

Exemples de calculs qui peuvent être demandés aux élèves de 3^{ème} :

Prenons **une commune d'île de France** (**zone nord** de la France) de **6 500 habitants** et d'une superficie de **14,25 km²**.

➤ Calculons tout d'abord la consommation annuelle d'énergie électrique de l'ensemble des habitants de la commune :

$$E_{1 \text{ hab}} = 7\,000 \text{ kWh / an donc } E_{\text{commune}} = 7\,000 \times 6\,500 = 45\,500 \text{ MWh / an.}$$

➤ Dans le cadre de la COP 21, 50 % de cette énergie électrique produite ne doit être ni nucléaire ni émettrice de GES donc doit être renouvelable. On choisit dans cet exemple l'éolien pour couvrir les 50 % de production d'énergie électrique pour les habitants de la commune.

➤ Déterminons ces 50 % d'énergie électrique qu'il faut produire pour les habitants de la commune chaque année grâce à des éoliennes :

$$E_{50\% \text{ commune}} = 50 \times 45\,500 / 100 = \mathbf{22\,750 \text{ MWh / an.}}$$

➤ Cherchons maintenant le nombre d'éoliennes nécessaires pour produire ces 22 750 MWh / an :

$$P_{\text{installée 1 éolienne}} = 2 \text{ MW} \quad \text{facteur de charge} = 16 \% \text{ (île de France)}$$

$$P_{\text{« réelle » 1 éolienne}} = 2 \times 16 \% = 0,32 \text{ MW}$$

Energie produite par 1 éolienne pendant 1 an :

$$E_{1 \text{ éolienne}} = P_{\text{« réelle » 1 éolienne} \times t = 0,32 \times 8\,760 = 2\,803 \text{ MWh}$$

avec $t = 1 \text{ an} = 8\,760 \text{ h}$

Nombre d'éoliennes nécessaires pour couvrir la moitié des besoins en énergie électrique des habitants de la commune :

$$E_{50\% \text{ commune}} / E_{1 \text{ éolienne}} = 22\,750 / 2\,803 = 8,12 \text{ donc } \mathbf{9 \text{ éoliennes}}$$
 pourraient suffire en théorie aux habitants de la commune.

➤ Calculons maintenant le coût moyen annuel de ces 9 éoliennes :

$$1 \text{ MWh}_{\text{production d'1 éolienne}} \Leftrightarrow 68 \text{ € (zone nord)}$$

$$22\,750 \text{ MWh} \quad \Leftrightarrow \quad p ? \quad p = 22\,750 \times 68 / 1 = 1\,547\,000 \text{ €.}$$

Le coût moyen annuel serait donc de **1 547 000 €.**

➤ Calculons enfin la superficie nécessaire pour implanter ces 9 éoliennes :

$$\text{Superficie pour 1 éolienne : } S_{1 \text{ éolienne}} = 1,1 \text{ km}^2$$

$$\text{Superficie nécessaire pour 9 éoliennes : } S_{\text{nécessaire}} = 9 \times 1,1 = \mathbf{9,9 \text{ km}^2}$$

La surface nécessaire aux éoliennes est de 9,9 km²/14,25 km² soit 70 % de la surface de la commune.

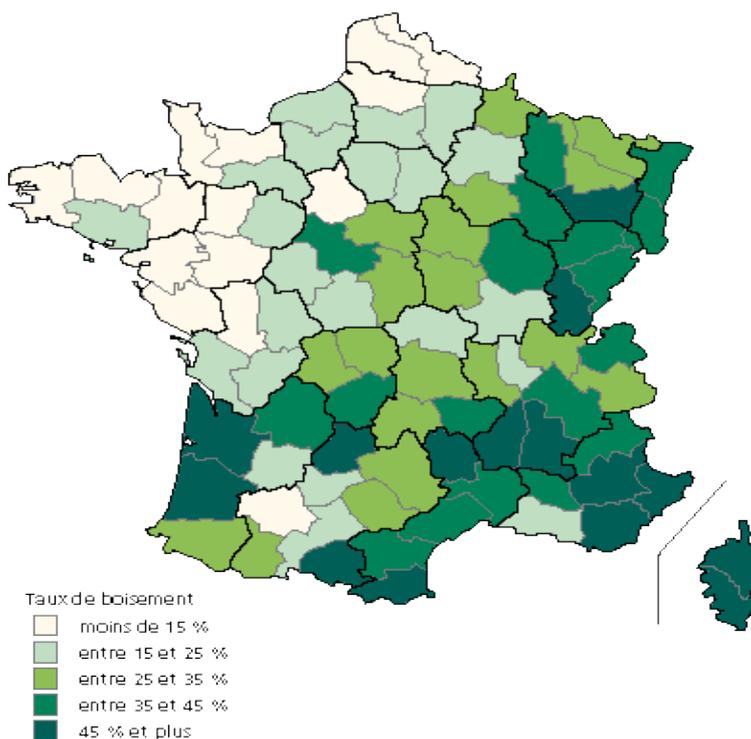


Caractéristiques de la production de biomasse en France métropolitaine

Réf. : *Observ'ER – CRE – EDF - APERE asbl - DATALAB, Ministère de l'environnement, de l'énergie eet de la mer, Chiffres clés des énergies renouvelables, Edition 2016 (02/2017)*

Région	Facteur de boisement	Taux de la consommation électrique	Puissance installée (MW)
Auvergne-Rhône-Alpes	34%		Est
Bourgogne-Franche-Comté	35%		Est
Bretagne	12%		Ouest
Centre-Val de Loire	25%		Ouest
Corse	50%		Sud
Grand Est	36%		Est
Hauts-de-France	15%		Nord
Île-de-France	20%		Nord
Normandie	12%		Nord
Nouvelle-Aquitaine	30%		Sud
Occitanie	33%		Sud
Pays de la Loire	11%		Ouest
Provence-Alpes-Côte d'Azur	43%		Sud
Total France			

Filières forêt-bois, agricoles, déchets, pêche, algues et aquaculture
8 760 heures par an





Coûts de production de l'électricité biomasse en France en 2015

Matière première	rendement	Pouvoir calorifique inférieur	PCI calculé	Pouvoir calorifique inférieur	PCI retenu	rendement PCI chaudière
Unité :	t/ha	MJ/kg	KWh/kg	KWh/kg	KWh/kg	%
bois de construction	2-4	12,6-18	4,25	3,5-5	4,5	80%
Bois de chauffage / taillis	7-12	10,80	3,00		3,0	80%
paille	3,1	14,3	3,97	4-4,7	4,0	80%
déchets urbains		7,77	2,16		2,2	

Matière première	Fourchette de coûts matière	cout matière	autre cout matière littérature	Cout matière retenu	cout investissement	Facteur de charge	Cout sur 20 ans	cout chaleur retenu
Unité :	Euro/t	Euro/MWh	euro/MWh	euro/MWh	Euro/kWe		Euro/MWh	Euro/MWh
bois de construction	15-25	6,94	15-25	10	3000-6300	90%	35	45
Bois de chauffage / taillis	15-25	10,42						
paille	35-38	7,81						
déchets urbains								

Type d'installation	surface	rendement	Pouvoir calorifique inférieur	Puissance thermique unitaire	rendement de conversion	Puissance électrique unitaire	Cout chaleur	Cout électricité	facteur de charge (8760h/an)
Unité :	m2	t/ha	KWh/kg	MW		MW	Euro/MWh	Euro/MWh	
forêt de 1ha + usine	10000	3	4	12	30%	3,6	45	150	90%

1 stère = 1 m³ empilé

renouvellement d'une forêt = 15-200 an

1 stère = 1,5-2 MWh

rendement de conversion 20 %-40 %

Usine EDF de Pécs en Hongrie :

Botte de paille. 35 MW électrique + chaleur

250 000 t de paille pour 60 % de l'énergie

+ 450 000 t de bois pour 60 %

Coût investissement 300 – 6 300 keuros/MWe

Coût approvisionnement matière 15 - 25 euros/MWh PCI



Caractéristique de l'éolien en France métropolitaine 2016

Réf. : « Global Wind Statistics 2016 », Global Wind Energy Council (GWEC), 10 février 2017
Réf. : « Global Wind Statistics 2016 », Global Wind Energy Council (GWEC), 10 février 2017

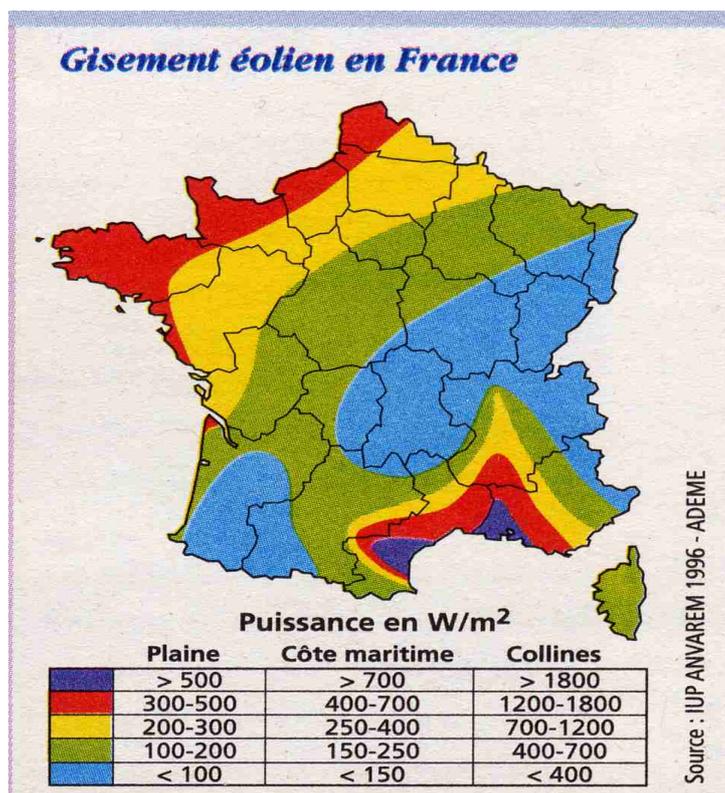
Région	Facteur de charge*	Taux de la consommation électrique	Puissance installée MW	
Auvergne-Rhône-Alpes	23,60%	1,30%	443	Est
Bourgogne-Franche-Comté	21,90%	3,60%	467	Est
Bretagne	18,90%	6,60%	913	Ouest
Centre-Val de Loire	20,40%	8,70%	951	Ouest
Corse	0,00%	1,50%	18	Sud
Grand Est	21,20%	10,70%	2 836	Est
Hauts-de-France	22,30%	9,50%	2 740	Nord
Île-de-France	16,30%	0,10%	43	Nord
Normandie	22,30%	4,10%	643	Nord
Nouvelle-Aquitaine	17,20%	2,10%	669	Sud
Occitanie	27,30%	7,00%	1 165	Sud
Pays de la Loire	20,90%	4,50%	733	Ouest
Provence-Alpes-Côte d'Azur	24,60%	0,30%	50	Sud
Total France	21,70%	4,31%	11 670	

* en grande majorité éolien terrestre standard

Surface au sol = 6 fois diamètre des pales.

Diamètre 2 MW : 80-125 m --> moyenne 100 m. Surface au sol $3,14 \times 600 \times 600 = 1\,130\,000 \text{ m}^2$

Emprise au sol = $2\,000 \text{ m}^2$





Coûts de production des éoliennes en France en 2017 (€/MWh)

8760 h/an

Type d'éolienne	Puissance unitaire	Surface nécessaire (distance entre 2)	Durée annuelle à pleine puissance	Durée annuelle moyenne	Facteur de charge relatif	Fourchette de coûts	Coûts avec taux d'actualisation de 5%	Coûts moyens	Facteur de charge	Surface par MWh/an
Unité :	MW	m2	heures	heures		euro/MWh	euro/MWh	euro/MWh		m2/MWh
éolien terrestre standard	2,3	1100000	1800-2400	2100	1	54 à 108	61 à 91	76	24%	524
éolien terrestre nouvelle génération ("éoliennes toilées")	2	1100000	2400-2700	2550	1,225	50 à 94	57 à 79	68	29%	431
éolien en mer posé	6,9	1100000	3500	3500	1,75	123 à 227	123 à 169	146	40%	314
éolien en mer flottant (projets)	6 à 8	1100000	4000	4000	2	165 à 364	165 à 281	223	46%	275
Valeur moyenne utilisée	2	1100000	2500	2550				68	29%	431

	Puissance installation unitaire MWc	Facteur de charge	Coût du MWh	Surface m2/MWh/an
EOLIEN				
Habitat				
Littoral		130%		
Montagne		90%		
Rivière		100%		
Campagne		85%		
Zone géographique				
Nord	2	26%	76	479
Ouest	2	26%	76	479
Est	2	33%	59	375



Caractéristiques de la production géothermique en France métropolitaine

Réf. : EDF - La géothermie en chiffres : <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/la-geothermie-en-chiffres>

Réf. : ADEME - site internet : <http://www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole/reduire-impacts/produire-utiliser-energies-renouvelables/energies-renouvelables-electriques/dossier/production-delectricite/geothermie>

Réf. : Ministère de l'environnement : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/geothermie>

Région	Facteur de charge	Taux de la consommation électrique	Puissance photo-voltaïque installée (MW)
Auvergne-Rhône-Alpes	4%	30%	Est
Bourgogne-Franche-Comté	17%		Est
Bretagne	0%		Ouest
Centre-Val de Loire	48%		Ouest
Corse	0%		Sud
Grand Est	37%	30%	Est
Hauts-de-France	28%		Nord
Île-de-France	57%		Nord
Normandie	11%		Nord
Nouvelle-Aquitaine	31%	30%	Sud
Occitanie	11%		Sud
Pays de la Loire	0%		Ouest
Provence-Alpes-Côte d'Azur	6%	10%	Sud

Total France

Echangeurs géothermiques verticaux,
applicables pratiquement partout
60 m² de profondeur pour chauffer 100 m² habitables
Mais que de la chaleur

Centrale géothermique électrique

pompage de l'eau d'une nappe phréatique à 150-350 °C.
et utilisation d'un fluide organique volatil (isobutane)
pour 90-150°C après remontée.

production électrique par la vapeur du fluide
de 10 à 30 MWh (fluide organique) et de 20 à 50 MWh
(vapeur d'eau)

Pas d'intermittence, mais zones géographique précises
en métropole, 20 euro/MWh

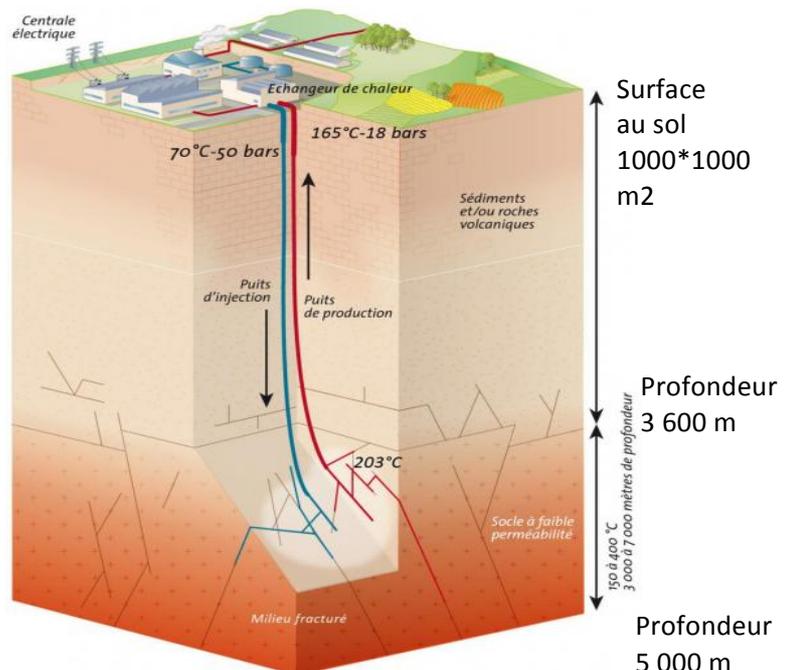
7000h/an = 80%

Centrale géothermique de Soultz-sous-Forêts

(image ©BRGM)

La seule en métropole. 2,1 MWe brut / 1,5 MW net
rendement 71%

Réf. <http://www.geothermie-perspectives.fr/article/centrale-egs-soultz-forets-alsace>

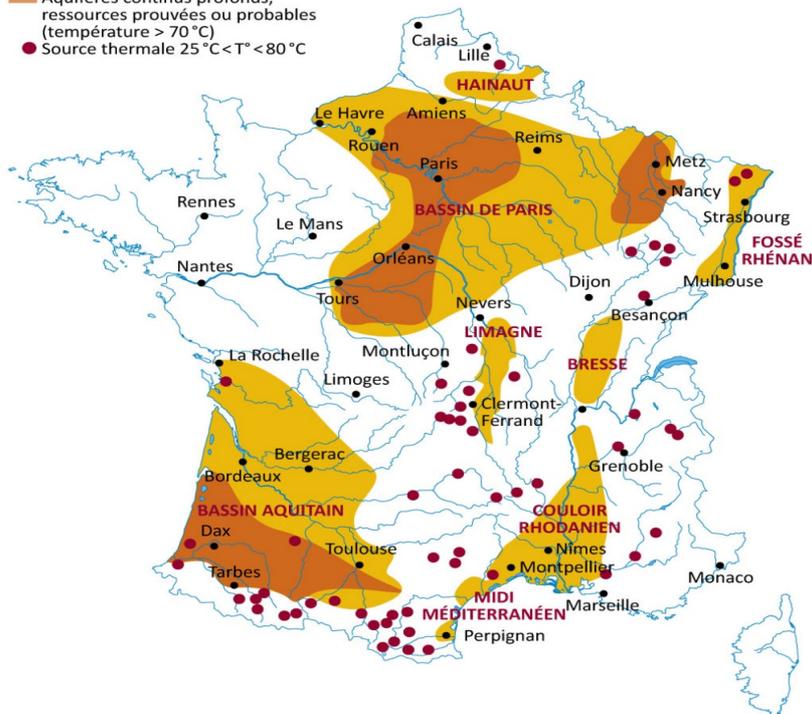




Le gisement géothermique français

source : BRGM

- Bassins sédimentaires profonds (aquifères continus)
- Aquifères continus profonds, ressources prouvées ou probables (température > 70 °C)
- Source thermique 25 °C < T° < 80 °C



Coûts de production géothermique en France en 2011

Type d'installation	Puissance unitaire	facteur de charge (8760h/an)	Fourchette de coûts (actualisation 8%)	Coûts moyens	Surface	Surface au sol	Surface par MWh
Unité :	MWé		euro/MWh	euro/MWh	m2	m2/KWc	m2/MWh/an
Centrale électrique	2	57%	59-97	78	2500	1	1

	Puissance installation unitaire MWc	Facteur de charge	Coût du MWh	Surface m2/MWh/an
GÉOTHERMIE				
Habitat	2	57%	78	1
Littoral		100%		
Montagne		100%		
Rivière		100%		
Campagne		100%		
Zone géographique				
Nord	0	0%	0	0
Ouest	0	0%	0	0
Est	2	57%	78	1
Sud	2	57%	78	1



Caractéristiques de la production hydraulique en France métropolitaine

Réf. : Syndicat des énergies renouvelables-juin 2012 (www.enr.fr)

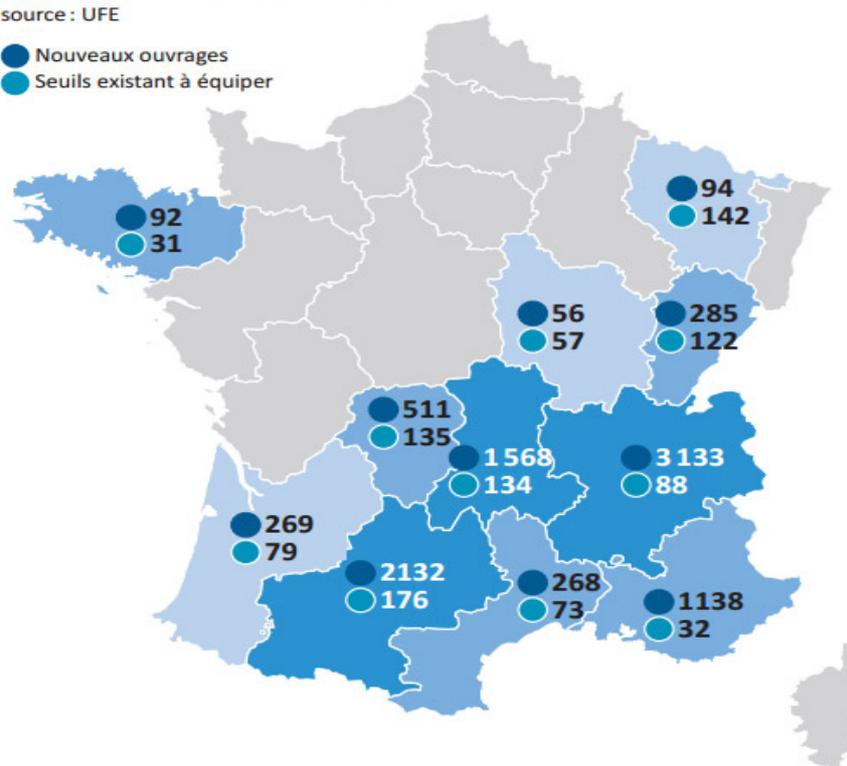
Réf.: ADEME - Entreprise agricoles -25/08/2017 (www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole)

Région	Facteur de charge (potentiel de construction)	Taux de la consommation hydroélectrique	Puissance hydraulique installée (MW)	
Auvergne-Rhône-Alpes	46,4%	45,50%	11590	Est
Bourgogne-Franche-Comté	4,9%	2,05%	522	Est
Bretagne	1,2%	1,09%	277	Ouest
Centre-Val de Loire	0,0%	0,37%	93	Ouest
Corse	0,0%	0,88%	223	Sud
Grand Est	2,2%	9,04%	2302	Est
Hauts-de-France	0,0%	0,02%	4	Nord
Île-de-France	0,0%	0,07%	19	Nord
Normandie	0,0%	0,20%	50	Nord
Nouvelle-Aquitaine	9,4%	6,92%	1 762	Sud
Occitanie	25,0%	21,17%	5 392	Sud
Pays de la Loire	0,0%	0,04%	9	Ouest
Provence-Alpes-Côte d'Azur	11,0%	12,67%	3228	Sud
Total France	35%	100%	25 471	

Potentiel hydroélectrique par région (GWh)

source : UFE

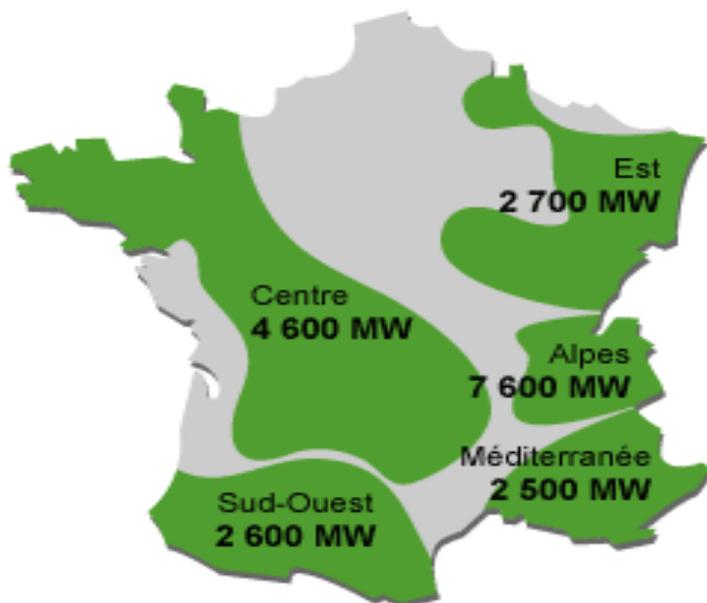
- Nouveaux ouvrages
- Seuils existant à équiper





Coûts de production de l'hydraulique en France en 2015

Type d'installation	Puissance unitaire	Fourchette de coûts	Coûts moyens	facteur de charge (8760h / an)	Production annuelle	Surface totale (m2)	Surface au sol	Surface par MWh/an
Unité :	MWc	€/MWh	€/MWh		GWh		m2/MWc	m2/MWh/an
petites centrales hydroélectriques PCH				35%	8760			
fil de l'eau fleuve	7,5	60-120	90	61%	0	188	25	0,005 surface du pont du barrage
fil de l'eau petite rivière	1	60-120	120	50%	0	30	30	0,007
retenue en montage	5	60-80	70	19%	0	1000	200	0,120 surface du Pied du barrage



Zones de production hydraulique EDF en France
(EDF 2013)

© EDF



Barrages du Rhône au fil de l'eau

Nom	Puissance (MW)	Production moyenne (GWh/an)	facteur de charge 8760 heures/an
Génissiat	420	1786	49%
Anglefort	90	487	62%
Brens-Virignin	90	453	57%
Brégnier-Cordon	70	324	53%
Pierre-Bénite	84	528	72%
Vaugris	72	332	53%
Sablons	160	885	63%
Gervans	120	668	64%
Bourg-lès-Valence	180	1082	69%
Beauchastel27	198	1211	70%
Logis-Neuf	215	1177	62%
Châteauneuf-du-Rhône	295	1575	61%
Donzère-Mondragon (Bollène)	348	2032	67%
Caderousse	156	843	62%
Avignon	126	543	49%
Beaucaire	210	1269	69%
		Moyenne	61%

Barrages de retenue de la Maurienne

Nom	Puissance (MW)	Production moyenne (GWh/an)	facteur de charge 8760 heures/an
Villarodin	364	580	18%
Aussois	78		0%
Combe d'Avrieux	120	290	28%
Orelle	62	170	31%
Bissorte 1	75	140	21%
Bissorte 2 (Super-Bissorte)		pompage-turb.	
Bissorte 3	150		0%
Saussaz II	140	410	33%
l'Échaillon	120	380	36%
Cheylasn 4	480	675	16%
		Moyenne	19%



Caractéristiques de la production nucléaire en France métropolitaine

Réf. : EDF cout des énergies en France
Réf. : Commission de régulation de l'énergie – 2013

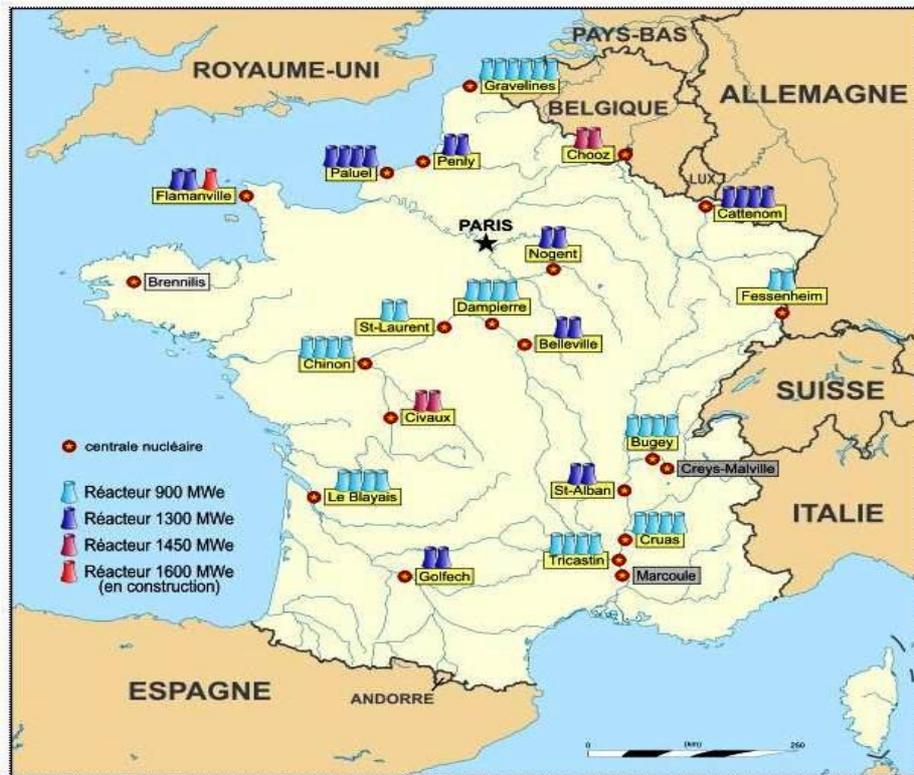
Région	Facteur de charge	Taux de la consommation électrique	Puissance nucléaire installée (MW)	
Auvergne-Rhône-Alpes	78%	21,80%		Est
Bourgogne-Franche-Comté	78%			Est
Bretagne	78%			Ouest
Centre-Val de Loire	78%	19,00%		Ouest
Corse	78%			Sud
Grand Est	78%	20,40%		Est
Hauts-de-France	78%			Nord
Île-de-France	78%			Nord
Normandie	78%			Nord
Nouvelle-Aquitaine	78%			Sud
Occitanie	78%			Sud
Pays de la Loire	78%			Ouest
Provence-Alpes-Côte d'Azur	78%			Sud

Total France

ne dépend pas de la situation géographique.

Réf: www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/carte-des-implantations/

Centrale	Surface en ha	Puissance en MWc	réacteur	Surface m2/MWc	Surface m2/MWh/an
Cruas	148	3600	900	411	0,06
Blayais	227	3600	900	631	0,09
Chinon	155	3600	900	431	0,06
Gravelines	150	5400	900	278	0,04
Fessenheim	106	1800	900	589	0,09
		Moyenne		437	0,06
Chooz	200	2900	1450		
Flamanville		2600	1300		
Golfech	200	2600	1300		
Nogent	212	2600	1300		



Coûts de production du nucléaire en France en 2013

Type d'installation	Puissance unitaire	Fourchette de coûts	Coûts moyens	facteur de charge (8760h/an)	Surface au sol	Surface installation
Unité :	MWc	€/MWh	€/MWh		m ² /KWc	m ²
Réacteur nucléaire 900	900		54,4	78%	0,06	58000



Récapitulatif des données par énergie, moyennées par région

Zones géographiques : la France est découpée en quatre zone (Voir carte)

Surface mobilisée : il s'agit de la surface nécessaire pour l'installation avec son périmètre d'isolement.

Facteur de charge : voir fiche En savoir plus

Pour la biomasse et la géothermie le facteur de charge est remplacé par la proportion surfacique des sources (forêts ou sources chaudes)

Source d'énergie	Puissance installation de référence (MWé)	Coût moyen du MWh produit (Euro)	Surface mobilisée par une installation (m2)	Facteur de charge (%)												
				Auvergne-Rhône-Alpes	Bourgogne-Franche-Comté	Bretagne	Centre-Val de Loire	Corse	Grand Est	Hauts-de-France	Île-de-France	Normandie	Nouvelle-Aquitaine	Occitanie	Pays de la Loire	Provence-Alpes-Côte d'Azur
Eolien	2	68	1 100 000	24%	22%	19%	20%	0%	21%	22%	16%	22%	17%	27%	27%	21%
Solaire	0,068	184	680	14%	13%	12%	13%	16%	12%	12%	10%	12%	15%	15%	13%	17%
Hydraulique	1	120		46%	5%	1%	0%	0%	2%	0%	0%	0%	9%	25%	0%	11%
Nucléaire	900	54	58 000	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%	78%
Géothermie	2	78	2 500	4%	17%	0%	48%	0%	37%	28%	57%	11%	31%	11%	0%	6%
Biomasse	3,6	150	10 000	34%	35%	12%	25%	50%	36%	15%	20%	12%	30%	33%	11%	43%

LES NOUVELLES RÉGIONS MÉTROPOLITAINES



* Collectivité territoriale à statut particulier



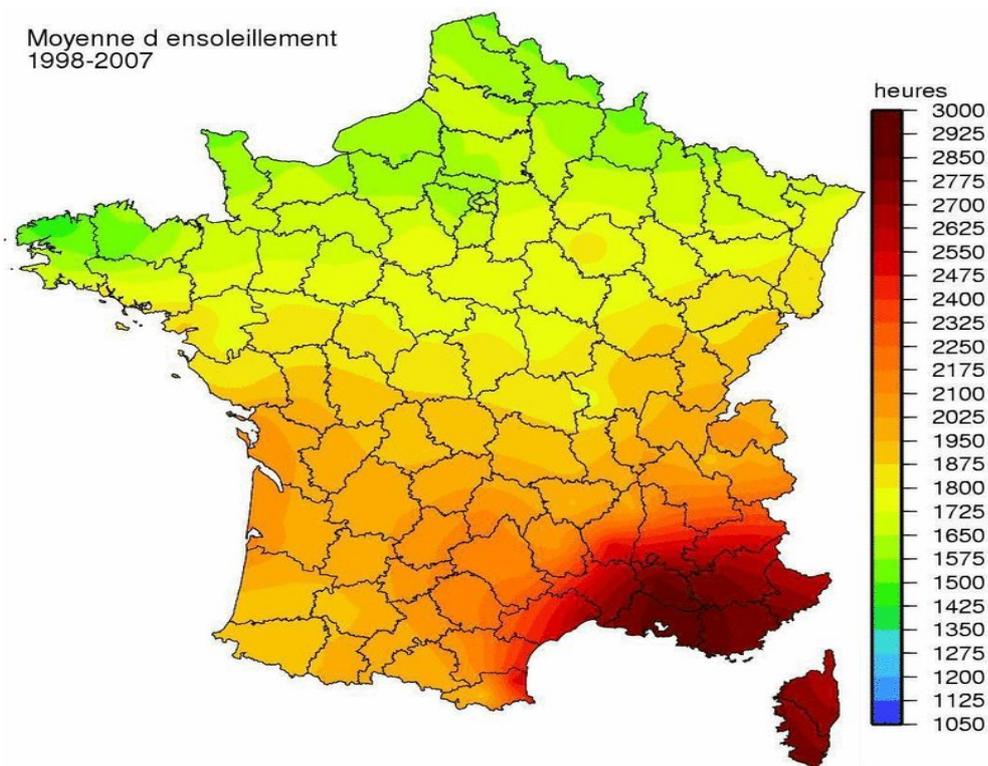
Caractéristiques de la production d'énergie solaire en France métropolitaine 2016

Réf. : Solaire, RTE - Bilan électrique 2016.

Région	Facteur de charge	Taux de la consommation électrique	Puissance photo-voltaïque installée (MW)	
Auvergne-Rhône-Alpes	13,50%	1,20%	703	Est
Bourgogne-Franche-Comté	12,80%	1,00%	196	Est
Bretagne	12,20%	0,88%	190	Ouest
Centre-Val de Loire	13,20%	1,30%	217	Ouest
Corse	15,70%	7,10%	116	Sud
Grand Est	12,10%	1,00%	445	Est
Hauts-de-France	12,10%	0,25%	129	Nord
Île-de-France	9,70%	0,10%	84	Nord
Normandie	12,00%	0,44%	123	Nord
Nouvelle-Aquitaine	15,00%	5,10%	1 734	Sud
Occitanie	14,80%	4,90%	1 478	Sud
Pays de la Loire	12,70%	1,60%	413	Ouest
Provence-Alpes-Côte d'Azur	16,80%	3,20%	945	Sud
Total France	14,30%	1,70%	6 772	

Surface m² / KWc 10

Moyenne d ensoleillement
1998-2007





Coûts de production du photovoltaïque en France en 2015

Type d'installation	Puissance unitaire	Productivité	Fourchette de coûts	Coûts avec taux d'actualisation de 5%	Puissance installation	Surface installation	Coûts moyens	Facteur de charge (8760h/an)	Facteur de cout du MWh	Surface au sol
Unité :	kWc	kWh/kWc	€/MWh	€/MWh	MWc	m2	€/MWh			m2/ KWc
résidentiel - Nord	0-3	950	229 à 407	266 à 326	0,0015	15	296	11%	2,38	10
commercial-industriel - Nord	36-100	950	145 à 246	168 à 199	0,068	680	184	11%	1,47	
centrales au sol - Nord	>250	1045	100 à 167	116 à 135	0,25	2500	126	12%	1,01	
résidentiel - Sud	0-3	1400	155 à 276	181 à 221	0,0015	15	201	16%	1,61	10
commercial-industriel - Sud	36-100	1400	98 à 167	114 à 135	0,068	680	125	16%	1,00	
centrales au sol - Sud	>250	1540	64 à 113	74 à 92	0,25	2500	83	18%	0,67	

SOLAIRE	Puissance installation unitaire MWc	Facteur de charge	Coût du MWh	Surface m2/MWh/an
Habitat				
Littoral		100%		
Montagne		90%		
Rivière		100%		
Campagne		100%		
Zone géographique				
Nord	0,07	11%	181	10
Ouest	0,07	13%	159	9
Est	0,07	13%	159	9
Sud	0,07	16%	124	7