



## Défis et Enjeux de la Transition Energétique : Cas de la France

*Session ATMA – 19 Mai 2026*



Energy Transition : Issues and Challenges – ATMA May 2026 | 1

## Agenda

### ▪ Défis et Enjeux de la Transition Energétique

- Réductions des Energies Primaires pour atteindre la Neutralité Carbone en 2050 : Cas de la France
- Substitution Energie Fossile → Electrique : Energies Renouvelables et Nucléaire
- Etude de Cas – Scénario RTE 2050 : l'impasse du Mix Energétique 100 % ENR
- Synthèse



Energy Transition : Issues and Challenges – ATMA May 2026 | 2

## Défis et enjeux de la Transition Energétique

- La Neutralité Carbone en 2050 implique que 80 % des énergies primaires consommées dans le monde, actuellement fossiles & non-renouvelables, vont devoir être remplacées des énergies non-fossiles, décarbonées et raisonnablement pilotables

- Cas de la France :**

Consommation d'Energie Primaire en 2024 (TWh)

Notes :

- Total énergies fossiles = 24.6 TWh / 17.4 GW
- Total production électrique = 548 TWh / 155.5 GW
- Total CO<sub>2</sub> = 11.7 Mt ⇔ 22 g CO<sub>2</sub> / kWh
- A rajouter : la consommation de la biomasse (bois, environ 116 TWh pour le chauffage) et autres ENR (biogaz, biocarburants, géothermie, ..., 66 TWh) ≈ 182 TWh, toutes énergies renouvelables pilotables
- Dont 123 TWh vendu au titre de l'ARENH et représentant un coût de 5.16 Md €
- Ces tarifs avec Obligation d'Achat ont représenté un coût additionnel de 6.08 Md €



**CarbonFree Energy**  
**BIAGEM CONSULTING**

Electrical Power Generation w/o Fossil Fuels (1)		Natural Gas	Crude Oil and Refined Products	Total (4)
Nuclear (61.4 GW) (5)	362	37,6 GSm3 ⇔ 26,6 Mt	68,1 Mtep Crude oil : 45,6 Products : 22,5	
Hydroelectric (25.7 GW)	76,5			
<b>Sub-total</b>	<b>438,5</b>	13.6 MWh / t in average on LHV basis (includes NG used in power plants)	11.7 MWh / t in average on LHV basis (includes fuel oil used in power plants)	
Wind (24,4 GW)	46,5			
Solar PV (24,3 GW)	24,3			
Bio-energies (2.3 GW)	12,8			
<b>Sub-total ENR (6)</b>	<b>83,6</b>			
<b>Total</b>	<b>522 (2)</b>	<b>362</b>	<b>801</b>	<b>1 685</b>
<b>Contribution</b>	<b>32,2%</b>	<b>18,2%</b>	<b>49,6%</b>	<b>100,0%</b>
<b>CO<sub>2</sub>eq Emissions on Life Cycle basis (Mtpa)</b>	<b>11,7 (3)</b>	<b>89</b>	<b>242</b>	<b>342</b>

Sources : SDES (Bilan énergétique France 2024) et RTE

Energy Transition : Issues and Challenges – ATMA May 2026 | 3

## Défis et enjeux de la Transition Energétique

- Vers une réduction drastique de la consommation française d'Energies Fossiles ?**

- Plusieurs scénarii envisageables pour atteindre cet objectif par exemple la combinaison suivante :
  - Diminution de 50 % de la consommation des produits pétroliers raffinés (61 Mtep en 2024) dont la demande en gazole, essence et de tous les carburants routiers (part gazole = 70 %, ce qui suppose notamment l'électrification totale du parc des voitures et VUL), en fioul domestique, kérosène (remplacé par des SAF) ⇔ économie d'énergie de 30 Mt ⇔ 360 TWh ⇔ - 105 Mtpa d'émissions de CO<sub>2</sub>  
 À compenser par des nouveaux besoins en énergie électrique mais pas équivalents en termes de consommation d'énergie :
    - pour le transport routier voitures et VUL : meilleur rendement à la roue d'un véhicule électrique (VE) permettant un gain en efficacité énergétique avec facteur 2.5 => énergie effectivement transférée pour le remplacement de 20 Mt (250 TWh) de carburants routiers ≈ 100 TWh
    - Pour le fioul domestique, la pétrochimie (base) et autres produits (10 Mt ⇔ 120 TWh, le gain e efficacité énergétique sera globalement plus faible i.e. facteur 1.5 => énergie électrique transférée ≈ 80 TWh
  - Remplacement du chauffage au gaz naturel utilisé par le Secteur Résidentiel Commercial – Tertiaire qui représente près de 50 % de la consommation en gaz naturel (362 TWh) systématiquement par des pompes à chaleur (PAC) ⇔ économie d'énergie de 180 TWh  
 Mais la compensation bénéficie aussi d'un gain en efficacité énergétique avec facteur 3 => énergie effectivement transférée = 60 TWh ⇔ - 44 Mtpa
- Total réduction énergie primaire fossile = 360 + 180 = 540 TWh ⇔ - 46 % ⇔ - 150 Mtpa CO<sub>2</sub> (- 45 %)**
- Nouveaux besoins en énergie électrique décarbonée = (100 + 80) + 60 = 240 TWh (+ 46 %)**



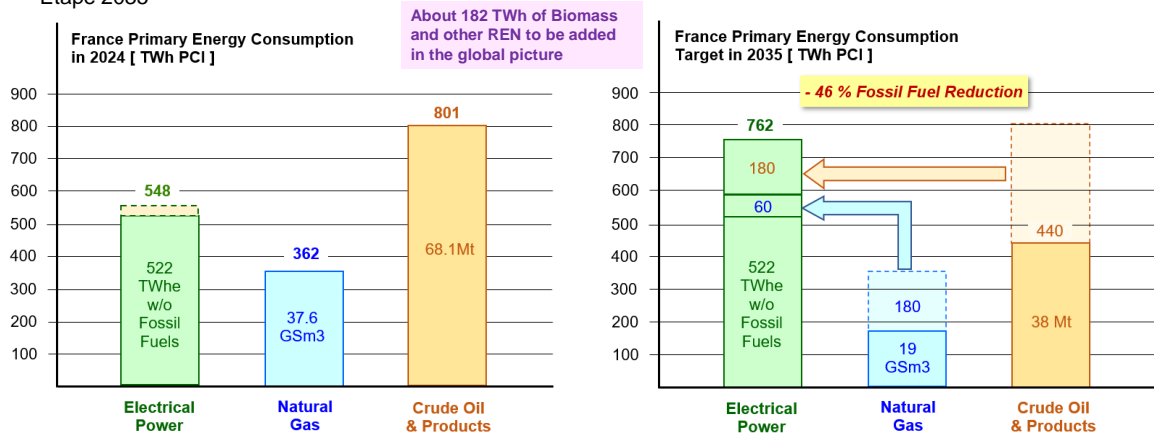
**CarbonFree Energy**  
**BIAGEM CONSULTING**

Energy Transition : Issues and Challenges – ATMA May 2026 | 4

## Défis et enjeux de la Transition Energétique

### ▪ Vers une réduction drastique de la consommation française d'Energies Fossiles ?

- Etape 2035



CarbonFree Energy  
BIAGEM CONSULTING

La Substitution Energie Fossile → Energie Electrique s'effectue avec un gain en efficacité énergétique important

Energy Transition : Issues and Challenges – ATMA May 2026 | 5

## Défis et enjeux de la Transition Energétique

- **D'autres efforts considérables devront encore être faits** pour atteindre la neutralité carbone en 2050 et toute une gamme d'actions devra être mis en œuvre de façon complémentaire, en interaction (cohérence globale) et en dégageant des synergies dans le développement de nouvelles architectures et technologies
  - Réduction globale des besoins énergétiques
  - Utilisation de tous les gisements d'efficacité énergétique : industrie, résidentiel-commercial-tertiaire
  - Décarbonation de l'industrie et de la production de matières premières par capture et séquestration de CO2 (CCUS)
  - Décarbonation / dé-fossilisation dans le Secteur des Transports : ferroviaire, maritime, aérien avec notamment production d'e-fuels (substitution énergie fossile → électrique)



CarbonFree Energy  
BIAGEM CONSULTING

Energy Transition : Issues and Challenges – ATMA May 2026 | 6

## Défis et enjeux de la Transition Energétique

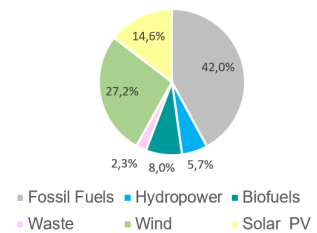
### ▪ Accroissement de la production d'énergie électrique

- Demande supplémentaire = 240 TWh d'électricité bas carbone
- Question : peut-on répondre à cette demande uniquement par des Energies Renouvelables ?
  - En considérant un facteur de charge moyen des ENR de l'ordre de 20 % (projection de l'Allemagne en 2025, 20,2 % en 2020 en considérant toutes les ENR dont l'hydro électrique et la biomasse, le facteur de charge moyen de l'ensemble des ENR (éolien + solaire) n'étant que 17 %)
  - **Puissance ENR additionnelle requise** =  $(240\ 000 / 8\ 760) / 0.20 = 27.4 / 0.20 = 137\ \text{GW}$
  - Puissance ENR en France en 2024 = 48.7 GW (éolien + solaire) + 25.7 GW (hydroélectrique) + 2.3 (biomasse) = 76.7 GW
  - Mais puissance ENR réellement augmentable, l'hydroélectrique étant presque saturé : 51 GW
  - Facteur d'accroissement des ENR =  $137 / 51 = 2.7$
  - Nouveaux besoins en ENR sur 10 ans (2025 → 2035) : environ + 14 GW par an

#### Exemple de l'Allemagne : Production Nette d'électricité en 2024 :

- Total Toutes Energies = 503 TWh pour 270 GW
- Total Pilotables (Lign., Charb., NG) = 192 TWh (38 %) pour 99 GW
- Total ENRi = 216 TWh (43 %) pour 152 GW (70 éolien / 82 solaire)
- Total ENR = 288 TWh (57 %) pour 173 GW
- Emissions CO2 en 2023 : 194 Mt / 511 TWh => 380 g CO2 / kWh

Net Electric Power Production in Germany - 2024



**CarbonFree Energy**  
BIAGEM CONSULTING

Energy Transition : Issues and Challenges – ATMA May 2026 | 7

## Défis et enjeux de la Transition Energétique

### ▪ Accroissement de la production d'énergie électrique

- Demande supplémentaire = 240 TWh d'électricité bas carbone
- Equivalence des Moyens en Energies Renouvelables
  - Tout en éolien offshore : facteur de charge moyen = 40 % (40 % en Allemagne en 2020)  
Puissance requise = 68 GW  
⇔ 8 600 éoliennes de 8 MW  
⇔ 130 – 136 projets type Saint-Brieuc / Fécamp (500 MW) ou Saint-Nazaire (480 MW)
  - Tout en éolien onshore : facteur de charge moyen = 23 % (21 % en Allemagne en 2023)  
Puissance requise = 119 GW  
⇔ 48 000 éoliennes de 2.5 MW (espacement de 500 m)  
⇔ 12 000 km<sup>2</sup> (carré de 110 km) ⇔ Région Ile-de-France (12 000 km<sup>2</sup>)
  - Tout en solaire PV : facteur de charge moyen 12 % (9 % en Allemagne en 2023)  
Puissance requise = 228 GW  
⇔ 1 940 km<sup>2</sup> (carré de 44 km)  
⇔ 760 projets de la taille de Cestas (300 MW) ou 450 projets de la taille de Nunez de Balboa (500 MW)
- Est-ce économiquement réalisable et socialement acceptable ?
- Et techniquement, la gestion de l'intermittence demandera encore plus de moyens (stockage, et/ou énergie pilotable)



**CarbonFree Energy**  
BIAGEM CONSULTING

Energy Transition : Issues and Challenges – ATMA May 2026 | 8

## Défis et enjeux de la Transition Energétique

### ▪ Accroissement de la production d'énergie électrique

- Demande supplémentaire = 240TWh d'électricité bas carbone
- Quid de l'énergie nucléaire (encore plus bas carbone que l'éolien et le solaire PV) ?
  - Facteur de charge moyen = 90 % (nouveaux réacteurs de 3<sup>ème</sup> génération)  
Puissance requise = 30 GW  
⇔ 18 réacteurs EPR type Flamanville (1.65 GW)
  - Mais la construction de 18 réacteurs en 15 ans sur la période de 2020 – 2035 (au moins 1 nouveau réacteur mis en service chaque année) n'est pas réaliste
  - Cependant, l'accélération du développement des réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération selon les critères de l'IAEA, pourrait permettre dès 2035 la construction et la mise en service d'un grand nombre de réacteurs de petite capacité et de structure modulaire (Small Modular Reactors) produits industriellement par des chaînes de construction avec des économies d'échelle importantes : projets Hexana (sels fondus, neutrons rapides, 400 MW) et Stellaria du CEA, Nuward (170 MW, PWR) d'EDF  
Parmi les SMR, il convient de noter le fort retour de la technologie des réacteurs à sels fondus et neutrons rapides (MSFR) qui présente une sécurité intrinsèque > celle la filière PWR, sans produire les déchets « longs » de cette filière et, au contraire avec une capacité de retraitement
- **Mais un frein majeur : la faible acceptation sociétale de l'énergie nucléaire en Europe** (dont plusieurs plans nationaux de sortie du nucléaire) => **nouveau défi**



**CarbonFree Energy**  
BIAGEM CONSULTING

Energy Transition : Issues and Challenges – ATMA May 2026 | 9

## Défis et enjeux de la Transition Energétique

- **Synthèse** : Atteindre l'objectif d'une Neutralité Carbone en 2050 – et donc en moins de 30 ans – en termes de consommation d'énergies primaires
  - **Ne pourra pas être atteint en simplement remplaçant les énergies fossiles par des énergies renouvelables** même en tenant compte d'importants gains d'efficacité énergétique lors de la substitution. Plusieurs freins :
    - Investissements considérables
    - Taux de croissance incompatible avec les objectifs sur la période de 30 ans
    - Acceptation sociétale déclinante (depuis 2019, éolien terrestre en particulier)
  - Un nouveau développement de l'énergie nucléaire (arrêté en UE pendant 20 ans) sera tout aussi difficile pour les mêmes raisons. Toutefois, l'avènement de réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération pourrait résoudre en partie ces problèmes
  - Et donc, durant ces 30 ans et dans une approche transitoire, en plus des efforts réalisés pour :
    - La réduction de la demande d'énergies primaires (meilleurs usages, efficacité énergétique active et passive, ...)
    - La réduction des émissions de CO2 des Industries par CCUS
    - la substitution partielle énergie fossile → énergie électrique
  - **Certaines énergies fossiles seront encore nécessaires – surtout le gaz naturel** – et pourront être un allié de la Transition Energétique à condition que leur utilisation conduise à des produits bas carbone e.g. hydrogène (matière et vecteur énergétique), carburants de synthèse (GTL) ... complétant les e-fuels



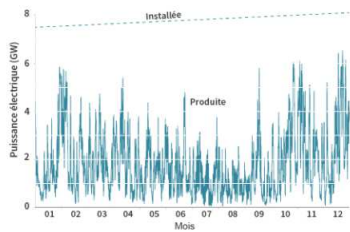
**CarbonFree Energy**  
BIAGEM CONSULTING

Energy Transition : Issues and Challenges – ATMA May 2026 | 10

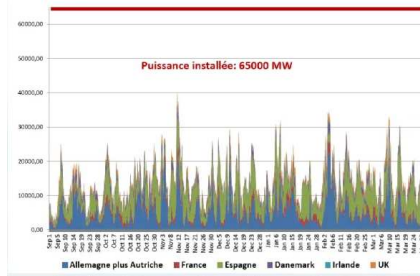
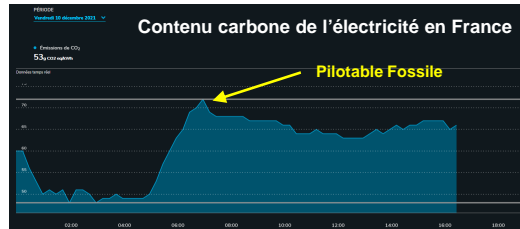
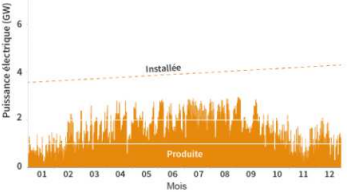
## Etude de Cas : Limitations d'un mix énergétique 100 % ENR

- Le problème de l'intermittence et du stockage de l'énergie renouvelable

Puissance éolienne en 2013 - France



Puissance solaire en 2013 - France



Puissance injectée sur le réseau par le parc éolien Européen – Sept 2011 → Mars 2012 : pas de foisonnement

- Peut-on stocker cette énergie électrique des ENR afin de pallier leur intermittence et lisser leur profil de production ?



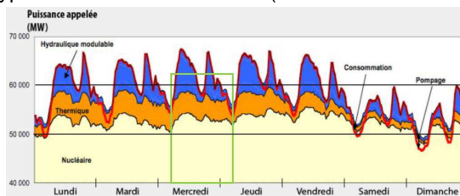
## Etude de Cas : Limitations d'un mix énergétique 100 % ENR

- France en 2050 – Hiver

- Cas RTE 2050 - Eneraies Renouvelables Uniquement et Consommation Annuelle de 650 TWhe

	Unit	Solar PV	Offshore Wind	Onshore Wind	Total iREN	Hydro-Electric	Other	Total	No iREN - All Nuclear
Share in Energy Mix		36%	31%	21%	88%	9%	3%	100.0%	88.0%
Energy Contribution	TWhe	234.0	201.5	136.5	572	58.5	19.5	650	572
Load Factor		16%	45%	23%		95%	30%		90%
Operating Time	hours	1,402	3,942	2,015		8,322	2,628		7,884
Required Power	GW	167.0	51.1	67.7	286	7.0	7.4	300	73

- Profil type d'une semaine en Hiver (540 TWhe consommation totale en 2019)



En extrapolant à 650 TWhe :

- Consommation moyenne = 1.8 TWhe sur l'année
- Puissance moyenne requise en hiver = 75 GW
- Puissance de pointe = 82 GW



## Etude de Cas : Limitations d'un mix énergétique 100 % ENR

### France en 2050 – Hiver

- Scénario météo défavorable : pas de vent (ou vent < 5 m/s) => pas d'énergie éolienne, forte nébulosité (8 octats) sur toute la France => énergie solaire PV réduite à 10 % de sa capacité nominale (hypothèse optimiste)

	Unit	Solar PV	Offshore Wind	Onshore Wind	Total iREN	Hydro-Electric	Other	Total
Available Power	GW	16.7	0.0	0.0	16.7	0.0	7.4	24.1
Daily Operation	hours	8	24	24		24	24	
Daily produced Energy	GWhe	134	0	0	134	0	178	312

Il manque donc :

- 1.48 TWhe par jour
- 50 GW en moyenne
- 57 GW en pointe

### Et ces mauvaises conditions durent 5 jours => 7.40 TWhe à trouver

- Vers une solution STEP ?
  - Pour une hauteur de chute de 100 m, l'énergie potentielle récupérable maximale = 0.275 kWh / m3 eau
  - Pour 500 m et rendement de 70 %, on récupère effectivement 0.963 kWh
  - Sur cette base, il faudrait donc pouvoir disposer de 7 680 Mm3 turbinable ⇔ réservoir 10 km diamètre x 100 m profondeur

### Combien de barrages Grand'Maison ?

- 132 Mm3 de volume utile / 900 m de hauteur de chute => 2.23 kWh en simple turbinage (90 % rendement des Pelton)
- 0.294 TWhe récupérable ... **une fois**

Il faudrait pouvoir disposer de 30 « équivalent Grand'Maison » en énergie hydroélectrique pour passer cette semaine mais en fait 41 unités pour faire aussi face à la pointe de 81 GW entre 18H00 et 21H00 (puissance énergie solaire = 0 GW)



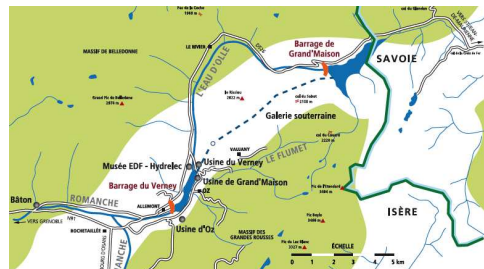
CarbonFree Energy  
BIAGEM CONSULTING

## Etude de Cas : Limitations d'un mix énergétique 100 % ENR

### Caractéristiques du barrage STEP de Grand'Maison

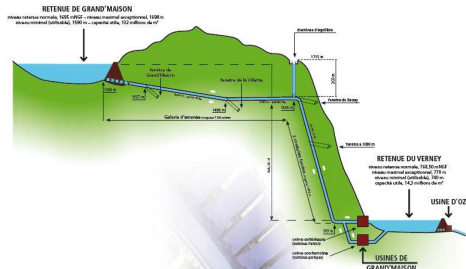
- Le plus grand barrage STEP d'Europe avec une capacité de 1.80 GW et mis en service en 1987 après 7 ans de construction (1978 – 1985)

STEP = Système de Transfert d'Energie par Pompage



Quelques données caractérisant Grand'Maison :

- Volume d'eau stocké : 140 Mm3 et 132 Mm3 utile au niveau de Grand'Maison
- Volume de la retenue du Verney : 15 Mm3
- Hauteur de chute : 900 m
- 9 % de la puissance du parc hydroélectrique français (25 GW dont 4.94 GW fournis par 6 principales STEP)



CarbonFree Energy  
BIAGEM CONSULTING

## Etude de Cas : Limitations d'un mix énergétique 100 % ENR

### ▪ Peut-on augmenter notre capacité d'énergie hydroélectrique?

- Avantage : Energie renouvelable **et pilotable, mobilisable rapidement (quelques secondes)**
- Cependant, les réserves d'eau des lacs de barrage peuvent vite être épuisées : un barrage fonctionne 1 000 – 2 000 heures par an
- Une installation STEP – en utilisant les ENRi (éoliennes, solaire) en excès de production – peut être utilisée plus intensément
- La France dispose de 4.94 GW réparties en 6 STEP et la production d'énergie hydroélectrique a été de 71 TWh en 2024 pour une puissance installée de 25.6 GW

Massif	Superficie (km2)	Précipitations annuelles (mm)	Hauteur moyenne de chute (m)	Energie potentielle max (TWh)	Energie électrique max (TWh)
Rhone Alpes	44 000	1 000	1 500	180	144
Reste Massif Central	20 000	1 200	1 000	65	52
Pyrénées	50 000	1 000	1 000	136	109

- Mais le potentiel théorique de récupération d'énergie électrique par récupération des eaux de précipitation est limité
  - 381 TWh en énergie potentielle
  - 305 TWh en énergie électrique
- Compte de l'expérience actuelle européenne (500 TWh effectivement produits sur un potentiel de 1 220 TWh, soit un ratio de 40 %), la France pourrait « espérer » un maximum de 120 TWh => doublement de la production actuelle
- **Il faudrait donc construire 10 Grand'Maison supplémentaires** (en supposant que cela soit techniquement faisable en termes d'opportunités topologiques dans nos montagnes) ... **et cela ne sera pas suffisant ... et très difficile à réaliser compte tenu de très fortes oppositions sociétales**



**CarbonFree Energy**  
BIAGEM CONSULTING

Energy Transition : Issues and Challenges – ATMA May 2026 | 15

## Etude de Cas : Limitations d'un mix énergétique 100 % ENR

### ▪ Déjà de nombreuses catastrophes en Europe

- Rupture du barrage de Malpasset et destruction de la ville de Fréjus en 1959 (423 morts)
- Rupture du barrage de Vajont et destruction de Longarone en 1963 en Italie (1 900 morts)

### ▪ Des résistances à la construction de barrages

- Lac de Tignes (1946 – 1952) de 3.2 km2 – évacuation et engloutissement du village malgré l'opposition de ses habitants
- Le fiasco du lac de barrage de Sivens, destiné à l'irrigation et dont l'impact était très limité : submersion de seulement 12 ha pour un volume utilisable de 1.5 Mm3 ; Le projet est annulé en 2015 suite à une manifestation tragique en 2014

- **D'une manière générale, la construction de nouveaux barrages pose de nombreux problèmes écologiques et environnementaux**



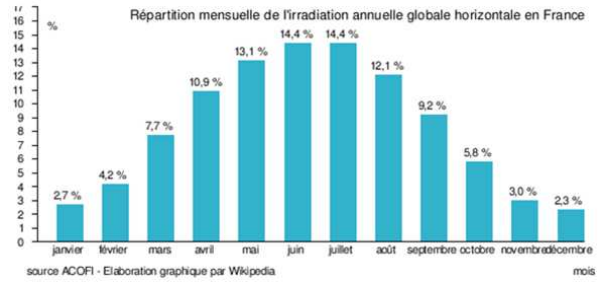
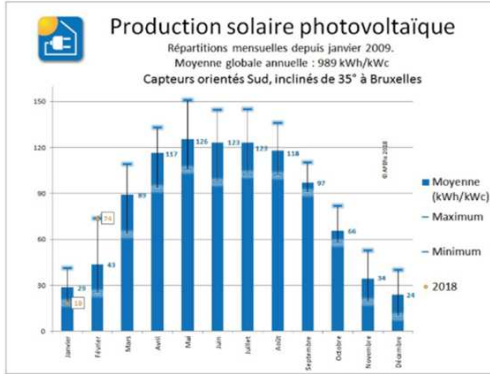
**CarbonFree Energy**  
BIAGEM CONSULTING

Energy Transition : Issues and Challenges – ATMA May 2026 | 16

## Etude de Cas : Limitations d'un mix énergétique 100 % ENR

### ▪ L'intermittence multiple de l'énergie solaire

- Impact de la saison : Bruxelles et France en moyenne sur l'ensemble du territoire



Facteur de charge moyen = 11.3 %



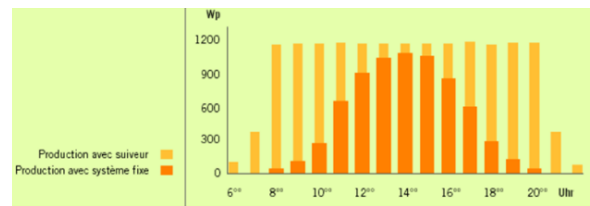
**CarbonFree Energy**  
**BIAGEM CONSULTING**

Energy Transition : Issues and Challenges – ATMA May 2026 | 17

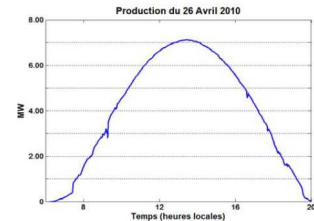
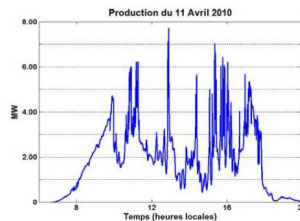
## Etude de Cas : Limitations d'un mix énergétique 100 % ENR

### ▪ L'intermittence multiple de l'énergie solaire

- Variation journalière : la classique courbe en cloche



- Les observations : cas du projet démonstrateur MYRTE en Corse (3 700 m<sup>2</sup> / 560 kWc / 700 Mwh par an)



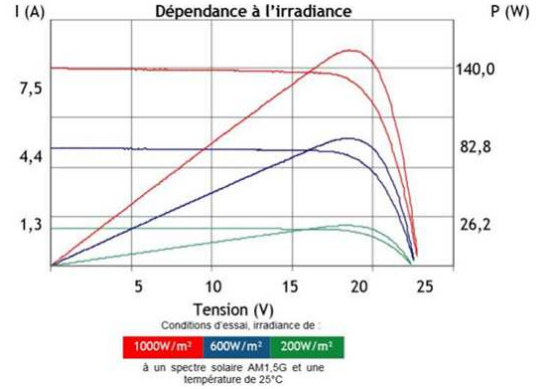
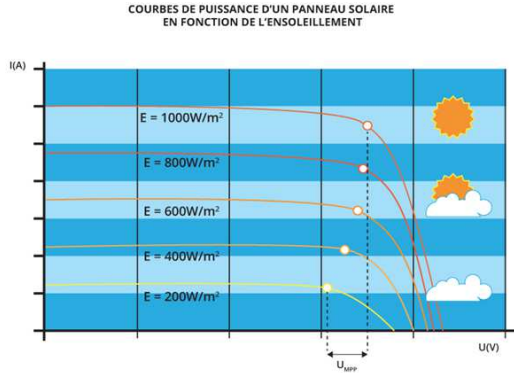
**CarbonFree Energy**  
**BIAGEM CONSULTING**

Energy Transition : Issues and Challenges – ATMA May 2026 | 18

## Etude de Cas : Limitations d'un mix énergétique 100 % ENR

### ▪ L'intermittence multiple de l'énergie solaire

- Impact de la nébulosité



Energy Transition : Issues and Challenges – ATMA May 2026 | 19

## Etude de Cas : Limitations d'un mix énergétique 100 % ENR

### ▪ L'intermittence multiple de l'énergie solaire

- Synthèse : énergie solaire effectivement reçue par m2



- Pour une production annuelle de 240 TWh par énergie solaire et panneaux PV :
  - En supposant une irradiation moyenne = 1 270 kWh / m2 / an  
 $\Leftrightarrow$  facteur de charge au m2 = 14.5 %
  - Un rendement de 20 % pour les panneaux PV dans la conversion irradiation  $\rightarrow$  puissance électrique
  - Il faut donc :  $240 \cdot 10^9 / 1\,270 / 0.20 = 950 \text{ km}^2$  panneaux PV
  - Soit une surface de l'ordre de 1 500 – 1 800 km2



Energy Transition : Issues and Challenges – ATMA May 2026 | 20