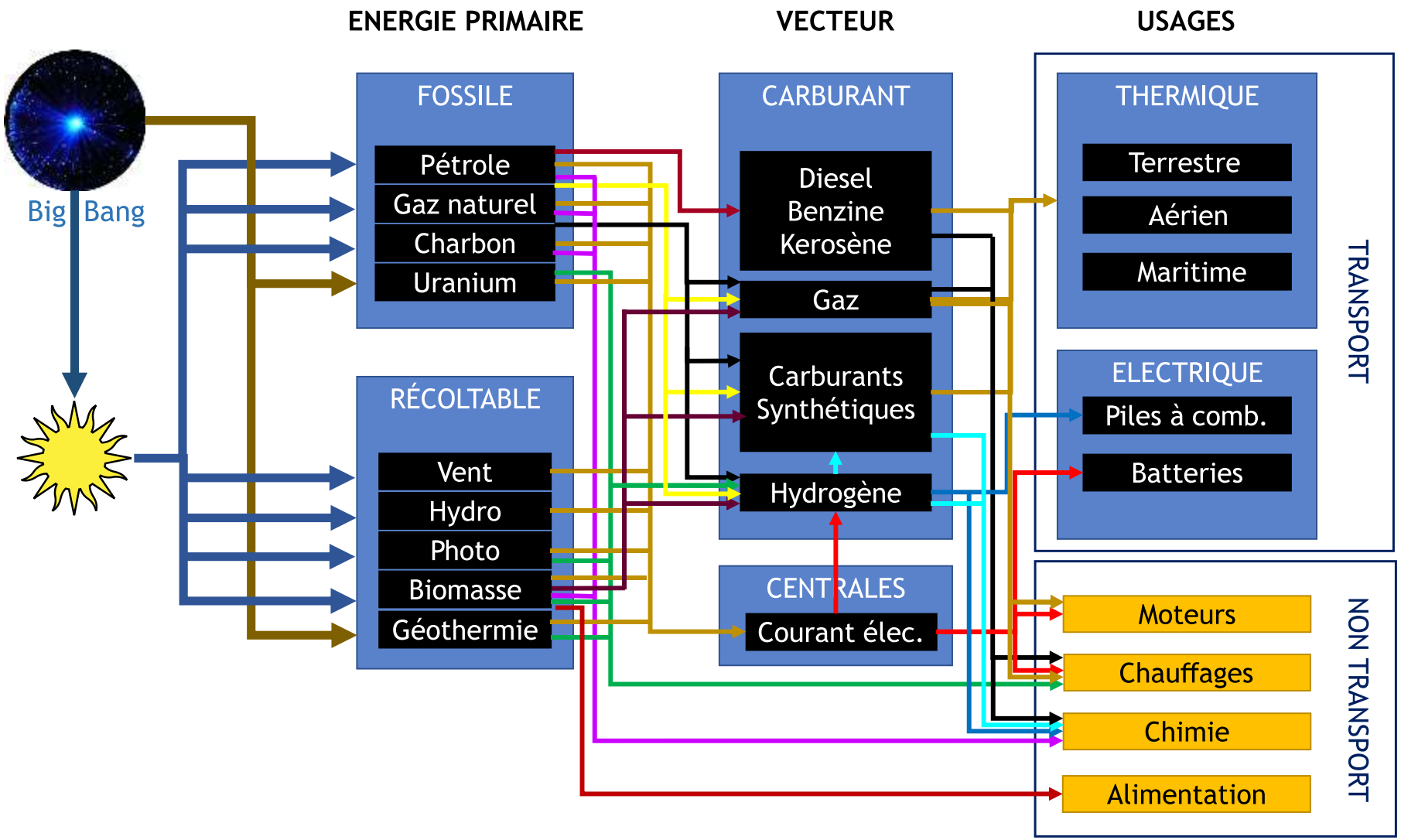
  Exemples : Électricité provenant de
  - Centrales thermiques à gaz, pétrole, charbon ou biomasse,
  - Centrales hydroélectriques d'accumulation (en cas de réserves suffisantes),
  - Centrales nucléaires (dans une certaine mesure seulement),
  - Centrales géothermiques et pompes à chaleur.

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Électricité nécessitant une énergie primaire

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Sources, vecteurs, usages de l'énergie



© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Thermique – Chaleur

- **Température** : Grandeur physique caractérisant le degré d'agitation thermique des particules formant une matière. Elle est intensive car elle n'est pas fonction de la taille du système.
- **Capacité thermique :** Quantité d'énergie que peut accumuler une masse ou un volume de matière. Chaleur qu'il faut lui fournir pour augmenter sa température d'un degré, exprimée à pression constante C_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] ou à volume constant C_v [$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$].
- **Chaleur latente :** Chaleur fournie pour changer l'état d'une matière, p.ex., faire fondre ou vaporiser, ou chaleur dégagée lors du phénomène inverse, cristallisation ou condensation, [$J \cdot kg^{-1}$].
- **Chaleur de combustion :** Chaleur dégagée par un carburant lors de la combustion, caractéristique de chaque substance inflammable, [$J \cdot kg^{-1}$].
  La chaleur d'évaporation de l'eau produite lors de la combustion doit être prise en compte (pouvoir calorifique supérieur ou inférieur).

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Astuces humaines pour transformer quelque chose

Processus

Énergie introduite (**EI**) dans le système afin de rendre possible la transformation au long de son cycle de vie.

Exemple : énergie qui a servi à construire le véhicule, alimenter l'ouvrier et le comptable de l'usine, transports, etc.

Énergie accessoire directe ou impliquée

Intrants

Processus de transformation

Produits

Matières premières ou énergie consommée pour être transformées par le processus, toujours avec un rendement inférieur à l'unité.

Exemple : Essence alimentant un moteur thermique.

Pertes & Déchets

Dissipés ou accumulés à température ambiante. Pour recycler (si possible), un autre processus doit être engagé.

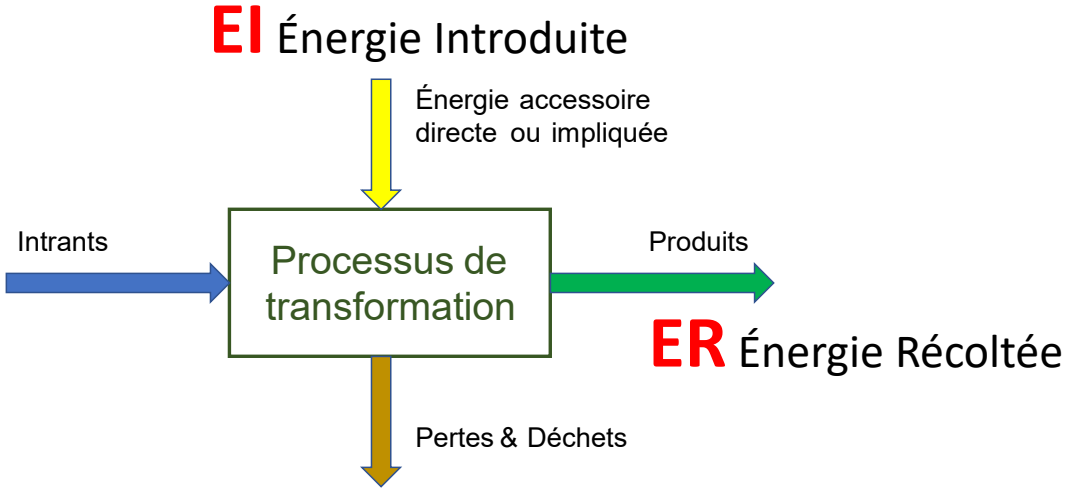
Énergie utile, Énergie finale, **ER** :

Forme directement utilisable, sans autre transformation effectivement transformée selon le but du procédé. Aussi appelée exergie, qui exprime le travail maximal récupérable.

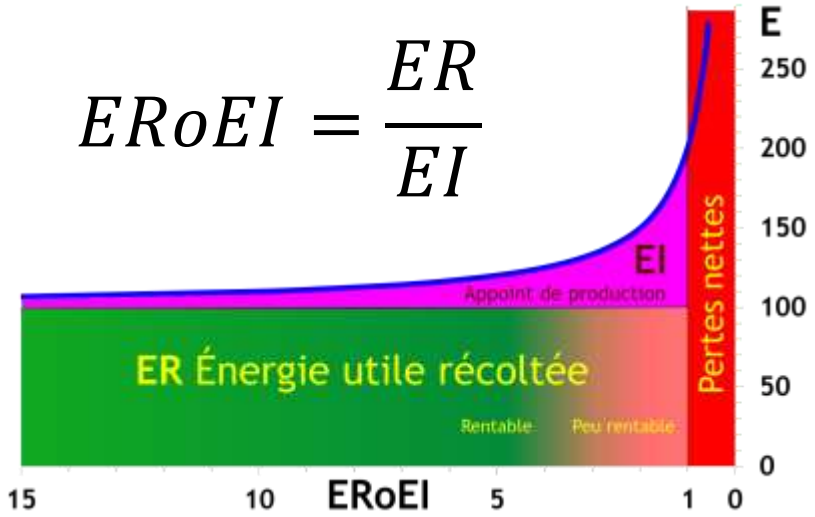
Exemple : Énergie mécanique qui fait se mouvoir un véhicule.

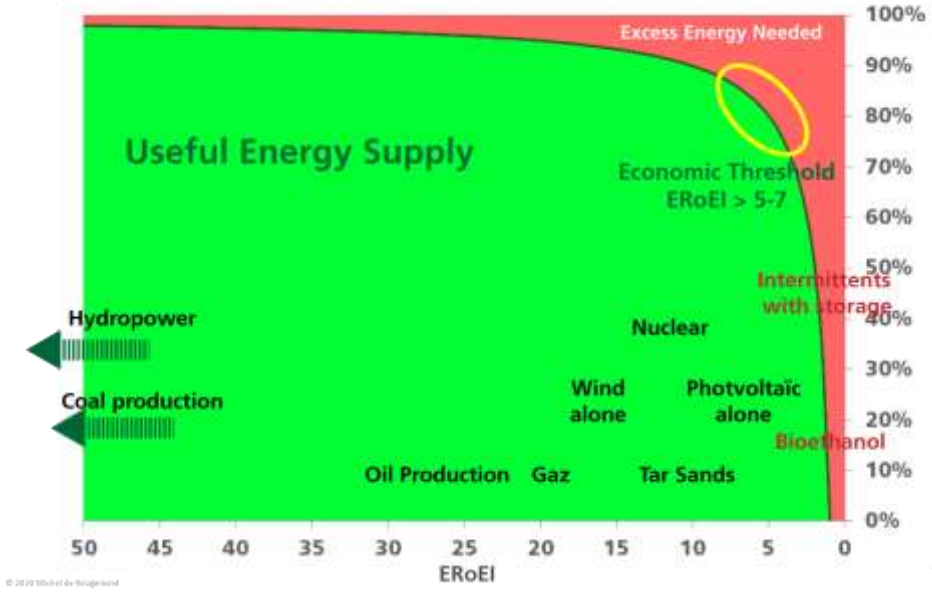
© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Récolter l'énergie primaire coûte de l'énergie



$$ERoEI = \frac{ER}{EI}$$



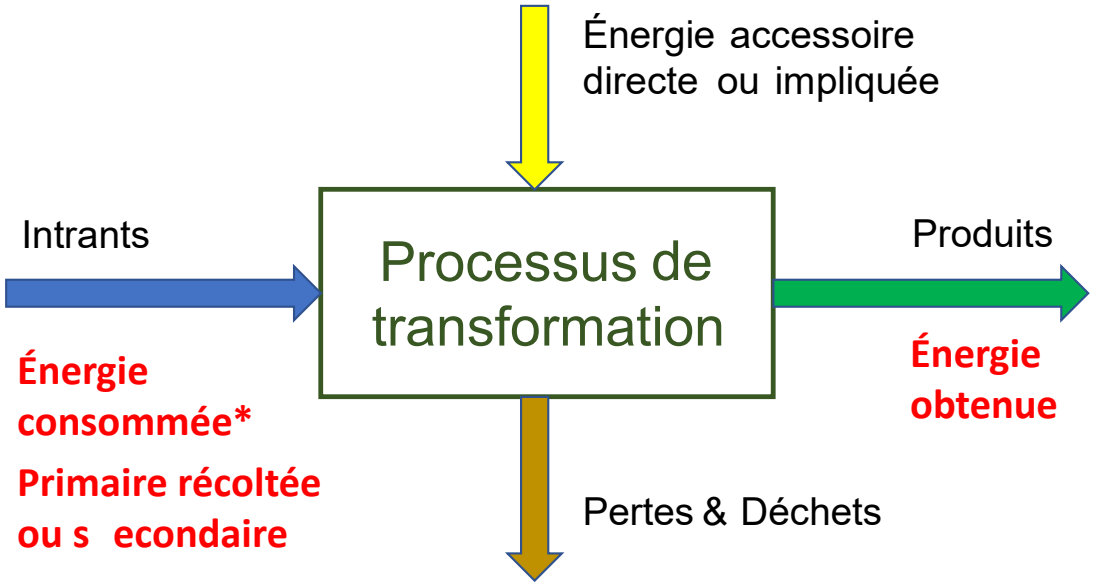


Si EI > ER, ou ERoEI <= 1,
le processus consomme plus qu'il ne produit,
c'est insoutenable car cela demande un apport
d'une source extérieure (subvention).

Seuil économique : ERoEI >> 5 à 7

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Rendement



$$\eta = \frac{Produit\ utile}{Intrants\ engagés} = \frac{Énergie\ obtenue}{Énergie\ consommée}$$

Le rendement d'une machine thermique dépend de la température absolue [K] de la source (température supérieure) et de celle du puits d'énergie (température inférieure), selon la loi de Carnot, valable pour un système isolé :

$$\eta = 1 - \frac{T_{puits}}{T_{source}}$$

Selon BP, une centrale électrique thermique 'standard' a un rendement énergétique de 40%.
Il faut brûler 2.5 kWh de combustible pour obtenir 1 kWh électrique.

Le rendement d'une station de pompage-turbinage qui stocke de l'énergie en pompant de l'eau en altitude est au mieux de 80%.
Il faut consommer 125 kWh pour réinjecter plus tard 100 kWh dans le réseau. La différence de 25 kWh est dissipée à la température ambiante.

* Attention : ne pas confondre avec EI de ERoEI, seuls les intrants faisant l'objet de la transformation sont considérés, et non les accessoires.

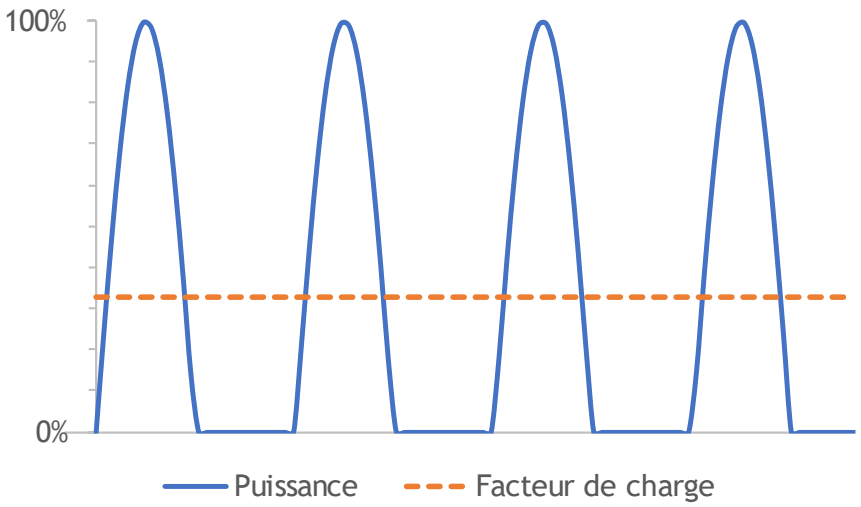
© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Facteur de charge

Le facteur de charge (*Capacity Factor*, CF) exprime le taux d'utilisation d'un équipement technique dans un intervalle de temps (typiquement une année).

Il est calculé comme le rapport entre la production effectivement réalisée et celle qui aurait pu être produite tout au long de la période s'il avait fonctionné continûment à 100% de sa capacité nominale.

CF multiplié par 8760 exprime le nombre d'heures équivalentes qui auraient été travaillées dans l'année à 100% de la capacité installée
La valeur [100 - CF] est le taux d'inutilisation d'un équipement, son taux de chômage technique.



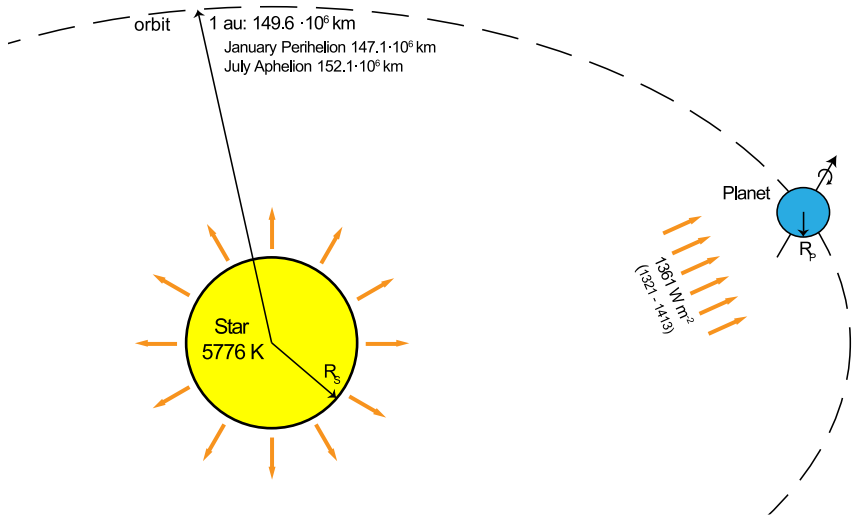
Valeurs typiques de CF pour la production d'électricité :

- panneau photovoltaïque en Suisse 11%, au Sahara 25 % ;
- éolienne en Suisse 20%, offshore au Danemark 40 % ;
- usine hydroélectrique au fil de l'eau en Suisse 60 % ;
- centrale hydroélectrique d'accumulation en Suisse : env. 20 % (pilotage);
- station de pompage-turbinage hydroélectrique < 25 % ;
- centrale nucléaire : 80 à 90%, selon les arrêts pour révision et entretien ;
- centrale thermique : de zéro (diesel de secours) à 80 à 90 % selon besoins.

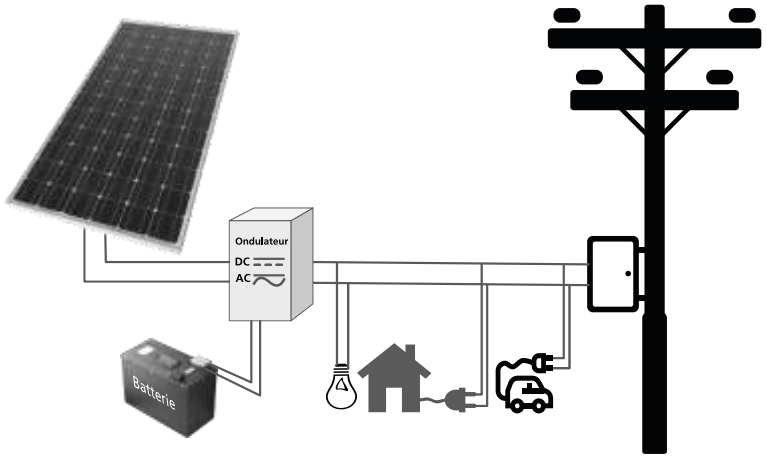
© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Irradiation solaire et photovoltaïque

Irradiation solaire :
A l'orée de la Terre, avant de pénétrer dans l'atmosphère, éloignée de 150 millions de km du soleil, l'irradiation solaire (étonnamment appelée constante solaire) est de 1 361 W·m^{-2} (entre 1 413 au périhélie, début janvier, et 1 321 à l'aphélie, début juillet).
En moyenne sur l'année, tenant compte de la sphéricité de la Terre et de sa rotation, l'irradiation reçue est le quart de cette valeur, soit ~340 W·m^{-2}.
Mesurée au sol, cette irradiation est atténuée par la couche d'atmosphère et les nuages qui s'y trouvent. En Suisse et à midi il faut compter avec une irradiation maximale de 1000 W·m^{-2}.



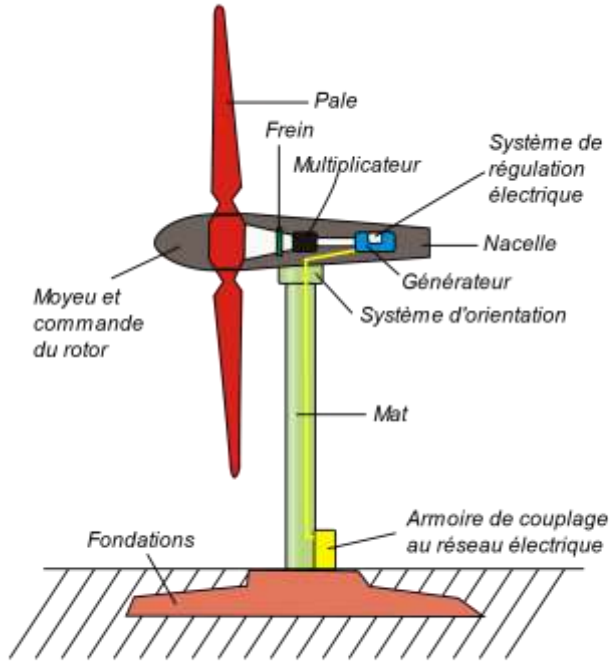
Photovoltaïque (PV) :
Production d'électricité utilisant la capacité d'un matériau (p.ex., panneau de silicium) à transformer l'irradiation solaire en électricité.
En conditions optimales, à midi, un panneau solaire moderne fourni une puissance de 200 W·m^{-2} sous forme de courant d'abord continu puis, transformé par un ondulateur, en courant alternatif utilisable et injectable dans le réseau.
En réalité, et résultant aussi de la nébulosité, un panneau ayant une capacité nominale de 200 W_p ne fournira en moyenne annuelle en Suisse qu'environ 22 watts utiles (CF = 11 %).



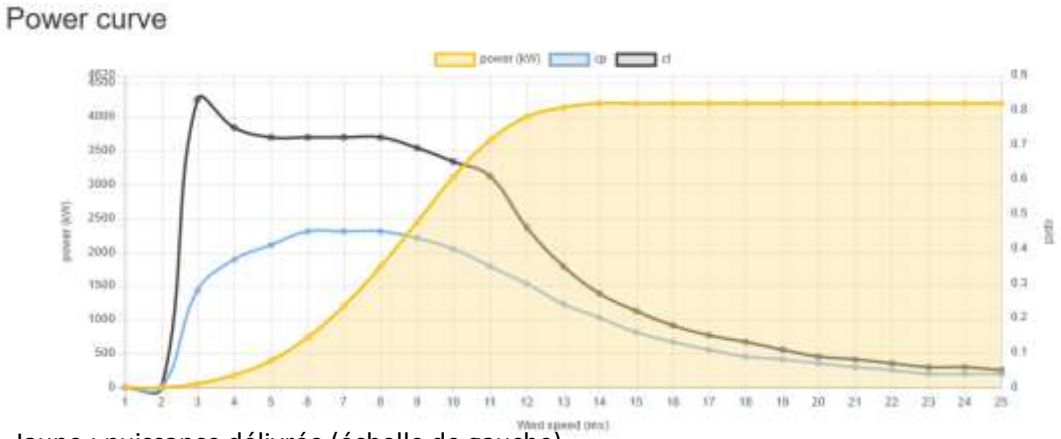
© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Éolien

Énergie éolienne :
Transformation en courant électrique de l'énergie cinétique du vent.
Selon la loi de Betz, au maximum 16/27 (59.3 %) de l'énergie contenue dans le vent qui peuvent être récoltés.
La puissance de récolte est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.
Une éolienne moderne a des pales ajustables qui permettent d'étaler la plage utile de vitesse du vent.
Au-delà d'une limite maximale elle doit être mise en drapeau.
Elle a besoin d'énergie extérieure pour démarrer ou se maintenir en mouvement par temps calme
(4 à 5% de l'énergie totale qu'elle produit, ou plus s'il faut chauffer les pales afin qu'elles ne givrent pas).



Source : Wikipedia



Jaune : puissance délivrée (échelle de gauche)
Bleu : coefficient de puissance = (P. produite par l'éolienne / P. totale disponible dans le vent)
Noir : coefficient de poussée
Source : https ://en.wind-turbine-models.com/turbines/1183-enercon-e-126-ep4

Courbe de puissance d'une éolienne Enercon E-126 EP4

Puissance nominale :	4.2 MW
Diamètre du rotor :	127 m
Vitesse en bout de pale :	77 m/s ou 277 km/h
Hauteur totale :	163 à 210 m
Plage de vent :	3 à 34 m/s

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

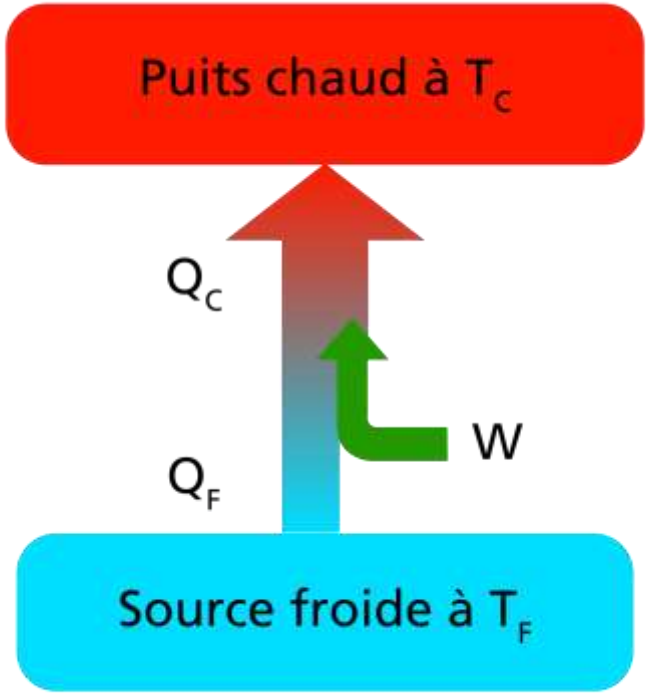
Pompes à chaleur

Dispositif thermique qui extrait de l'énergie d'une source froide pour la restituer à une température plus élevée.
Ou qui réchauffe un puits chaud pour refroidir une source froide.
Pour accomplir cet exploit il faut apporter de l'énergie électrique à un compresseur.

Réfrigérateur ou climatiseur : la source froide est l'intérieur de l'armoire frigorifique ou de la chambre, le puits chaud étant l'air ambiant derrière le frigo ou dans la rue, dans les deux cas près des cafards qui apprécient.

Pompe à chaleur : la source froide qui évapore un fluide réfrigérant est l'air ambiant extérieur ; l'air à l'intérieur de la maison est le puits chaud où ce gaz est condensé après qu'il aura été comprimé (compresseur électrique).

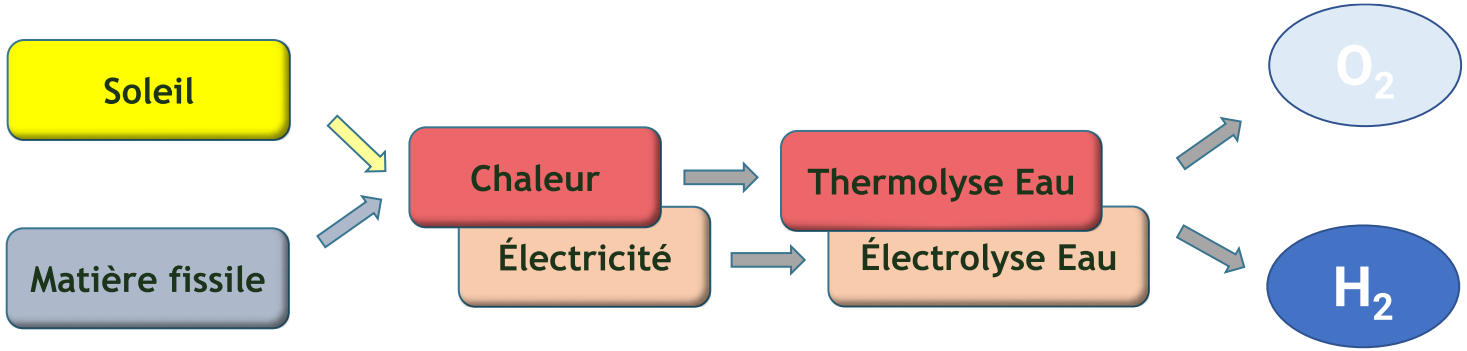
Les pompes à chaleur sont spécifiées selon leur Coefficient de Performance (COP) qui est le quotient de la chaleur obtenue par l'énergie électrique utilisée. Il est de l'ordre de 3 à 4. Elles perdent une part de leur efficacité par temps très froid et doivent être complétées par un chauffage électrique direct.



$$COP = \frac{Q_C}{W_{él}}$$

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Hydrogène



L'hydrogène doit plutôt être considéré comme un réactif chimique (réducteur puissant) que comme un vecteur énergétique.

Il n'est pas une réponse à la question du stockage d'électricité intermittente.
(facteur de charge rédhibitoire)

Caractéristiques :

- Explosion entre 4 et 75 % vol. dans l'air,
  Très faible énergie minimale d'inflammation.
- Chaleur de combustion 120 MJ/kg.
- Densité : 0.09 Kg/m^3 à pression ambiante, 42 Kg/m^3 à 700 bar, 72 Kg/ m^3 sous forme liquide à −252,87 °C.
- Densité énergétique sous forme liquide 8 640 MJ/ m^3,
  4 fois moins que le kérosène.

Fabrication :

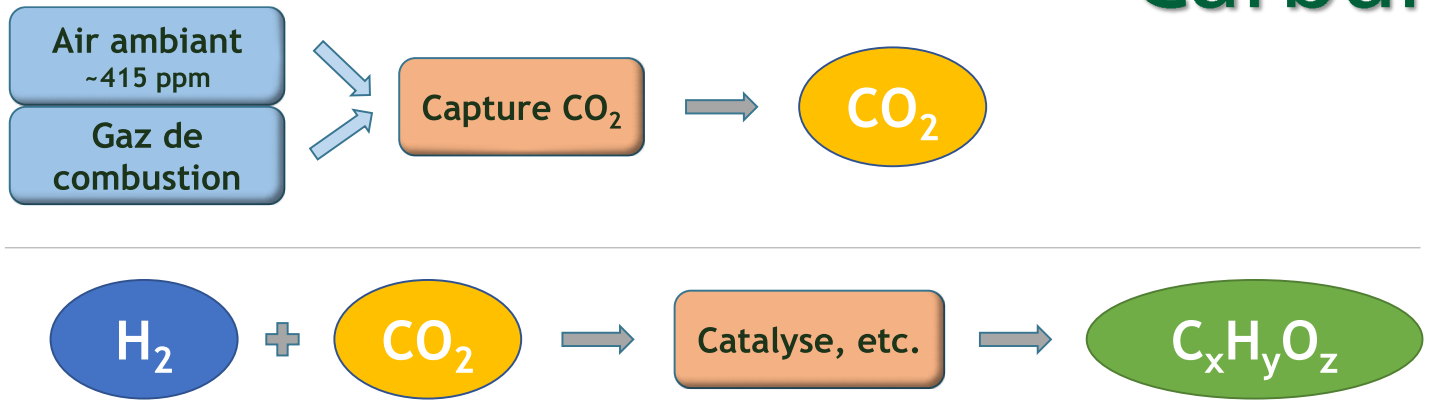
- Combustion partielle du gaz (méthane),
  actuel et industriel à très grande échelle.
- Électrolyse de la saumure
  (sous produit de chlore et soude caustique)
  ou de l'eau, rendement < 75% , peu pratiqué.
- Thermolyse
  Futur avec nucléaire de haute température.
  Défis : séparer de l'oxygène, catalyse, rendements.

Usage :

- Synthèse d'ammoniac et d'engrais azotés
- Réductions chimiques
- ~~Thermique~~ (turbines, piles à combustible, etc.)
  une aberration dispendieuse!
- Fabrication de carburants de synthèse
  Défis : rendements énergétiques et coûts

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Carburants de synthèse



L'hydrogène réduit du CO_2 capturé à la source ou extrait de l'air ambiant (415 ppm)
Produits : hydrocarbures oxygénés dont le méthanol, acide formique et autres.

Objectif : obtenir un nouveau **vecteur énergétique**…

- **liquide aussi dense** que l'essence ou le diesel,
- afin de l'utiliser dans des **moteurs thermiques existants**,
- pour **propulser** des voitures, camions, trains, navires, avions,
- **sans nouvelles difficultés** logistiques ou techniques.

Procédé industriel connu :

- Fischer-Tropsch, 1923

Problème :

- Origine, rendements et coût de l'hydrogène

Défis :

- Processus de catalyse
- Rendements énergétiques
- Coûts

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Biomasse et biocarburants.

La photosynthèse est au service de la vie et non de la production d'énergie.

D'une rare puissance au printemps ou lors de la croissance de jeunes pousses, la photosynthèse ne fonctionne que de manière saisonnière et ne donne qu'une récolte par année (ou deux pour certaines cultures sous les tropiques).

Exemple de biomasse :
Environ 30 tonnes par année de bois sec peuvent être récoltées à partir d'un hectare de forêt hautement productive.

Avec une chaleur de combustion de 5 $kWh \cdot kg^{-1}$, c'est l'équivalent d'une puissance de 1.74 $W_{th} \cdot m^{-2}$ qui est déployée.
alors que le photovoltaïque ayant un CF de 11 % récolte en moyenne annuelle 22 $W \cdot m^{-2}$ sous forme d'électricité directement utile.

La situation du bioéthanol et des bio-fuels est pire.

Ces carburants n'ont d'intérêt que parce qu'ils sont liquides, faciles à manipuler et stocker, et utilisables dans les moteurs et turbines thermiques conventionnels.

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Densités énergétiques

Selon leur nature, les vecteurs énergétiques ont une densité massique ou volumique différente, ce qui est important pour leur stockage et leur transport.

Contenu énergétique	kWh/unité	unité
Essence SP95	13	kg
	10	litre
Gaz naturel	10.6	m^3
	14.8	kg
Hydrogène	3.54	m^3
	39.4	kg
Charbon (anthracite)	7.5	kg
Bois et déchets de bois sec	5	kg
Uranium enrichi à 3,5% ^{235}U	960 000	kg
Batterie au plomb	0.041	kg
Batterie Li-ion	0.128	kg

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Empreinte sur le territoire

Le territoire occupé par une centrale électrique dépend de la puissance installée [$MW_{él}$] et de la technologie utilisée.
De plus, la production annuelle par unité de surface [$kWh \cdot m^{-2} \cdot an^{-1}$] dépend du facteur de capacité de cette technologie à l'endroit où elle est installée.

Surface mobilisée pour 1 MW	m^2/MW	Production $kWh \cdot m^{-2} \cdot an^{-1}$
1358 chevaux fournissant 736 W chacun Fourrage 12 kg/jour, prod. 20 000 kg/ha/an	3 000 000	0.96
Photovoltaïque (200 W_p/m^2)	5 000	193
Éolien (turbines de 3 MW_p, diamètre de 120 m)	21 000	83
Hydraulique au fil de l'eau (Rheinfelden, 100 MWe)	700	7 500
Hydraulique d'accumulation (Grande Dixence, Bieudron 1269 MW_e) Lac de retenue 3,65 km^2 Bassin de captage 360 km^2	 2 880 284 000	 550 5.5
Nucléaire pour 1 Réacteur isolé (Leibstadt, 1233 MW_e)	170	44 000

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

MR's Blog
On & Off the Line

PRINCIPES ÉNERGÉTIQUES

Des principes sont à respecter afin de rendre les choses possibles, et aussi d'éviter des catastrophes.

Ce ne sont pas des injonctions morales mais pratiques, bien qu'il soit amoral de ne pas les respecter délibérément.

DÉFINITIONS

CONSÉQUENCES

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Thermodynamique

Les quatre principes de la thermodynamique sont à respecter absolument.

0.- Équilibre : Si un système A est en équilibre avec B et que B est aussi en équilibre avec C, alors A est en équilibre avec C.

Permet de mesurer la température avec un thermomètre.

1.- Conservation : L'énergie se conserve.
Il ne s'en crée pas spontanément.
Celle d'un système isolé ne change pas.

Si elle change, cela doit être dû à une source ou un puits extérieur.

2.- Désordre : Le niveau de désordre d'un système isolé (son **entropie**) ne peut que croître.
L'entropie est maximale lorsque le système se trouve à l'équilibre.

Remettre de l'ordre exige un apport d'énergie externe, ou provoque plus de désordre ailleurs dans le système.

3.- Zéro absolu : L'entropie d'une substance pure est nulle au zéro absolu de température (T= 0 Kelvin ou -273.15 °C, c'est un absolu inatteignable).

L'espace intersidéral est à 2.7 K.
Pas de mesure possible en-dessous.

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

1. L’énergie ne se renouvelle pas.

Sauf la vie, rien n’est renouvelable.

Ce qui se répète est le contraire du nouveau.

L’énergie se récolte là où elle est accumulée ou là où elle passe.

2. Pas de transformation d’énergie sans pertes.

Les pertes se dissipent sous forme de chaleur dans l’environnement ambiant de l’installation transformatrice.

Ultimement, ces pertes s’évacuent dans l’espace interplanétaire.

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

3. Approvisionnement électrique d'un pays.

À réaliser **en tout temps et sans interruption** par

- la récolte locale d'énergies primaires,
- la transformation locale d'énergies secondaires,
- complétées par
  des importations afin de satisfaire la demande instantanée du marché
  ou des exportations en cas d'excédents de production.

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

4. Le courant électrique ne se stocke pas comme tel.

S'il est disponible en excès de ce que demande le marché (ponction sur le réseau par tous les utilisateurs), il faut soit l'exporter tel quel, soit le transformer pour le stocker, soit renoncer à le produire, soit modifier cette demande.

La mise en stock d'électricité nécessite 6 étapes :

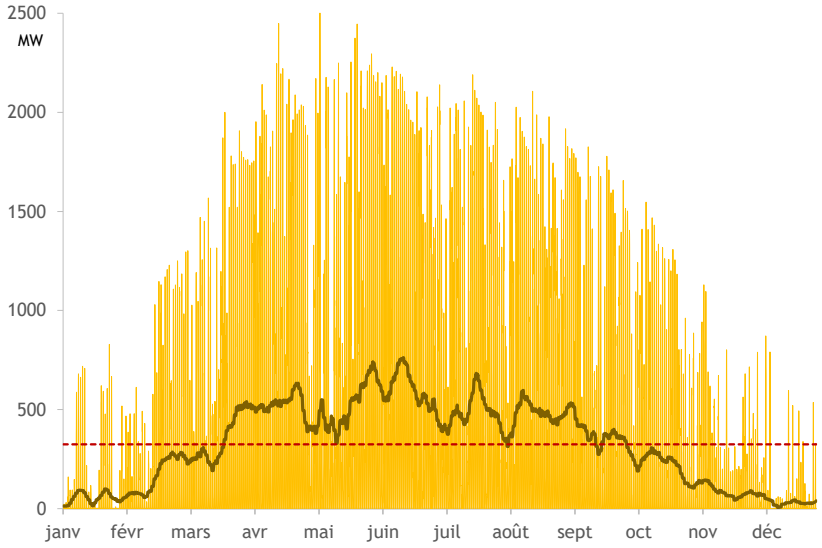
(1) production du courant,
(2) transport vers l'installation de charge,
(3) transformation en forme stockable,
(4) conservation,
(5) transformation en courant électrique,
(6) transport vers l'utilisateur de ce courant.

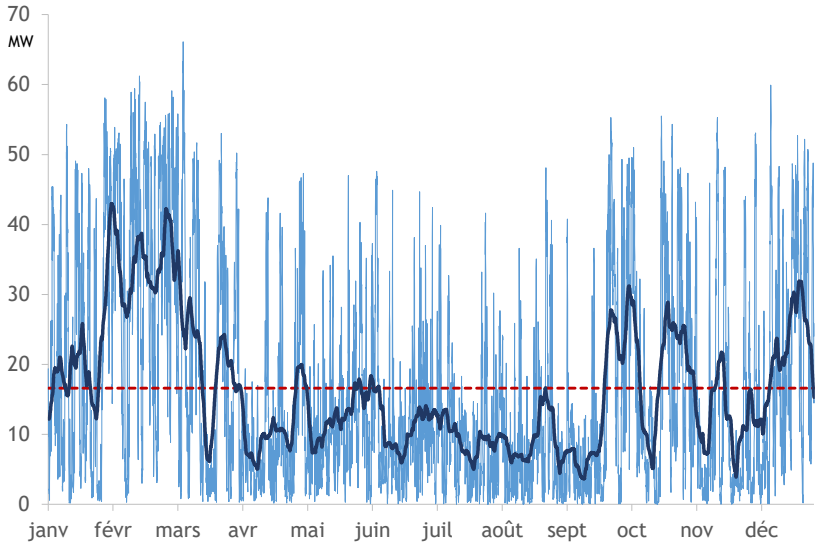
Le facteur de charge (CF) d'un tel système est au mieux celui de la première étape.

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

5. Production d'électricité intermittente et fatale.

Le photovoltaïque ou l'éolien ne peuvent jamais satisfaire la demande sans systèmes supplémentaires de stockage à court et long terme (saison) ainsi que des lignes de transport adaptées.





Production photovoltaïque en Suisse en 2021 (à gauche) et éolienne en 2020 (à droite)
La courbe foncée est la moyenne lissée sur 7 jours.
Le traitillé rouge correspond à la puissance moyenne, liée au facteur de charge CF.
Source : energy-charts.info, OFEN.

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

6. ERoEI : si ER est relativement aisé à définir, ce n'est pas le cas de EI.

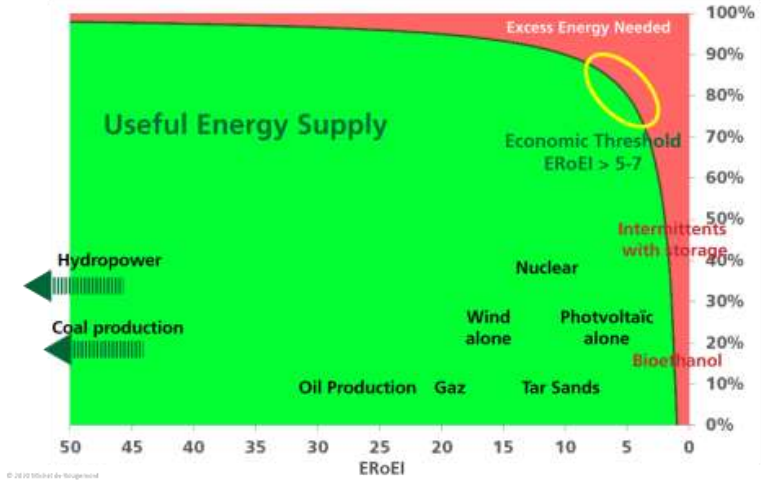
Une comparaison des bilans énergétiques, matériels ou financiers entre différents systèmes doit comprendre **tous leurs éléments constitutifs** au cours de leur vie entière (analyse du cycle de vie) :

- Construction
- Opérations y compris les transformations et stockages nécessaires et les pertes associées
- Traitement des déchets
- Compensation d'externalités négatives ou crédit si elles sont positives
- Démantèlement des installations devenue obsolètes.

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

7. EroEI >> 1

La récolte d'énergie primaire doit produire plus d'énergie qu'il n'en coûte !



C'est la condition afin d'assurer
un approvisionnement énergétique général.
Sinon une autre source primaire ou secondaire
doit être engagée durablement pour exploiter cette source primaire,
ce qui est ou bien une subvention externe ou un serpent qui se mord la queue.

Une autre façon de comprendre cet impératif est que
le délai de recouvrement (*pay back time*) de l'énergie consommée par l'énergie produite doit être inférieur à la durée de vie de l'installation, faute de quoi on aura dépensé plus qu'on n'a obtenu.

Ainsi, approvisionner un chalet d'alpage avec du solaire photovoltaïque peut se faire grâce à une telle subvention apportée d'ailleurs.

Il n'est cependant pas possible d'approvisionner une économie dans son entier qui s'épuiserait à consommer plus d'énergie qu'elle n'en peut récolter.

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

8. Capacité nominale et facteur de charge

La capacité nominale à installer pour satisfaire une demande est **inversement proportionnelle au facteur de charge** caractérisant la technologie utilisée au lieu où elle est installée.

Hypothèse :
En 2050, ou après décarbonation, la demande de courant électrique sera de 90 TWh/a, dont 40 seront peut-être fournis par l'hydraulique.
Pour les 50 TWh/a restants, il faudrait installer des capacités de :

- 52 GW_p PV, panneaux solaires ayant un CF = 11 %, soit 14 600 terrains de foot avec panneaux de 200 W/m^2, ou
- 29 GW_p éolien ayant un CF = 20 %, soit 10 000 éoliennes de 3 MW, une tous les 2 km sur tout le territoire du pays, ou
- 9.5 $GW_{él}$ gaz CCGT avec CF= 60 %, soit 38 installations de 250 MW, identiques à la centrale de réserve de Birr (AG), ou
- 6.7 $GW_{él}$ nucléaire avec CF = 85 %, soit 4 centrales de 1.65 GW, occupant au total 1.2 km^2 de territoire.

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

9. CF d'une installation consommatrice.

Le facteur de charge d'une installation consommant la production d'une autre sera **égal ou inférieur** à celui de la source.

Cela concerne les installations de stockage de courant, sous quelque forme que ce soit.

Exemple : Un électrolyseur produisant de l'hydrogène avec de l'électricité fournie par un parc éolien ayant un CF de 20% aura lui aussi une utilisation de 20% de sa capacité nominale (qui doit être aussi puissante que celle des éoliennes).

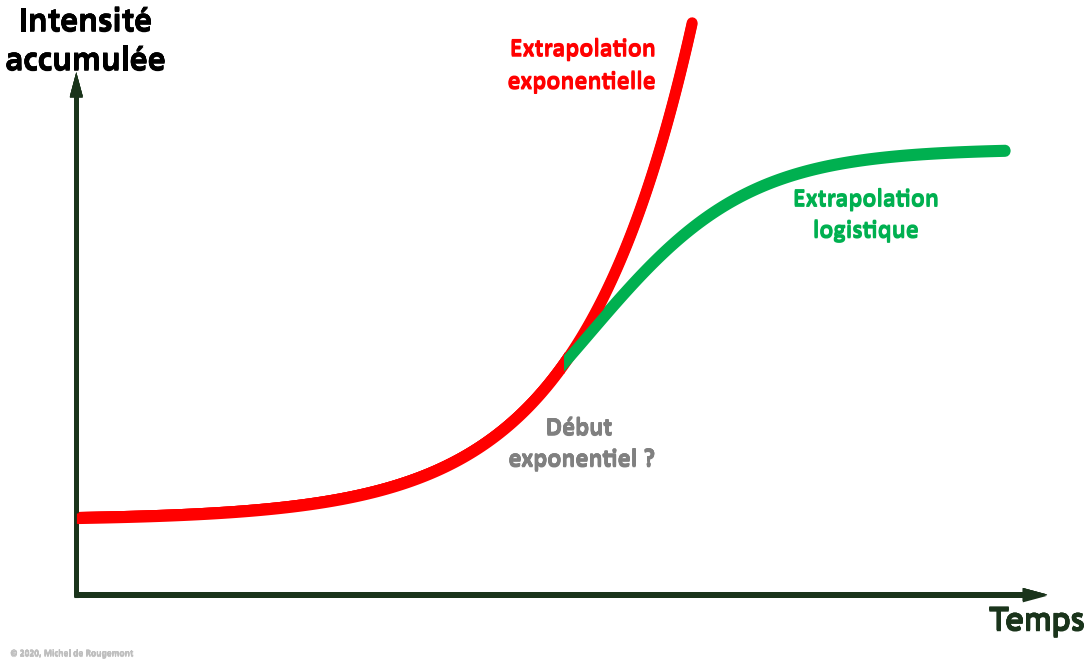
Autrement dit, il faudrait construire 4 fois plus d'électrolyseurs qu'il serait normal de le faire (ayant un objectif « normal » de CF = 80 %).

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

10. Exponentiel.

Rien n’est exponentiel car tout se termine après que les ressources matérielles et énergétiques à disposition ont été consommées.

L’évolution d’un phénomène, explosion ou démographie, que l’impatient, l’inquiet et l’alarmiste déclarent exponentiel, se termine comme une fonction logistique (en forme de sigmoïde).



© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

11. Les faits sont tenaces.

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

MR's Blog
On & Off the Line

CONSÉQUENCES

Des faits et des principes, les conséquences doivent être tirées.

DÉFINITIONS

PRINCIPES

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Histoire

La **densité énergétique** s'est améliorée au fur et à mesure que la dépense énergétique a été confiée à des animaux de traits, puis à des machines plus efficientes utilisant des vecteurs **plus performants**.

Cette voie de progrès indéniable est maintenant brisée par la promotion d'énergie dites renouvelables mais qui ne le sont pas et qui, en quelque système que ce soit et en toute proportion même minime,

- **ne satisfont pas la demande en tout temps,**
- **réduisent l'efficacité de la production électrique,**
- **en augmentent les coûts,**
- **multiplient les besoins en capitaux,**
- **déstabilisent le réseau,**
- **imposent une plus vaste empreinte environnementale.**

De multiples études sont dédiées à renforcer, prouver et promouvoir les stratégies énergétiques du pays ; la plupart sont lacunaires, biaisées et entachées de conflits d'intérêts ; elles ne tiennent pas ou mal compte des conséquences de l'intermittence des sources dites renouvelables.

L'affirmation mise en évidence ci-dessus est, elle, le fruit d'une réflexion qui inclut tout cela (Rougemont, 2022).

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Valeurs de référence

- L’approvisionnement énergétique d’un pays
  doit être dicté par la demande de son économie,
  annuelle, mais aussi l’instantanée dans le cas de l’électricité.

  La production n’a pas à dicter la demande,
  bien que des conditions spéciales puissent inciter une partie de cette demande à s’adapter aux disponibilités.
- Une demande non satisfaite entraîne des pertes :
  économiques, de compétitivité et de réputation.
- Une production intermittente et fatale comme celles du photovoltaïque ou de l’éolien ne peut pas satisfaire la demande sans systèmes de stockage et de transport, avec les pertes, les coûts et les déchets supplémentaires correspondant.
- C'est faire preuve de négligence professionnelle que de ne considérer que la première étape de la production, isolée des autres.

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

ERoEI (ter) et l'économie

- Il ne suffit pas que ERoEI soit supérieur à l'unité.
  Les rendements impliqués et les contraintes sur l'emploi des ressources font que **ERoEI doit atteindre au moins 5 à 7** pour que la récolte d'énergie primaire soit économiquement (et donc socialement) abordable.
- Il ne faut pas oublier que EI est elle-même dépendante de la manière avec laquelle elle aura été obtenue.
- Plus faible est l'ERoEI plus grande est la part du PIB (Produit Intérieur Brut, une mesure de la richesse produite) qui doit être consacrée à l'approvisionnement énergétique.
  Personne, sauf les gilets jaunes, ne sait quelle est la limite maximale tolérable.
- La cupidité des acteurs de ce secteur explique leur intérêt à faire baisser cet ERoEI
  (= diminuer l'efficience).
- Cependant, le but d'une société humaine ne peut pas se résumer à se nourrir, se vêtir, se soigner, éviter de polluer et ne transformer de l'énergie que pour cela.
  Plus d'énergie est nécessaire afin de pouvoir poursuivre des buts plus importants et ambitieux, plus humains.
- La littérature scientifique et technique est particulièrement pauvre au sujet de ERoEI.
  (Mearns, 2016), (Weißbach et al., 2013), (Ferroni & Hopkirk, 2016)

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

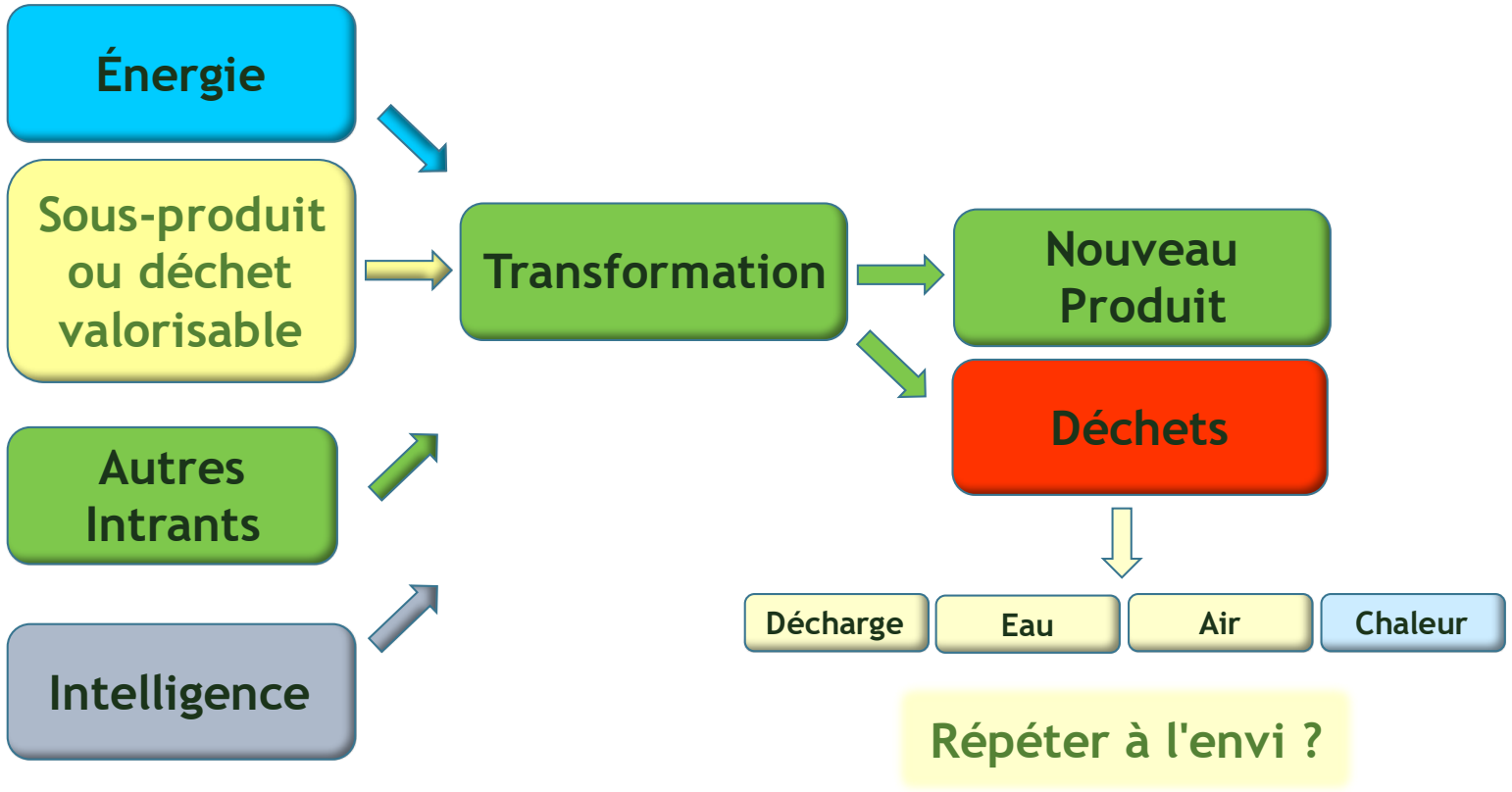
Substitution technologique *(Energiewende)*

Ayant un faible facteur de capacité et n'étant pas pilotable,
une technologie peu disponible n'est pas apte à remplacer
une technologie de haute disponibilité,
quel que soit son coût individuel isolé.

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Recyclage

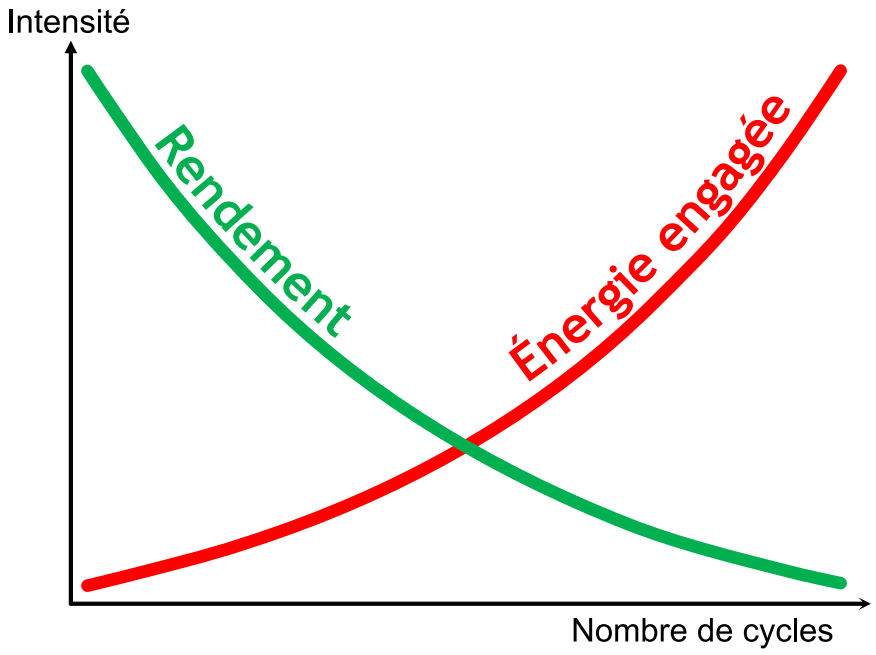
Tout n'est pas recyclable et les rendements se multiplient d'étape en étape pour s'approcher de zéro.

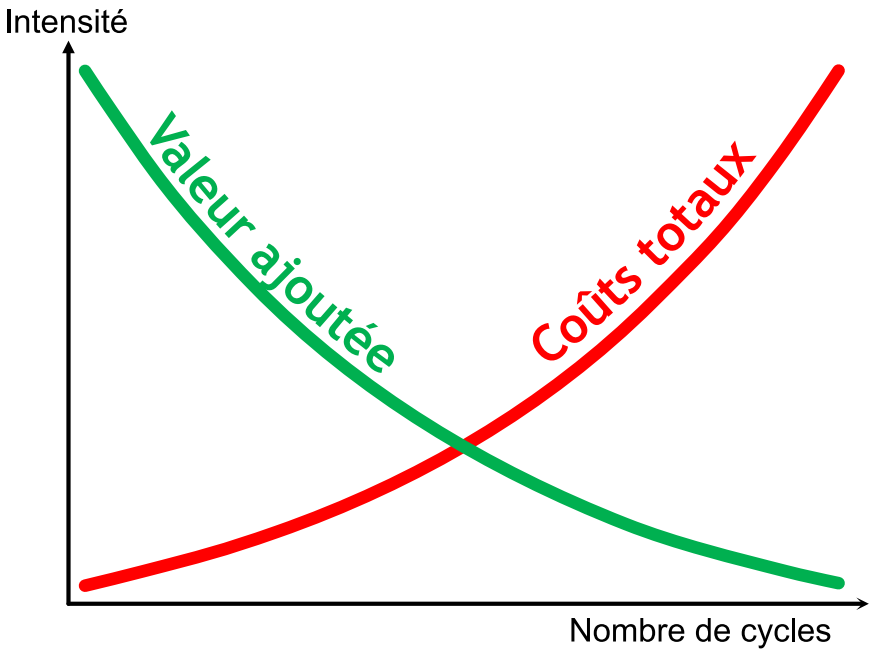


© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Limites du recyclage

Toute opération de recyclage atteint ses limites lorsque les ressources humaines, matérielles et énergétiques à mettre en œuvre dépassent la valeur énergétique, économique ou sociale de la chose recyclée.





© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Investissements et besoins de capitaux

- Les besoins en capitaux suivent la même loi que la capacité nominale, ils sont **inversement proportionnels au facteur de charge**.
  De plus, les durées de vie ne sont pas les mêmes selon les technologies et doivent être considérées dans les comparaisons.
- Une comparaison des investissements et des coûts n'est valable que pour un périmètre similaire : satisfaction de la demande en toute heure et sur une durée commune, par exemple un siècle.
- Le tableau de la diapositive suivant donne l'estimation grossière, mais réaliste et comparable, des investissements nécessaires pour fournir 50 TWh/a supplémentaires de courant électrique (selon l'exemple donné sur la diapositive 28) par une seule des technologies envisageables.
  En résumé :

Solaire industriel	230%	14 600 terrains de foot
Solaire domestique	460%	
Éolien	150%	10 000 turbines de 3 MW_p
Gaz	320%	38 fois Birr (250 $MW_{él}$)
Nucléaire	100%	4 centrales de 1,65 $MW_{él}$ 1.2 km^2

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Coûts comparables

	Capacité nominale	Coût spécifique	Investissement total		Investissement sur un siècle
	GW	Fr/kWe	Mrd Fr		Mrd Fr
Photovoltaïque industriel			**151**		**317**
Modules	52	1000	52	Durée de vie 25 à 30 ans	156
Stockage-restitution-transport	52	1500	78	Durée de vie 80 ans	98
Désaffectation et gestion des déchets*		400	21		63
Photovoltaïque individuel, toitures			**255**		**629**
Modules	52	3000	156	Durée de vie 25 à 30 ans	468
Stockage-restitution-transport	52	1500	78	Durée de vie 80 ans	98
Désaffectation et gestion des déchets*		400	21		63
Éolien			**91**		**203**
Turbines**	27	1500	40	Durée de vie 25 à 30 ans	120
Stockage-restitution-transport	27	1500	40	Durée de vie 80 ans	50
Désaffectation et gestion des déchets*		400	11		33
Gaz (cycle combiné CCGT)			**176**	Durée de vie 40 ans	**440**
Capital immobilisé	9.5	630	6		15
Achats de carburant (actuellement à 50 Fr/MWh, avec rendement de 60%).			168	**4,2 Mrd Fr/a**	420
Désaffectation et gestion des déchets		210	2		5
Nucléaire			**82**		**137**
Capital immobilisé	6.7	5000	34	Durée de vie >60 ans	57
Achat de matière fissile			18	^{235}U à 6 Fr/MWh	30
Désaffectation et gestion des déchets			30	10 Fr/MWh versés à un fonds	50

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Arbitrages nécessaires

Faux-semblants

La production des centrales au charbon et au gaz en Allemagne est le cache sexe de « renouvelables » dont les défauts congénitaux doivent être pudiquement occultés.

Éléments de décision

- Les performances comparées des technologies entrant en question sont indéniables aux yeux de gens honnêtes et sans conflits d'intérêt.
- Le choix des investissements à réaliser à très long terme doit aussi être justifié par la valeur environnementale ou sociale qui peut être attribuée à une solution plutôt qu'à une autre. Encore faut-il disposer d'indicateurs valables à ce sujet.
- Comptabiliser partout et pour tout le CO_2 n'est pas adéquat, puisque, en fin de course, il ne s'en émettra plus.
- Des critères qualitatifs, idéologiques ou des conjectures politiciennes et émotionnelles ne sauraient justifier des investissements pharaoniques.
- Les chiffres du tableau précédent ne concernent que l'approvisionnement électrique. Il faut y ajouter les changements des consommations, eux aussi pharamineux.

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Considération finale

Les dimensions de la tâche sont telles que même un pays riche ne peut pas se permettre le luxe d'aucune inefficacité qui, assurément, le mènerait à sa ruine.

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.

Prendre contact

Pour tout éclaircissement, présentation ou autre :

MR-int
Michel de Rougemont
Enterprise Consulting
Widhagweg 10
CH-4303 Kaiseraugst
Switzerland
Mobile +41 79 705 4811
contact@mr-int.ch

www.mr-int.ch blog.mr-int.ch

Gratuit,
mais non
sans valeur.

PayPal
Donate Here

© Michel de Rougemont, 2023. Tous droits réservés.