

**Indicateurs des centrales de production**

Comment l'électricité est produite -  
Remarques liminaires  
Énergie hydraulique  
Centrales thermiques à combustion  
Centrales thermiques nucléaires  
Énergie solaire  
Énergie éolienne  
Énergie géothermique

*Ce texte est conçu comme un document compagnon du livre « L'électricité, au cœur de notre futur bas-carbone ». Il n'est pas conçu comme un document indépendant. Il complète les chapitres mentionnés ci-dessus.*

Ce texte regroupe les indicateurs opérationnels et environnementaux principaux des technologies de production décrites dans le livre. Les fourchettes de valeurs correspondent aux situations usuelles (et non à des cas exceptionnels) et ont surtout pour objet de donner des ordres de grandeur. Les performances techniques concernent les systèmes installés jusqu'en 2019.

**Indicateurs : définitions et explications des termes utilisés*****Fonctionnement***

*Puissance installée* : puissance électrique maximale qu'une tranche de production peut délivrer en fonctionnement normal - et non pas puissance d'une centrale entière, qui, elle, peut comporter plusieurs tranches (par exemple, plusieurs tranches pour une centrale au charbon, une centrale nucléaire, ou des centaines d'éoliennes).

*La puissance installée est exprimée en kW ou en MW.*

*Facteur de capacité* : le facteur de capacité, défini page 127 dans le chapitre d'introduction à la production d'électricité, est le rapport de la quantité d'électricité effectivement produite par la centrale pendant une période donnée, généralement un an, à la quantité qu'elle aurait produite si elle avait fonctionné à pleine puissance pendant cette même période, en l'occurrence les 8 760 heures d'une année. C'est donc un nombre sans dimension qui s'exprime usuellement soit comme un pourcentage, soit comme le nombre annuel d'heures pendant lesquelles la centrale aurait dû fonctionner à pleine puissance pour produire l'énergie effectivement produite. Dans le texte des indicateurs, on indique simplement le nombre d'heures sans rappeler chaque fois « à pleine puissance ».

*Production annuelle* : il s'agit de la production effective annuelle d'électricité pour une tranche typique. L'impact des conditions naturelles, météorologiques spécialement, est très marqué pour les productions solaires et éoliennes, dans une moindre mesure pour l'hydraulique mais aussi parfois pour les centrales thermiques.

*La production annuelle est exprimée suivant les cas en MWh, GWh ou TWh.*

*Variations de puissance* : elles sont imposées par la nature et/ou à la disposition de l'exploitant suivant les moyens de production.

*Les variations de puissance sont exprimées généralement en kW/minute ou MW/minute.*

*Rendement* : c'est le rapport entre l'électricité fournie par la tranche de production et l'énergie qu'elle a reçue (chaleur de combustion du charbon, énergie reçue du soleil par exemple).

*Le rendement est un nombre sans dimension donné en pour cent.*

**Impacts environnementaux**

*Usage de l'eau* : pour les tranches concernées, c'est la quantité d'eau utilisée<sup>1</sup>.

*L'usage de l'eau est mesuré en litres par kWh produit.*

*Impact au sol* : il s'agit de la surface occupée pour produire une quantité d'énergie en un an, ce qui intègre à la fois la puissance et la durée de fonctionnement<sup>2</sup>.

*L'impact au sol est mesuré ici en ha/TWh-an,*

*Démantèlement et retour au vert* : il se mesure en mois ou en années.

*Émissions de CO<sub>2</sub> en fonctionnement* : pour les centrales thermiques à combustion, ces émissions sont dominantes par rapport à celles de construction et de démantèlement. Pour les centrales renouvelables et pour l'énergie nucléaire, c'est l'inverse. Pour les centrales géothermiques, les deux situations sont possibles suivant le contenu CO<sub>2</sub> du fluide géothermique local.

Les émissions dues aux phases de construction et de démantèlement dépendent très fortement des circonstances locales pour chaque installation de production (les conditions de fabrication des équipements, celles des chantiers en début et fin de vie). Leur impact sur l'ensemble des émissions produites durant le cycle de vie total de la centrale dépend en outre de la durée de fonctionnement : cet impact est d'autant plus faible que la durée de fonctionnement est longue (20 ans pour un panneau solaire ou une éolienne, plus de 100 ans pour un barrage hydraulique, par exemple).

La contribution globale au contenu CO<sub>2</sub> du kWh des phases de début et de fin de vie est typiquement de l'ordre de 10 à 40 gCO<sub>2</sub>/kWh, l'hydraulique étant plutôt en bas de la fourchette, suivi par l'éolien, puis le nucléaire. Ceci est à comparer au contenu en fonctionnement du kWh des centrales thermiques fossiles qui se situent entre 330 gCO<sub>2</sub>/kWh pour les centrales à gaz les plus modernes et plus de 1 000 gCO<sub>2</sub>/kWh pour de nombreuses centrales à charbon en service.

*Les émissions de CO<sub>2</sub> sont exprimées en gCO<sub>2</sub>/kWh produit.*

**Indicateurs des centrales hydrauliques****Fonctionnement**

*Puissance installée* : de quelques dizaines de kW à 800 MW pour une turbine.

*Facteur de capacité* : de quelques dizaines de pour cent à près de 100 % pour certaines installations au fil de l'eau.

*Production électrique annuelle* : une tranche de 500 MW avec un facteur de capacité de 57 %, soit 5 000 heures, produit 2,5 TWh.

*Variations de puissance* : pour les centrales au fil de l'eau, puissance liée au débit de la rivière, faible voire pas de capacité de réglage possible ; pour les centrales à accumulation, modulation entre 0 et la puissance installée en quelques minutes.

*Rendement* : 90 % pour les centrales récentes.

**Impacts environnementaux**

*Usage de l'eau* : restituée intégralement ; instantanément (fil de l'eau) ou avec un décalage dans le temps (barrage). Un peu d'évaporation de l'eau des lacs de retenue en région chaude.

*Impact au sol* : faible pour le barrage lui-même et les installations électriques. Très variable selon le type et le lieu de la retenue.

---

<sup>1</sup> Pour certains moyens de production, la température de l'eau est aussi un indicateur important.

<sup>2</sup> Les ordres de grandeur sont utiles : la grande variabilité des valeurs d'un auteur à l'autre ne tient pas tant à la technologie qu'aux différences entre les sites, entre les situations foncières, ainsi qu'à la prise en compte (ou non) d'éléments telles que les surfaces utilisées en amont (extraction/préparation du combustible), les surfaces des voies de chemin de fer ou des tuyaux/convoyeurs d'amenée du combustible par exemple.

*Démantèlement/retour au vert* : rarement envisagé.

*Émissions de CO<sub>2</sub> en fonctionnement* : aucune.

### **Indicateurs des tranches au charbon**

#### ***En fonctionnement***

*Puissance installée d'une tranche* : de quelques MW à plus de 800 MW.

*Facteur de capacité* : jusqu'à 90 % (fonctionnement en base),

*Production annuelle* : une tranche de 1 000 MW avec un facteur de capacité de 91 %, soit 8 000 h/an, produit 8 TWh.

*Variations de puissance* : centrales utilisées généralement en base.

*Rendement* : de 30 à 46 % (pour des tranches mises en service en 2016).

#### ***Impacts environnementaux***

*Usage de l'eau* : restituée réchauffée si refroidissement par circuit ouvert, évaporée partiellement si refroidissement par circuit fermé (1,5 à 4 l/kWh environ), sans usage d'eau si refroidissement sec.

*Impact au sol* : environ 30 ha/TWh·an.

*Démantèlement/retour au vert* : environ 2 à 3 ans, si le sol n'est pas pollué.

*Émissions de CO<sub>2</sub> en fonctionnement* (sans CCS) : de 800 à plus de 1 100 gCO<sub>2</sub>/kWh, 975 gCO<sub>2</sub>/kWh pour un rendement de 38 % avec de l'antracite à 9 kWh/kg.

### **Indicateurs des tranches à gaz**

#### ***En fonctionnement***

*Puissance installée d'une tranche* : de quelques MW à 600 MW.

*Facteur de capacité* : généralement fonctionnement en semi-base pour suivre la charge globale, donc un facteur de capacité de 30 à 50 %, soit plusieurs milliers d'heures.

*Production annuelle* : une tranche de 600 MW avec un facteur de capacité de 46 %, soit 4 000 h/an, produit 2,4 TWh.

*Variations de puissance* : plusieurs dizaines de MW/min pour une turbine récente de 500 MW.

*Rendement* : de 30 à 63 % (pour des tranches à cycles combinés mises en service en 2018).

#### ***Impacts environnementaux***

*Usage de l'eau* : restituée réchauffée si refroidissement par circuit ouvert, évaporée partiellement si refroidissement par circuit fermé (0,6 à 1,9 l/kWh environ), sans usage d'eau si refroidissement sec.

*Impact au sol* : 10 ha/TWh·an

*Démantèlement/retour au vert* : 1 an environ.

*Émissions de CO<sub>2</sub> en fonctionnement* (sans CCS) : généralement en dessous de 400 gCO<sub>2</sub>/kWh, 320 gCO<sub>2</sub>/kWh pour une centrale de rendement 62 % brûlant du gaz à 14 kWh/kg.

### **Indicateurs des tranches nucléaires**

#### ***En fonctionnement***

*Puissance installée d'une tranche* : de quelques centaines de MW à 1 600 MW.

*Facteur de capacité* : 70 à 92 % (fonctionnement en base généralement).

*Production annuelle* : une tranche de 1 000 MW avec un facteur de capacité de 91 %, soit 8 000 h/an, produit 8 TWh.

*Variations de puissance* : centrales utilisées généralement en base mais certaines peuvent moduler leur puissance.

*Rendement* (du cycle thermodynamique) : entre 33 et 36 % pour les REP et les REB.

### ***Impacts environnementaux***

*Usage de l'eau* : restituée réchauffée si refroidissement par circuit ouvert, évaporée partiellement si refroidissement par circuit fermé (2,5 l/kWh environ), sans usage d'eau si refroidissement.

*Impact au sol* : 10-12 ha/TWh·an.

*Démantèlement/retour au vert* : 10 à 30 ans, voire plus selon les situations.

*Émissions de CO<sub>2</sub> en fonctionnement* : Aucune.

### **Indicateurs des éoliennes**

#### ***Fonctionnement***

*Puissance installée* : de quelques kW jusqu'à plus de 8 MW pour une éolienne.

*Facteur de capacité* : suivant les vents du site ; rarement au-dessus de 30 % à terre (2 630 h/an), plutôt 40 % en mer (3 500 h/an).

*Production annuelle* : une éolienne de 8 MW avec un facteur de capacité de 28,5 %, soit 2 500 h/an, produit 20 GWh ; une ferme éolienne de 400 MW sur ce même site produit 1 TWh.

*Variations de puissance* : liées au vent, en partie aléatoires.

*Rendement* (par rapport à l'énergie éolienne reçue) : 35 - 45 %.

#### ***Impacts environnementaux***

*Usage de l'eau* : aucun.

*Impact au sol* : typiquement au-dessus de 300 ha/TWh·an; toutefois le terrain reste utilisable pour certaines activités (agricoles par exemple).

*Démantèlement et retour au vert* : quelques semaines pour l'éolien terrestre.

*Émissions de CO<sub>2</sub> en fonctionnement* : aucune.

### **Indicateurs des tranches solaires thermodynamiques (CSP)**

#### ***Fonctionnement***

*Puissance installée d'une tranche* : de quelques dizaines à quelques centaines de MW.

*Facteur de capacité* : sans stockage intégré il est de l'ordre de 15 % ; il peut dépasser 50 % (4 380 h/an) si une capacité suffisante de stockage est intégrée à la centrale.

*Production annuelle* : en site très ensoleillé (2 500 kWh/m<sup>2</sup>·an ou plus), une centrale à concentration avec une turbine de 100 MW et une capacité de stockage de chaleur permettant de fonctionner 10 heures hors soleil à pleine puissance, peut atteindre un facteur de capacité de 46 % i.e. 4 000 h/an, et produire donc annuellement 0,4 TWh.

*Variations de puissance* : intermittence du rayonnement solaire lissable par du stockage.

*Rendement* (cycle thermodynamique) : environ 25 % au maximum, 15 % en moyenne.

#### ***Impacts environnementaux***

*Usage de l'eau* : analogue aux centrales thermiques à vapeur et nettoyage des héliostats.

*Impact au sol* : 60 - 125 kWh/m<sup>2</sup>·an (selon technologie, à tour ou cylindro-parabolique)

*Démantèlement et retour au vert* : en moins d'un an.

*Émissions de CO<sub>2</sub> en fonctionnement* : aucune.

## **Indicateurs des systèmes photovoltaïques**

### ***En fonctionnement***

*Puissance installée* : de quelques dizaines de W à quelques centaines de MW.

*Facteur de capacité* : de 10 à 30 % suivant l'ensoleillement du site ; peut augmenter par couplage avec du stockage (batteries).

*Production annuelle* :

- Sur un toit avec un ensoleillement de 1 500 kWh/m<sup>2</sup>·an, 10 m<sup>2</sup> de panneaux à 20 % de rendement produisent 3 MWh, hors pertes (typiquement 15 %).
- Une centrale de 100 MW<sub>crête</sub> avec un ensoleillement de 2 500 kWh/m<sup>2</sup>·an peut produire 0,25 TWh/an, hors pertes (typiquement 15 %).

*Variations de puissance* : liées à l'ensoleillement, en partie aléatoire. Les variations peuvent être lissées par du stockage (par batteries par exemple).

*Rendement* (par rapport à l'énergie solaire reçue) : 15 - 22 % pour des panneaux standards du commerce en 2020.

### ***Impacts environnementaux***

*Usage de l'eau* : nettoyage des panneaux plus ou moins fréquemment selon le lieu.

*Impact au sol* : 0 sur un toit, de l'ordre de 100 kWh/m<sup>2</sup>·an c'est-à-dire 1GWh/ha.an sur le sol.

*Démantèlement et retour au vert* : quelques semaines.

*Émissions de CO<sub>2</sub> en fonctionnement* : aucune.

## **Indicateurs des centrales géothermiques**

### ***Fonctionnement***

*Puissance installée* : quelques dizaines de kW à quelques dizaines de MW.

*Facteur de capacité* : dépend fortement du site ; généralement entre 60 et 90 %, soit entre 5 200 et 8 000 h/an.

*Production annuelle* : une tranche de 50 MW avec un facteur de capacité de 80 %, soit 7 000 heures, produit 0,35 TWh.

*Variations de puissance* : centrales utilisées en base.

*Rendement* (par rapport à la chaleur géothermique reçue) : 6 à 20 %.

### ***Impacts environnementaux***

*Usage de l'eau* : source froide et, pour les EGS, fluide d'alimentation.

*Impact au sol* : de l'ordre de 400 à 4 000 m<sup>2</sup>/GWh·an soit 40 à 400 ha/TWh·an sur le sol.

*Démantèlement et retour au vert* : quelques mois, sauf pollution particulière.

*Émissions de CO<sub>2</sub> en fonctionnement* : entre 13 et 380 g/kWh, dépendant fortement des caractéristiques locales et de la technologie.