

CRITERES DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE LA PRODUCTION D'ENERGIE

Publié par Claude THIEBAUT

Copyright ©2012

Ingénieur, expert en énergie

Directeur de Publication du portail EnergyThic

Chercheur dans le domaine des Energies Nouvelles

L'article ci-après est le fruit d'une réflexion approfondie sur les objectifs à atteindre dans le domaine des centrales de production d'énergie pour répondre parfaitement aux meilleurs critères du développement durable. Il est évident que le coût total de possession des centrales de production d'énergie deviendra bientôt le standard.

Critères du développement durable

Critères relatifs à l'efficacité des moyens de production d'énergie

1)- **REN** (RENewable) - sans dimension, exprimé en pour cent

Ce paramètre définit si la machine utilise une énergie renouvelable ou non. L'énergie potentielle fossile est non renouvelable, tandis que l'énergie fournie par le soleil, le vent ou l'hydraulique est renouvelable. Lorsque l'énergie primaire est de type combustible fossile, les heures de travail pour mettre à disposition ce combustible sont intégrées dans le calcul du facteur SEC. Pour une installation utilisant 30% d'énergie fossile et 70% d'énergie renouvelable, REN= 70%.

2)- **COP** (Coefficient Of Performance) - sans dimension >1

Le coefficient de performance d'une machine en fonctionnement stable est le rapport sur une période de temps suffisamment longue de la somme des énergies nettes fournies par la machine par la somme des énergies entrantes effectivement payées par l'utilisateur. Il caractérise l'aptitude de la machine à fournir plus d'énergie que celle payée par l'opérateur. Une partie de l'énergie entrante, non payée par l'utilisateur, est extrait du milieu environnant. Globalement, la somme des énergies sortantes égale la somme des énergies entrantes. Une machine dotée d'un COP élevé permet d'obtenir un kWh économique puisque le coût final pour l'opérateur est égal à :

$$\text{Coût final kWh} = \text{Coût Initial kWh} / \text{COP}$$

3)- **COE** (Coefficient of Energy) - sans dimension ≥ 1

Le coefficient d'énergie d'une machine en fonctionnement stable est le rapport sur une période de temps suffisamment longue de la somme des énergies sortantes de la machine par la somme des énergies entrantes. Il caractérise le rapport d'amplification de la machine. Ce coefficient est couramment égal à l'unité sauf dans le cas de machines à énergie libre, dites surunitaires, pour lesquelles ce coefficient est supérieur à un. Il caractérise donc la capacité d'une machine à amplifier l'énergie entrante. Pour obtenir un COE>1, il faut que la conception de la machine crée une dissymétrie et un état instable permettant de créer une énergie excédentaire grâce un champ de potentiel. Il en résulte alors une violation de la 3ème loi de Newton et la réaction n'est plus égale à l'action.

4)- **EFF** (EFFiciency) - sans dimension, exprimé en pour cent

C'est le rendement de la machine. Il caractérise l'aptitude d'une machine à restituer une part plus ou moins importante de l'énergie sortante sous une forme utilisable. Les pertes sous forme de chaleur rejetées dans le milieu ambiant créent par ailleurs des atteintes à l'environnement, particulièrement dans le cas d'une production très centralisée de centrales de grande puissance (centrales nucléaires: 3000 MW de chaleur rejetée à la rivière pour une production nette électrique de 1500 MW). Un mauvais rendement est donc synonyme de pollution calorifique. Lorsque l'énergie primaire utilisée est d'origine fossile (charbon, gaz), un mauvais rendement entraîne également le rejet d'une plus grande quantité de gaz à effet de serre par MW produit.

5)- **AVF** (AVailability Factor) - sans dimension, exprimé en pour cent

Ce facteur est le rapport du nombre d'heures de production annuelle de l'installation par le nombre d'heures annuelles. Une centrale robuste et simple de conception a généralement un facteur de disponibilité élevé dans le cas de l'utilisation d'énergie fossile. Pour les énergies renouvelables, on peut prendre en compte les valeurs suivantes :

- Eolien onshore bien venté : 25 %
- Eolien offshore bien venté : 35 – 40 %
- Solaire photovoltaïque : 12,5 %

Ce paramètre influe sur la quantité de GES produite, sur l'appauvrissement des matières premières et sur le coût du kWh.

6)- **DUR** (DURability) - Unité [année]

La durabilité est la durée, exprimée en années, depuis la mise en service du produit jusqu'à la survenance de la période dite de ruine, au delà de laquelle une réparation s'avère trop coûteuse pour l'utilisateur. Ce critère influe sur la quantité de GES produites, sur l'appauvrissement des matières premières et sur le coût du kWh.

7)- **MDP** (Mass Divided by net output Power) - Unité [T / MW_{net}]

Ce facteur est le rapport de la masse de la machine ou de l'installation (la quantité de matière utilisée) par la puissance nette fournie. Il donne une information sur la quantité de matières utilisées pour la construction d'une installation produisant une puissance de 1 MW. Un faible MDP correspond à un faible coût de construction de la machine et une faible quantité de GES produite. Le plus mauvais ratio est à porter au crédit des centrales nucléaires: >100T/MW net.

On a la relation suivante entre les coefficients **MDP** et **SPP** (SPecific Power) exprimé en MW/T:

$$\mathbf{SPP = 1 / MDP}$$

8)- **MDE** (Mass Divided by net output cumulated Energy) - Unité [kg / MWh]

Ce facteur est le rapport de la masse de la centrale de production d'énergie (la quantité de matière utilisée) par l'énergie produite au cours de la durée de vie de l'installation. Il se calcule à partir du coefficient MDP de la manière suivante:

$$\mathbf{MDE = MDP / (8.766 * AVF * DUR)}$$

Exemple :

MDP= 100 T/MW, AVF=0.92, DUR=40 ans

Alors: MDE = 100 / (8.766 * 0.92 * 40) = 0.31 kg/MWh

9)- **DEF** (DEcentralization Factor = [mean distance of actual network - distance of new installation] / mean distance of actual network) - Unité: without dimension, expressed in per cent

Les distributeurs d'électricité connaissent parfaitement les pertes en ligne qui peuvent représenter 10 à 15 % de la production globale (En France en 2011: 34.9 TWh pour une production globale de 478.2 TWh soit 7.3 %). Pour une production de X TWh, on peut donc calculer la distance moyenne entre la

source de production et le consommateur, puisqu'elle correspond à des chutes de tension en ligne (corrigé des pertes liées aux transformateurs de puissance). Ce paramètre définit la proximité des moyens de production et du consommateur final. Un coefficient élevé réduit les pertes en ligne, le nombre de lignes haute tension et donc l'empreinte sur l'environnement. Le rapprochement de la source de production et du consommateur final permet d'utiliser des centrales de cogénération qui ont des rendements beaucoup plus élevés que de simples centrales de production d'électricité.

Exemple :

Distance moyenne du réseau actuel : 280 km - distance du réseau d'un autoconsommateur : 0,030 km, alors:

$$DEF = (280 - 0.030) / 280 = 100 \%$$

Les économies d'échelle ont commencé à échouer à la fin des années 60 et, au début du 21ème siècle, des centrales centralisées ne pouvaient plus fournir une électricité fiable et bon marché à plus de consommateurs distants sur le réseau de distribution, parce que les centrales étaient arrivées à un coût inférieur à celui du réseau et étaient devenues si fiables que presque toutes les pannes avaient pour origine le réseau lui-même. Ainsi, le réseau était devenu le moteur principal des coûts et des problèmes de qualité de la puissance distribuée à des consommateurs distants, qui devenaient plus aigus alors que les équipements digitaux demandaient une électricité extrêmement fiable. Les gains d'efficacité ne proviennent plus d'une augmentation de la capacité de production mais de l'installation de plus petites unités proches des lieux de la demande de consommation. A titre d'exemple, les centrales thermiques au charbon sont construites loin des villes pour éviter que les pollutions importantes des fumées n'affectent les populations. De plus, de telles centrales sont souvent construites à proximité des mines pour limiter le coût du transport du charbon. Les centrales hydroélectriques sont par leur nature condamnées à fonctionner sur des sites où le débit d'eau est suffisant. Une faible pollution est un avantage crucial pour les centrales à cycle combiné qui brûlent du gaz naturel. La faible pollution permet d'implanter les centrales suffisamment près des villes pour alimenter des réseaux de chauffage et de réfrigération.

Critères relatifs à l'appauvrissement des ressources en matières premières et en eau

10)- **MRF** (Materials Recycling Factor) - sans dimension, exprimé en pour cent

Ce paramètre définit le pourcentage de matières premières récupérables en fin de vie du produit. Pour les centrales nucléaires démantelées, une partie des aciers ne pourront pas être réutilisés du fait de leur taux d'irradiation. Un facteur MDP élevé et un faible facteur MRF contribue à l'épuisement des ressources de matières premières. La crainte de manquer de matières premières dans le futur est une raison principale pour inclure ce paramètre dans les critères du développement durable.

11)- **SFC** (Specific Fuel Consumption) - Unité [kg fuel / kWh]

Ce ratio est le rapport de la consommation de combustible par kWh d'énergie produit par la machine ou l'installation. Il caractérise l'appauvrissement des ressources de combustibles par kWh électrique produit. Pour une centrale électrique de rendement global EFF on peut calculer SFC de la manière suivante:

$$SFC = (1 - REN) / (LHV * EFF)$$

avec LHV (low calorific value – kWh/kg)

Pour le pétrole: LHV = 11,628 kWh/kg. Avec un rendement de 37% et un pourcentage d'énergie renouvelable de 70%, il vient: $SFC = (1 - 0,7) / (11.628 * 0,37) = 0.07 \text{ kg/kWh}$

12)- **MDF** (Material Depletion Factor) - Unité [kg / MWh]

Ce ratio est le rapport de la quantité de matières premières consommées (non réutilisables après recyclage de l'installation) par le nombre de kWh produits. Il caractérise l'appauvrissement des

ressources en matières premières. On calcule le ratio MDF à partir de MDE de la manière suivante:

$$\text{MDF} = \text{MRF} * \text{MDE}$$

Exemple :

MDE = 0.31 kg/MWh, MRF = 80%

Alors: MDF = 0.31 * 0.8 = 0.25 kg/MWh.

13)- **WCR** (Water Consumption Ratio) - Unité [m³ / kWh]

Ce ratio correspond à la quantité d'eau consommée par une centrale électrique durant sa durée de vie divisée par le nombre de kWh produits durant cette période. Les m³ d'eau évaporés durant le processus ou rejetés dans l'environnement sans traitement minimum sont à prendre en compte dans le calcul. Par exemple, on comptabilisera l'eau évaporée dans une tour de réfrigération à tirage naturel, l'eau consommée pour extraire le combustible fossile de la mine.

Critères relatifs à la consommation d'espace

14)- **SPF** (Surfacic Power Factor) - Unité [MW / ha]

Ce facteur correspond à l'empreinte au sol d'une centrale d'énergie de puissance d'un MW et est le rapport de la puissance de l'installation par la surface occupée au sol. Pour le solaire photovoltaïque, on peut considérer que l'empreinte est nulle lorsque les panneaux sont intégrés au bâti existant.

15)- **SEF** (Surfacic Energy Factor) - Unité [MWh / ha]

Ce paramètre correspond au quotient de l'énergie annuelle produite par la surface au sol occupée par l'installation. Il complète le facteur précédent en prenant en compte le facteur de disponibilité **AVF** de l'installation. Il vient donc:

$$\text{SEF} = \text{SPF} * 8766 * \text{AVF}$$

Criteria relating to pollution emissions

16)- **GGO** (Greenhouse Gases in Operation) - Unité [TCO² eq. / MWh net]

Ce paramètre correspond à la quantité de gaz à effet de serre produite lors du fonctionnement de l'installation (ce ratio est élevé pour des centrales hydrauliques installées en zone tropicale car la retenue d'eau produit du gaz méthane).

17)- **GGM** (Greenhouse Gases produced during Manufacturing process) - Unité [TCO² eq. / MWh net]

Ce paramètre est la quantité de gaz à effet de serre émise pour fabriquer, transporter et monter l'installation: exprimée en T CO² / MWh. Ce ratio résulte de la puissance massique d'une part, des exigences sécuritaires (plus de matière), du lieu de fabrication par rapport au lieu destination finale (transport) et de la durabilité du produit. Le coût global d'émission de gaz à effet de serre est égal à :

$$Cf(\text{€})_{\text{greenhouse gases emission}} = GGO_{(\text{TCO}_2 \text{ eq. / MWh})} * C_{GGO}(\text{€ / TCO}_2 \text{ eq.}) + GGM_{(\text{TCO}_2 \text{ eq. / MWh})} * C_{GGM}(\text{€ / TCO}_2 \text{ eq.})$$

18)- **HEH** (Harmfull materials for Environmental and Health) - Unité [g / MWh net] ou [g / TEP]

Ce paramètre est la quantité de matières nocives pour l'environnement et la santé, produites par les machines de production d'énergie et les processus amont/aval liés au combustible durant l'exploitation de l'installation. Les matières sont classifiées par type: mercure, dioxine , pyralène, matières radioactives. Les coûts de nettoyage des terres, des rivières (accidents), de retraitement et de conditionnement des matières dangereuses produites par les industriels doivent être incorporés dans le prix de l'énergie afin de ne pas favoriser artificiellement une technologie non respectueuse de l'environnement. Chaque matière dangeureuse est classifiée suivant une échelle calculée en fonction du coût de réparation de l'impact sur l'environnement ou la santé (indemnisation aux victimes potentielles). Les particules fines PM10 et PM2.5 sont intégrées dans ce paramètre. Le coût global d'émission de ces polluants est égal à :

$$Cf(\text{€})_{\text{harmfull pollutant emission}} = \sum_i \text{HEH}_i (\text{g/MWh}) * C_i (\text{€}/\text{g})$$

19)- **EIR** (Environmental Infringement Ratio)

Ce paramètre représente le coefficient global d'atteinte à l'environnement et à la santé. En fonction des critères définis en toute impartialité par un organisme international indépendant, chaque pollution est affectée d'un degré de susceptibilité à l'environnement et à la santé. Il cumule donc les impacts environnementaux de la pollution calorifique (EFF), des gaz à effet de serre (GGO et GGM), des matières concentrées nocives pour l'environnement et la santé (HEH) ainsi que le facteur de recyclage (MRF) puisque les matières entreposées en décharges peuvent sur le long terme polluer les nappes phréatiques. Ce coefficient global permet de classifier immédiatement l'impact sur l'environnement et la santé des différentes technologies de production de l'énergie.

20)- **SEC** (Social Effort for Creation of the machine) - Unité [hours / MWh]

Ce paramètre est égal au nombre d'heures totales de travail pour créer le produit divisé par le nombre de MWh produits par l'installation durant sa durée de vie. Ce sont les heures totales incluant la mise à disposition des matières premières (extraction des minerais, transport, fonderie), la maintenance des matériels et leur recyclage après démantèlement de la centrale. Ce facteur représente le nombre total d'heures de travail annuelles dépensées par la collectivité pour pourvoir à son indépendance énergétique et s'exprime en heure/an.

21) - **GED** (Green Energy Debt) - Unité [kWh]

La dette d'énergie grise est la somme d'énergie consommée pour la production d'un produit fini, son utilisation et enfin son recyclage. L'énergie grise est généralement la somme de :

- L'énergie dépensée lors de la conception du produit ou du service,
- L'extraction et le transport des matières premières,
- La préparation des matières premières avant leur utilisation,
- La fabrication du produit/Mise en place du service,
- La commercialisation du produit/service,
- L'utilisation et la maintenance du produit/service,
- Le recyclage.

L'énergie grise est donc la dette énergétique d'un produit avant qu'il ne commence à produire de l'énergie.

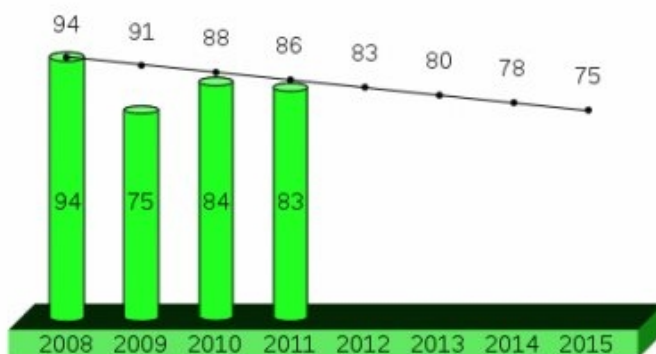
22)- **EDF** (Energy Debt Factor) - Unité: sans dimension, exprimé en pour cent

Ce facteur est égal à la quantité totale d'énergie produite par la centrale pendant sa durée de vie par la somme de l'énergie grise. Le quotient de la durée de vie du produit par le facteur EDF permet de calculer la durée de remboursement de la dette énergétique initiale.

$$\text{Durée de remboursement} = \text{DUR} / \text{EDF}$$

23)- **ENI** (Energetic Intensity) - Unité [MWh / million €]

Ce paramètre est utilisé par les sociétés pour mesurer leur consommation d'énergie en fonction du chiffre d'affaire. La sobriété énergétique va dans le sens d'une meilleure rentabilité de la société. Pour une consommation donnée de combustibles fossiles, la réduction du facteur ENI permet d'augmenter le PIB d'un pays.



Intensité énergétique typique d'une entreprise multinationale
(MWh / millions € CA)