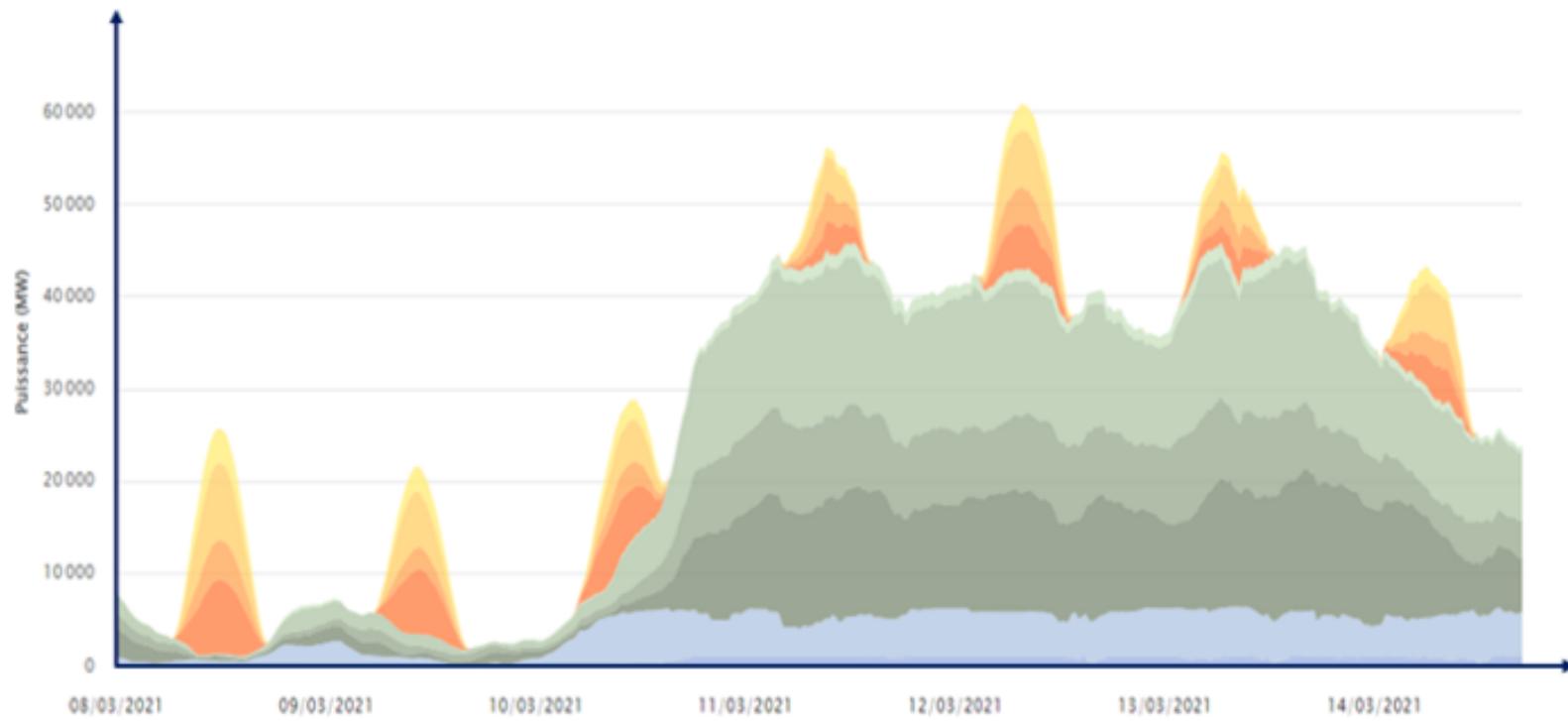


Impact des « intermittences » sur le réseau électrique



Le mythe de l'intermittence

par ceux qui la nient, ou la minorent



Yannick JADOT à Rouen, le 22/02/2022 : « *Quand, pour les éoliennes, on nous parle des problèmes d'intermittence ... En Normandie, le vent, on n'en manque pas !* »



Matthieu ORPHELIN, alors porte-parole de Y. JADOT, « *invité du week-end* » au 6/9 de France-Inter du 23/10/2021 : « *L'intermittence ? Une idée reçue !* »

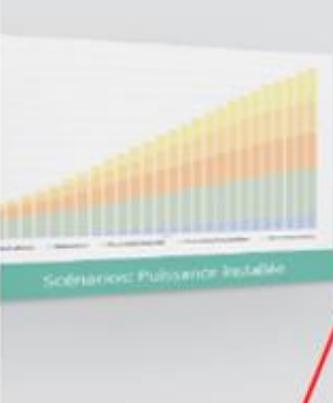


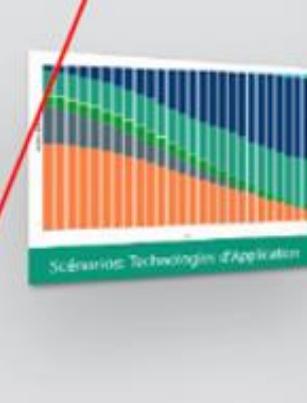
Denis BAUPIN
Au début des années 2000, ~~Yves COCHET~~ disait que « *l'éolien n'est pas intermittent, il est variable* », ajoutant « *c'est le nucléaire qui est intermittent !* » (correction du 4/05/2024)

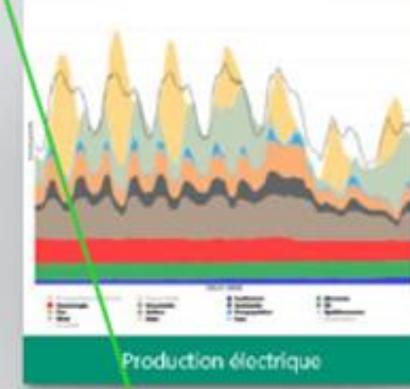
L'Allemagne nous montre la voie : alors, allons sur www.energy-charts.de *

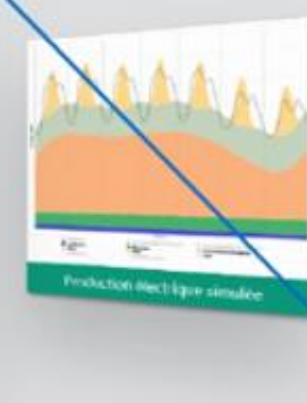
Energy-Charts 

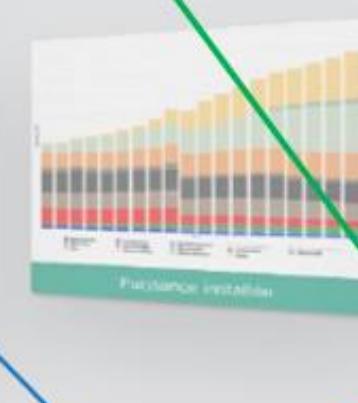
Puissance électrique ▾ Énergie ▾ Émissions ▾ Climat ▾ Prix ▾ Scénarios ▾ Carte Infos ▾

 Scénarios Puissance installée

 Scénarios Technologie d'application

 Production électrique

 Production électrique simulée

 Puissance installée

Fraunhofer ISE  Pays  Langue

En :
 • allemand
 • anglais
 • français
 • italien

Production électrique

Production électrique simulée

Fréquence

Puissance installée

Diagrammes de dispersion de la production d'électricité

Bienvenu sur le site web Energy-Charts

Le site web pour des graphiques interactifs de la production d'électricité et les prix de l'électricité en bourse

Diagrammes à barres de la production d'électricité

Diagrammes circulaires de la production d'électricité

Part des énergies renouvelables

Pourcentage de pleine charge

Niveaux des réservoirs

Prix d'échange de l'électricité

Prix d'échange de l'électricité et volumes échangés

Prix moyens d'échange de l'électricité

Diagrammes de dispersion des prix d'échange de l'électricité

Valeur de marché

Statistiques du commerce extérieur en électricité

pas très inclusif ...

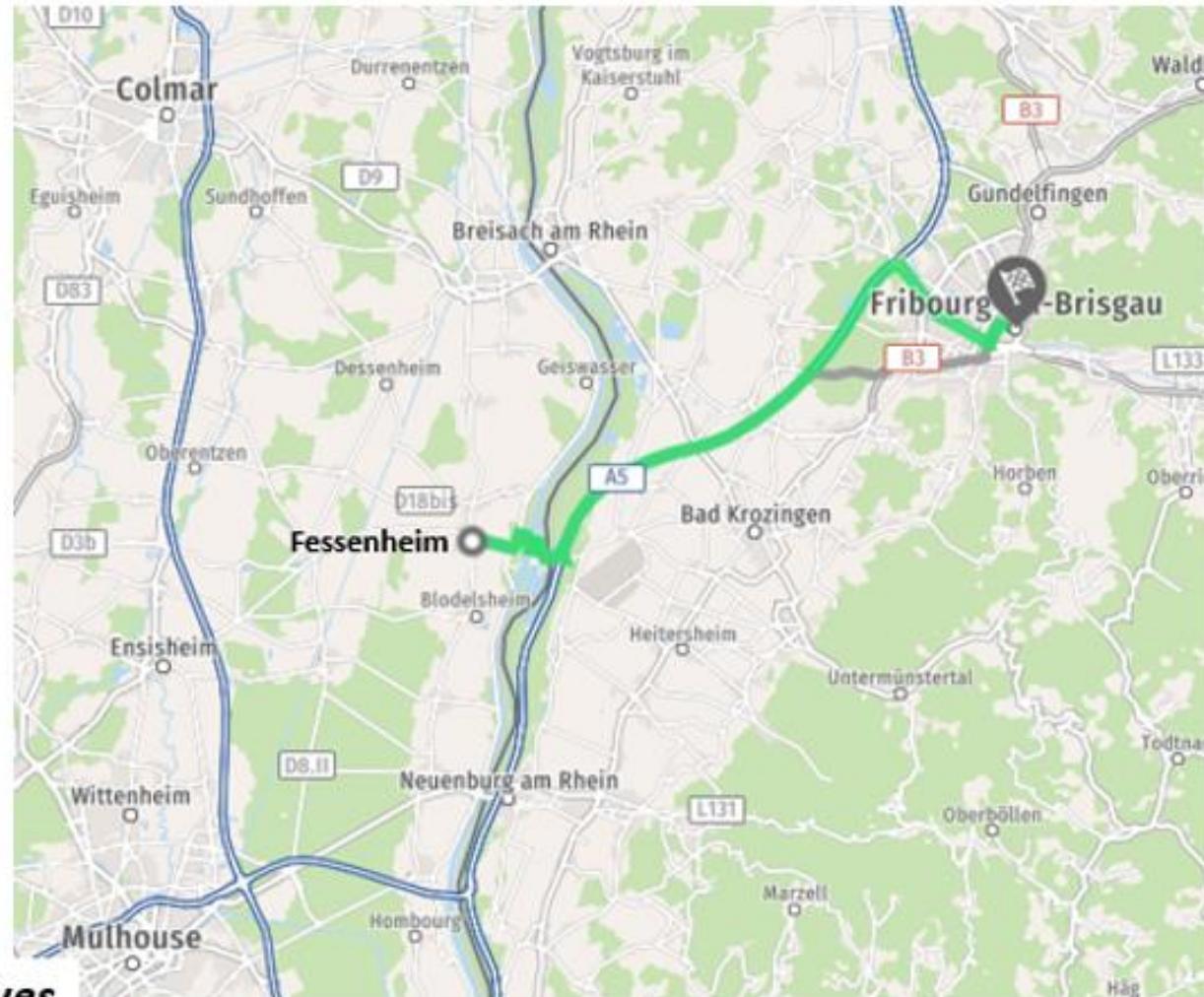
Equivalent de notre CEA-EA

* site géré par le **Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme de Fribourg**

Fraunhofer Gesellschaft est l'équivalent de notre « **CEA-EA** »*.

Constitué de 76 instituts et unités de recherche répartis dans toute l'Allemagne, il rassemble plus de 30.000 collaborateurs.

« **Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme**, à **Freiburg-im-Breisgau**, est le plus grand institut de recherche solaire d'Europe. Nos quelque 1 400 collaborateurs travaillent pour un système d'approvisionnement énergétique durable, économique, sûr et socialement juste, basé sur les énergies renouvelables ».

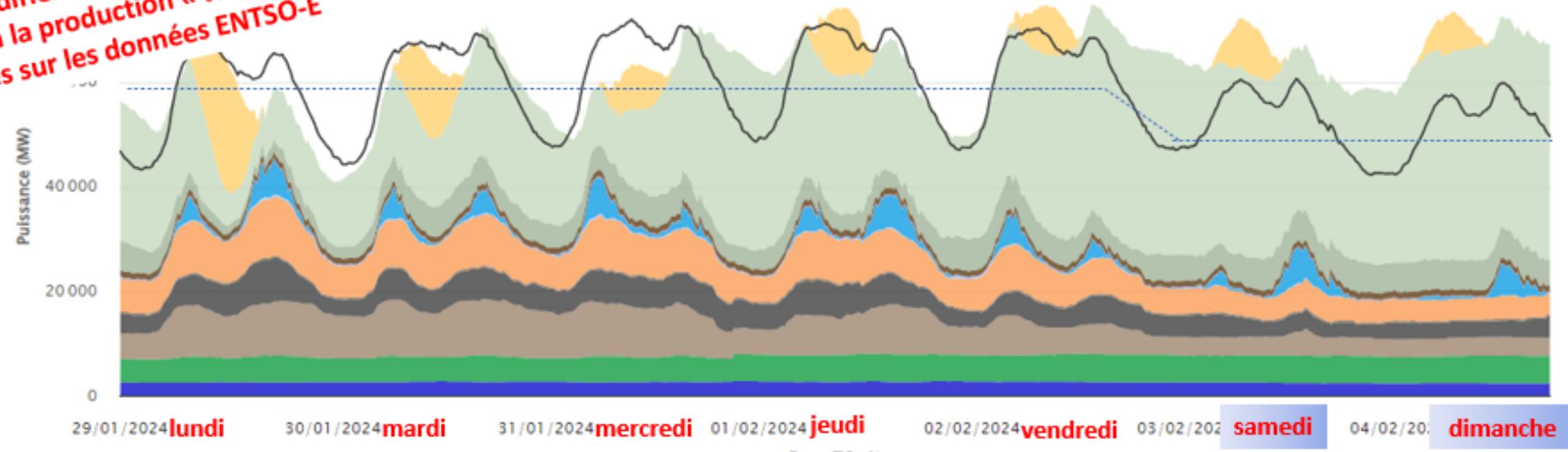


* Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives

Production publique nette d'électricité en Allemagne pour semaine 5 2024

Valeurs corrigées énergétiquement

Gare à bien différencier ce graphe de ceux :
 • relatifs à la production « totale »
 • ou basés sur les données ENTSO-E



Hydraulique STEP-consommation
 Lignite
 Géothermie
 Déchets
 Charge
 Bay-Al

bes-échanges commerciaux aux frontières
 Charbon
 Réservoir d'eau hydraulique
 Eolien en mer
 Charge-résiduelle

Hydraulique fil de l'eau
 Fioul
 Hydraulique STEP
 Eolien terrestre
 Part renouvelable de la génération

Biomasse
 Gaz naturel
 Autres
 Solaire
 Part renouvelable de la cha...

MW empilés de bas en haut
 et de gauche à droite, au choix,

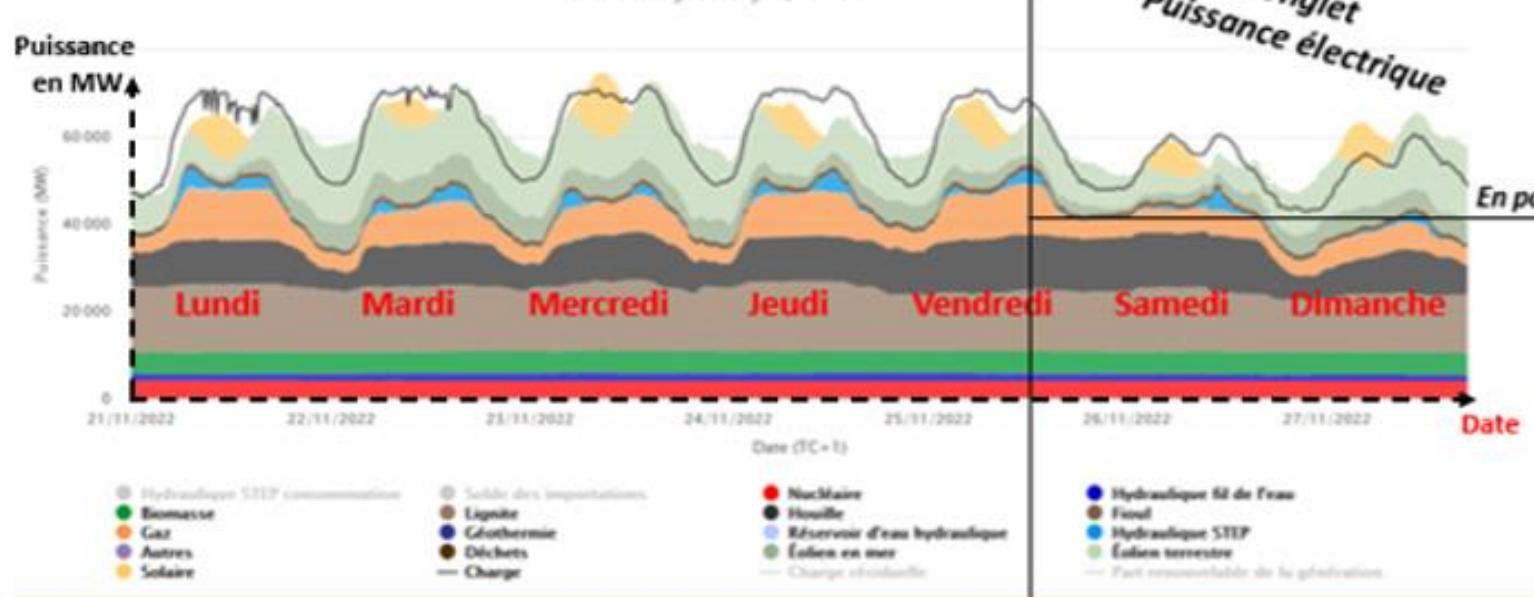
pilotables
 fatales ...

Energy-Charts.info - dernière actualisation: 29/03/2024 11:42 UTC+1

mais gare aux mises à jour !

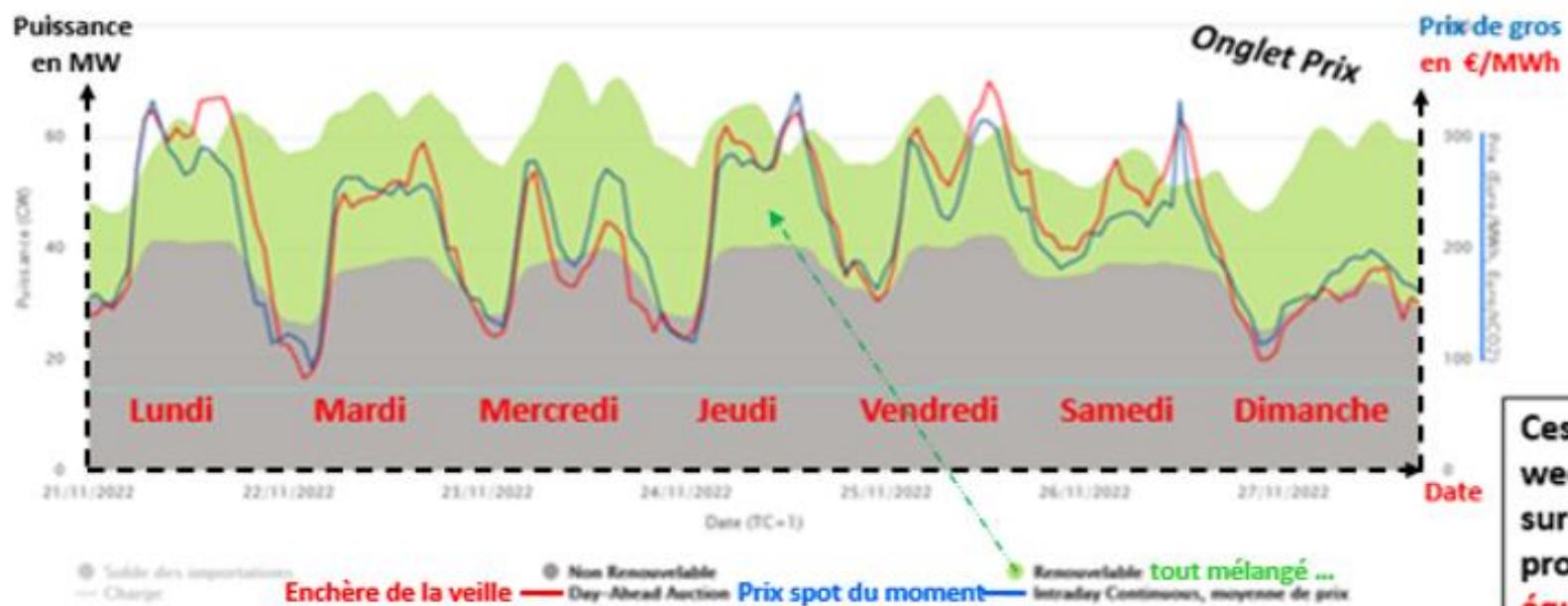
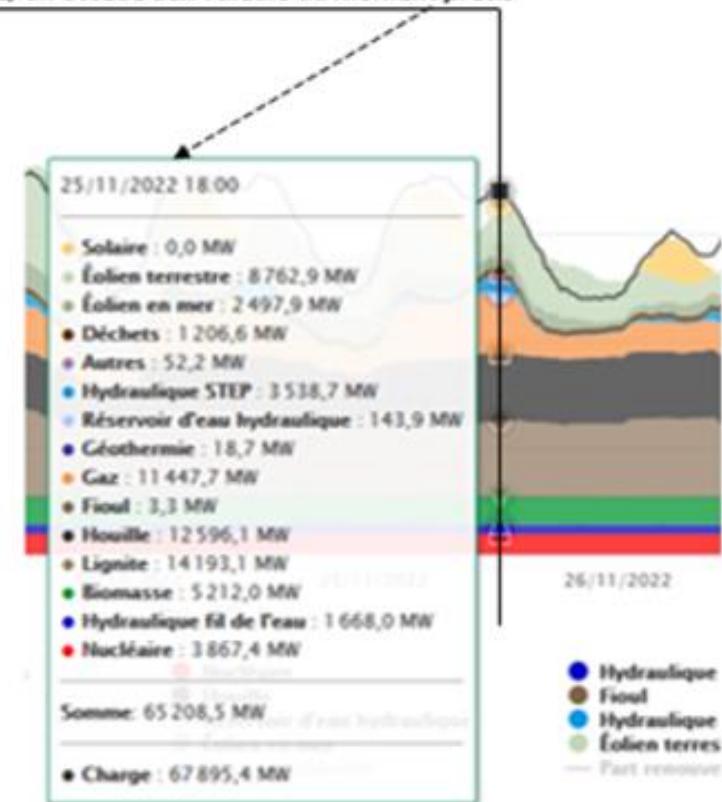
Production publique nette d'électricité en Allemagne en semaine 47 2022

Valeurs corrigées énergétiquement



Mode d'emploi

En posant la flèche, on accède aux valeurs du moment précis



Ces graphes hebdomadaires illustrent bien l'effet des week-ends sur l'activité économique et donc, d'une part sur la consommation d'électricité, d'autre part sur la production, laquelle est requise pour l'**indispensable équilibre du réseau électrique** autour de 50 Hz.

Intermythen^{ces}

- « *Il y a toujours du VENT quelque part* » ... Ah ! Bon ? Y compris en Allemagne ? voir folii 2.1 à 2.11
- « *Le SOLEIL se lève tous les jours* » ... Mais le photovoltaïque produit plus ou moins. voir folii 3.1 à 3.7
- **Complémentarité vent + soleil** très imparfaite voir folii 4.1 à 4.3
- **Fort impact des EnRi*** sur les prix, au lever du jour et, surtout, au coucher du soleil voir folii 5.1 à 5.8
- **Faut-il augmenter les capacités renouvelables intermittentes (EnRii) ?** voir folii 6.1 à 6.6

En annexe :

- **Illustration des notions de puissance (en GW) et énergie (en MWh ou TWh)** folii 7.1 et 7.2
- **Des prix négatifs ?** folio 7.3
- **Tarifs d'obligation, pour EDF, d'achat des EnRi et de vente à ses concurrents (ARENH)** folio 7.4
- **Empreinte carbone (electricitymaps.com)** folio 7.5
- **Variations (camouflages ?) de Fraunhofer** folii 7.6 à 7.9

Prolongements teintés d'humour



Folii 8.1 à 8.4

* Energies Renouvelables intermittentes (parfois intempestives) ... EnRi²

Energie éolienne allemande, en 2023

- Puissance installée au sol : de 57,99 GW (fin 2022) à **61,03 GW** (fin 2023), soit une moyenne de 59,51 GW
- L'éolien offshore a stagné de 8,2 GW (fin 2022) à **8,46 GW** (fin 2023)
- Soit, au total fin 2023, **69,49 GW** (6 GW de plus que le parc nucléaire français, Fessenheim inclus)

La production éolienne terrestre fut de 116,3 TWh (année remarquable), correspondant à une puissance moyenne de 13,3 GW et un **facteur de charge de 22,3% ***

La production offshore fut de 23,5 TWh (moyenne de 2,68 GW), pour un **facteur de charge de 32,7 % seulement**.

Sur terre et mer, la puissance moyenne s'établit à 15,98 GW et le facteur de charge moyen à 23,5 %.

* Facteur de charge (ou productibilité), sur une période donnée (année ...) : $f_c (\text{en \%}) = \text{GWh}/8760/\text{GW}_{\text{installés}} \cdot 100$

Enormes fluctuations éoliennes :

Production publique nette d'électricité en Allemagne en Novembre 2021

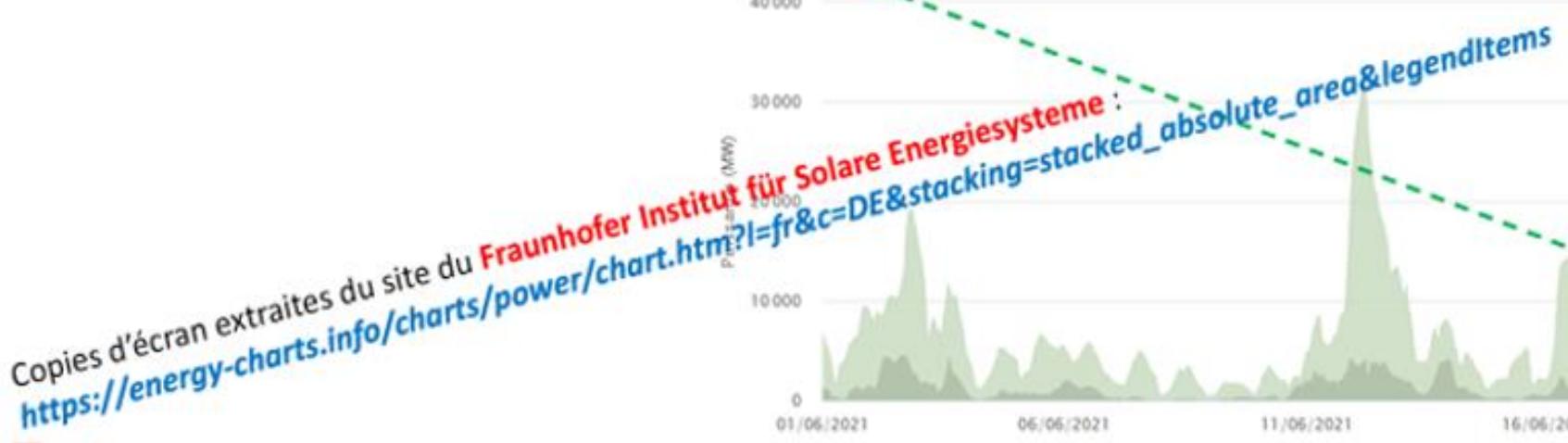
Valeurs corrigées énergétiquement

45,69 GW le 30 novembre

... mais seulement

0,14 GW le 26 juin 2021 !

soit 0,2% des 64,9 GW alors installés.*



* Heureusement, à 8.45, le soleil donnait déjà 16,12 GW.

Mais à 4 h du matin, l'ensemble ne faisait pas 300 MW ...

Hydraulique STEP consommation
Biomasse
Gaz
Autres
Éolien terrestre
Part renouvelable de la génération

Solde des importations
Lignite
Géothermie
Autres énergies renouvelables
Solaire
Part renouvelable de la charge

Nucléaire
Houille
Réservoir d'eau hydraulique
Déchets
Charge

Hydraulique fil de l'eau
Froid
Hydraulique STEP
Éolien en mer
Charge résiduelle

Fluctuations éoliennes parfois durables (sur plus d'une semaine) :

Production publique nette d'électricité en Allemagne **2020**

Valeurs corrigées énergétiquement

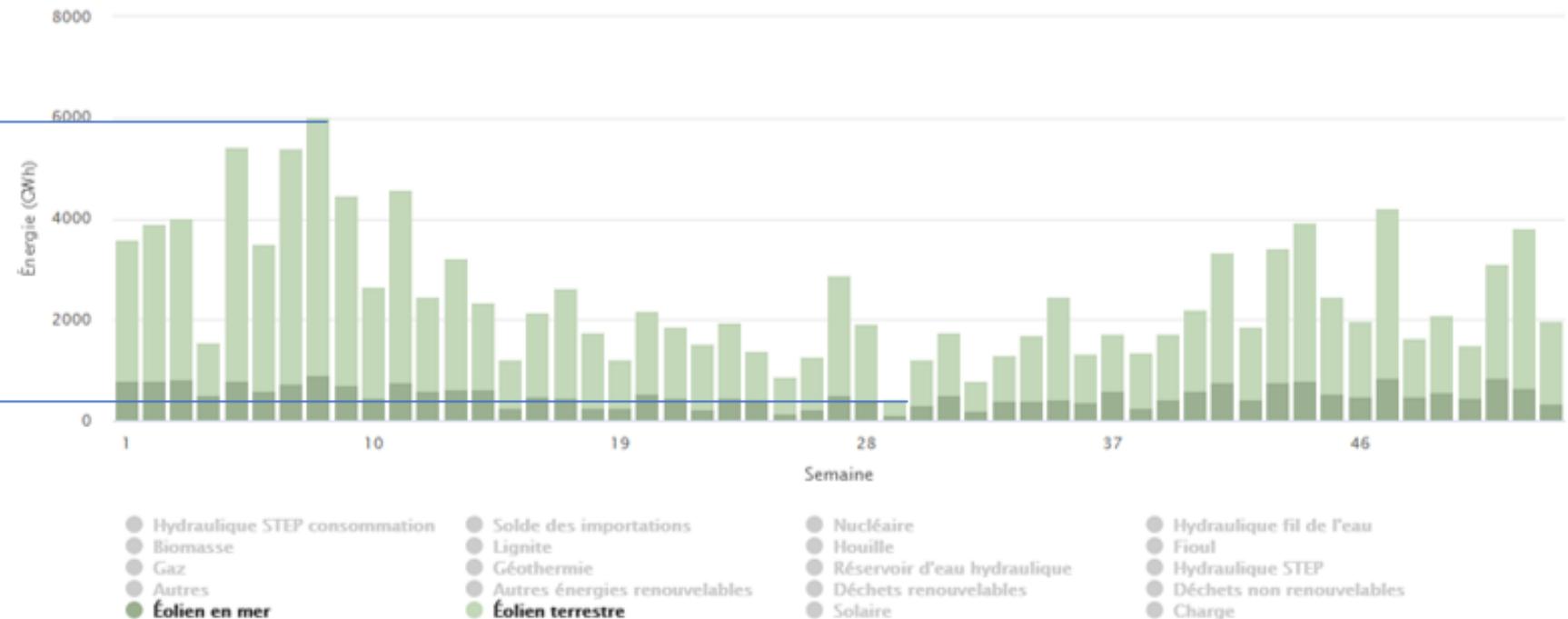
Semaine 8 :

- 6 029 GWh en 7 jours (168 h)
- Puiss. moyenne : 35,89 GW

~ 14 fois moins

Semaine 29 :

- 436 GWh en 7 jours
- Puiss. moyenne : **2,59 GW**



Dispersion des productions éoliennes hebdomadaires (GWh)

Année	minima				Ratio M/m
	GWh	Semaine	GW _{m-1}	f _c (en %)	
2023	783	34	68,27	6,8	8,2
2022	596	18	64,31	5,5	10,3
2021	699	25	63,01	6,6	6,2
2020	436	29	61,79	4,2	13,8
2019	599	31	59,41	6,0	9,4
2018	720	42	57,94	7,4	6,4
2017	425	38	48,42	5,2	10,6
2016	500	38	43,57	6,8	7,7
2015	495	4	37,56	7,8	7,6
2014	370	41	35,52	6,2	8,6
2013	330	31	32,97	6,0	7,7
2012	330	28	30,56	6,4	9,0
2011	160	40	28,58	3,3	15,3
2010	160	27	26,82	3,6	9,6
			f_c moyen	5,8	
			f_c moyen	50,9	

$$f_c = \text{GWh}/(7*24*GW_{m-1})*100$$



La dispersion (rapport entre les productions max et mini) peut varier de 6, en 2021, à 14 en 2020

Nous avons constaté (fin 2023) des données antérieures légèrement modifiées (non ici corrigées)

Jour	Heure	P. éolienne Installée			P. mini. enregistrée			
		Terre	Mer	Total	Terre	Mer	Tot. GW	%
23/6 / 2010	8:00	26,82	0,08	26,90	non détaillée	0,13	0,48	
5/7 / 2011	10:00	28,58	0,19	28,77	non détaillée	0,11	0,38	
24/10 / 2012	16:00	30,56	0,27	30,83	non détaillée	0,15	0,49	
16/2 * / 2013	13:00	32,97	0,51	33,48	non détaillée	0,15	0,45	
17/7 / 2014	13:00	37,62	0,99	38,61	non détaillée	0,03	0,08	
3/11 / 2015	15:15	41,30	3,28	44,58	0,0799	0,0218	0,1017	0,23
24/7 / 2016	10:45	45,28	4,15	49,43	0,1158	0,0009	0,1167	0,24
6/7 / 2017	9:15	50,17	5,41	55,58	0,0743	0,0028	0,0771	0,14
19/2 / 2018	15:15	52,33	6,39	58,72	0,1535	0,1011	0,2546	0,43
17/7 / 2019	10:00	53,19	7,53	60,72	0,3623	0,0148	0,3771	0,62
8/8 / 2020	10:00	54,66	7,77	62,43	0,0910	0,0380	0,1290	0,21
26/6 / 2021	8:45	56,27	7,77	64,04	0,1119	0,0252	0,1371	0,21
24/3 / 2022	10:45	56,54	7,77	64,31	0,1731	0,0504	0,2235	0,35

* et aussi le 4/9 !



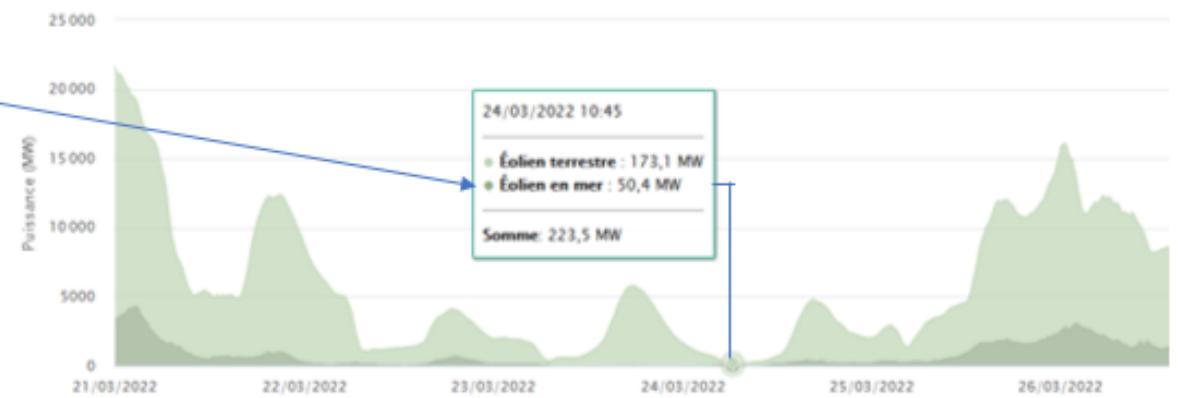
provisoire ...

10/9 2023	10:30	60,03	8,43	68,46	0,1306	0,0066	0,1372	0,20
-----------	-------	-------	------	-------	--------	--------	--------	------

Pannes de vent (< 1%) récurrentes, aléatoirement réparties dans l'année, mais systématiques.

Production publique nette d'électricité en Allemagne en semaine 12 2022

Valeurs corrigées énergétiquement



- Hydraulique STEP consommation
- Biomasse
- Gaz
- Autres
- Éolien terrestre**

- Solde des importations
- Lignite
- Géothermie
- Autres énergies renouvelables
- Solaire

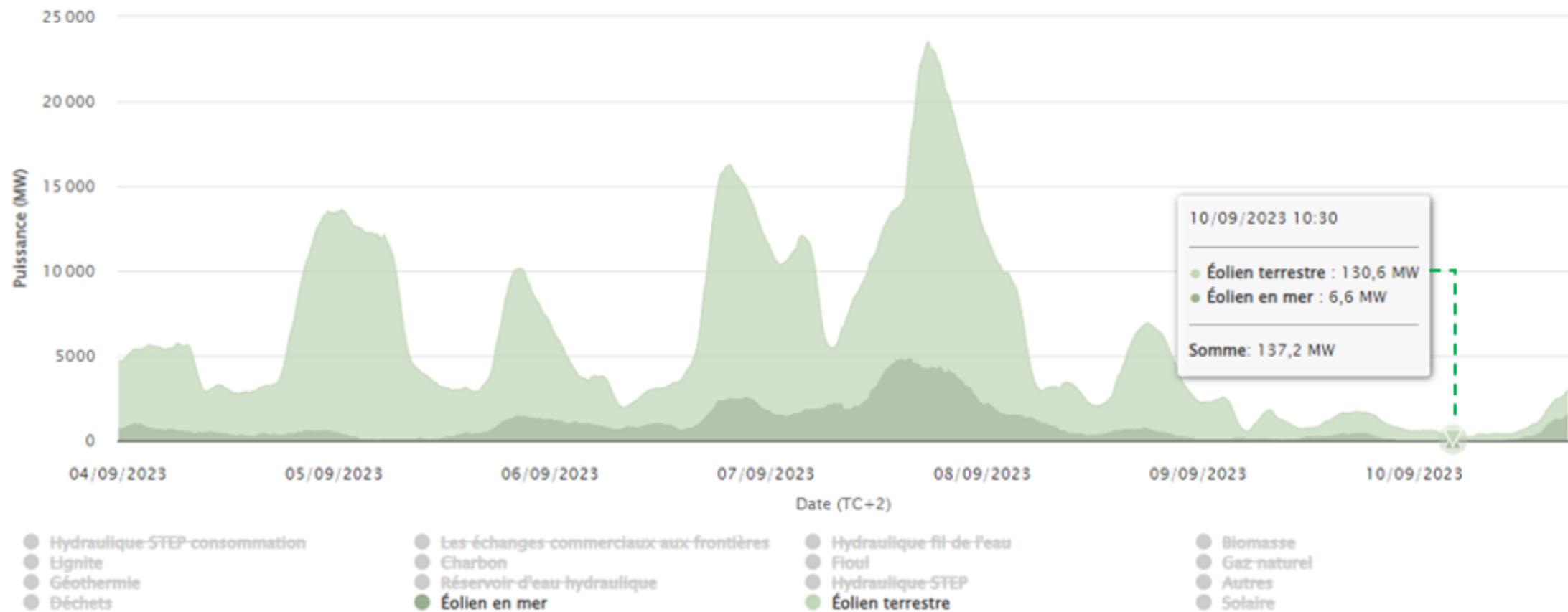
- Nucléaire
- Houille
- Réservoir d'eau hydraulique
- Déchets
- Charge

- Hydraulique fil
- Froid
- Hydraulique STI
- Éolien en mer**
- Charge résiduel

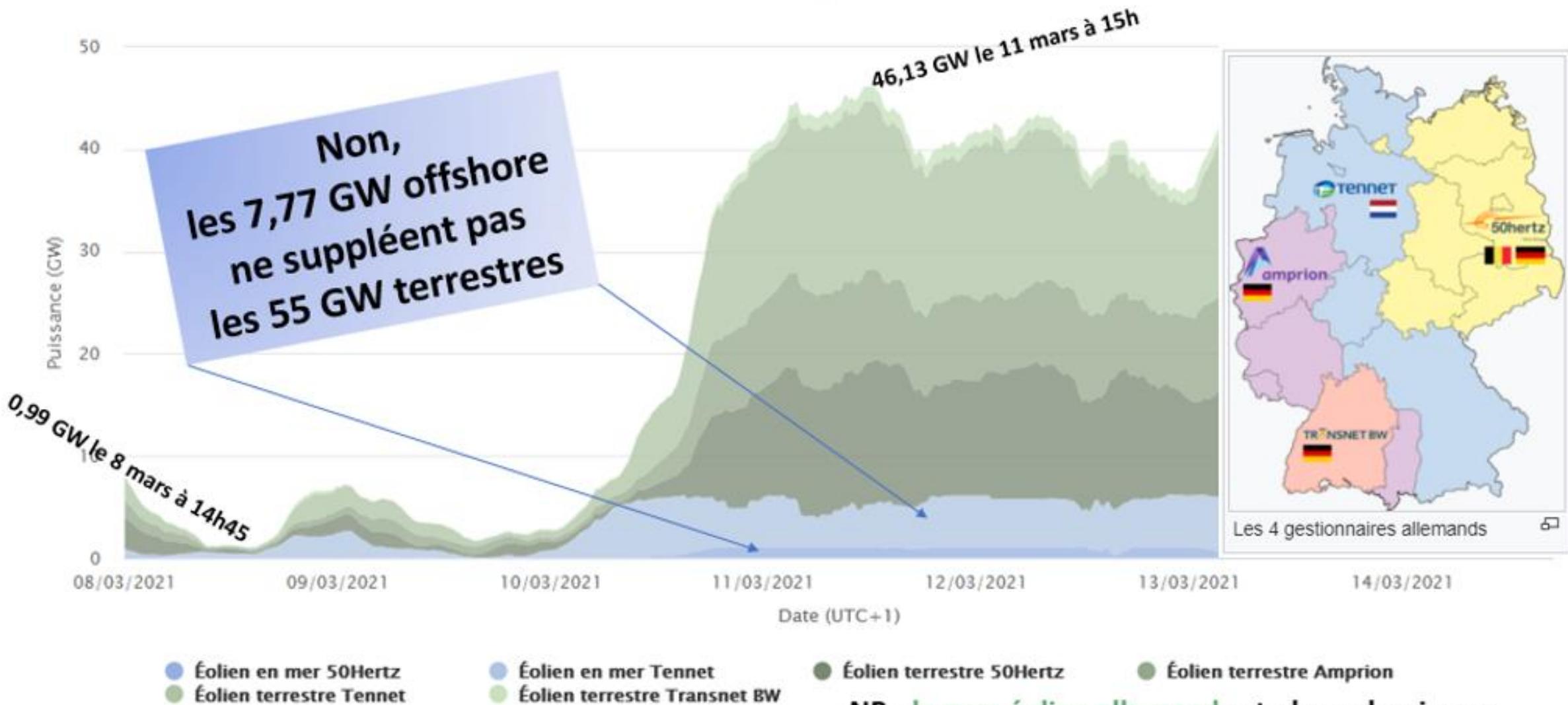
Minimum de production éolienne en 2023 :
137,2 MW pour 68 460 MW installés, soit $f_c = 0,2\%$ seulement

Production publique nette d'électricité en Allemagne pour semaine 36 2023

Valeurs corrigées énergétiquement

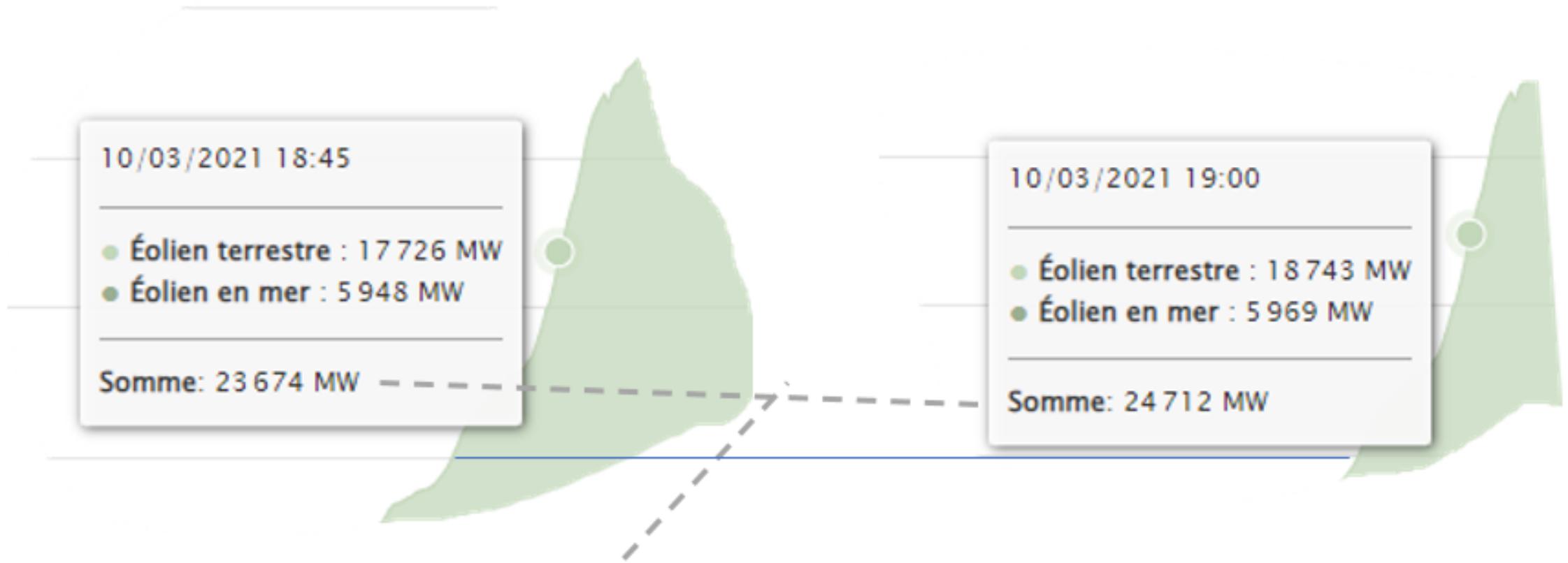


Production d'électricité en Allemagne en semaine 10 2021



**NB : le parc éolien allemand est plus volumineux
que le parc nucléaire français (61,3GW)**

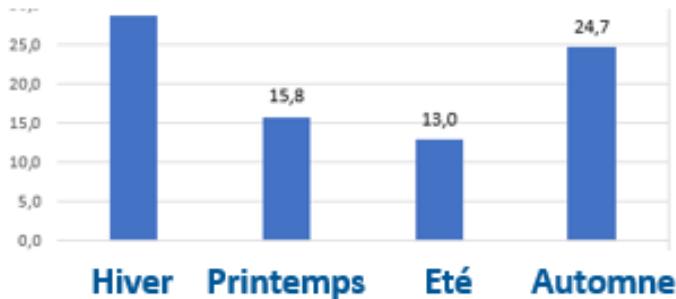
Parfois de beaux gradients ...



Soit **+ 1038 MW en $\frac{1}{4}$ d'heure**, soit un **gradient de + 4,15 GW/h** en l'occurrence tiré par les éoliennes terrestres

Evolution du facteur de charge de l'éolien, au fil des années

Eolien terrestre	Hiver	Printemps	Eté	Automne	Année pleine
2018	24,7	15,7	12,7	24,7	19,5
2019	30,8	16,3	14,1	24,9	21,4
2020	35,4	15,3	12,7	23,7	21,8
2021	22,3	16,2	12,3	22,1	18,2
2022	29,9	16,0	11,7	21,2	19,6
2023	28,6	15,1	14,2	31,5	22,3
Moy	28,6	15,8	13,0	24,7	20,5



Année	GW	GWh				sur 90	Fc Hiver	Fc Print	Fc Eté	Fc Auto	Fc annuel
		fin 2022	m1	m2	m3						
Eolien T.	58,0	14 308,0	10 192,0	11 466,0	58,6	28,6	15,1	14,2	31,5	22,3	
Offshore	8,2	2 730,8	1 639,3	2 434,5	8,3	38,2	24,6	23,3	42,3	32,4	
ensemble	66,1	17 038,8	11 831,3	13 900,5	66,9	29,8	16,3	15,3	32,8	23,5	

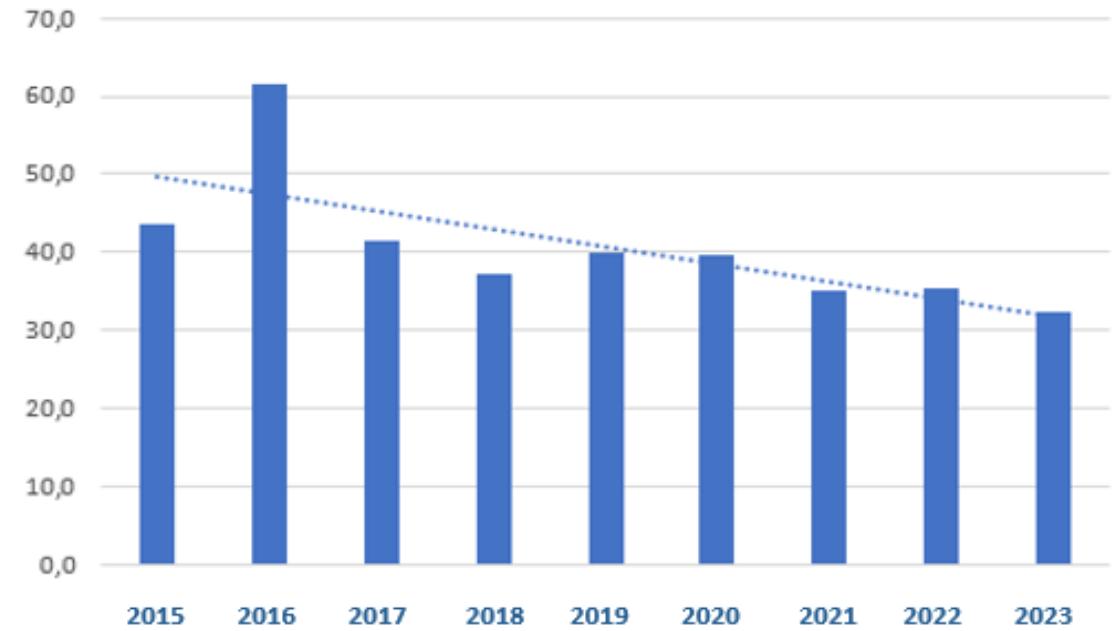
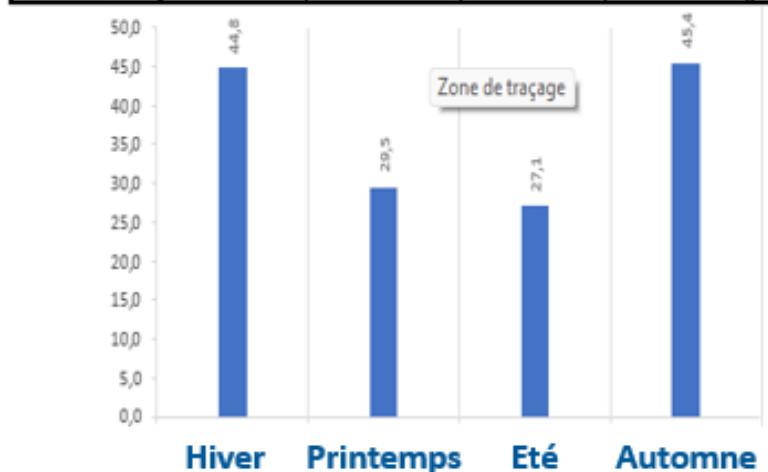
pour le trimestre : $H5=100*(D5+E5+F5)/(24*G$2)/(C5+G5)^2$

pour l'année : $Y5=100*(D5+E5+F5+I5+J5+K5+N5+O5+P5+S5+T5+U5)/8760/(C5+V5)^2$

Oui, l'éolien, nettement hivernal, semble complémentaire du solaire

Le facteur de charge de l'éolien offshore en régression ?

Eolien offshore	Hiver	Printemps	Eté	Automne	Année pleine
2015	35,7	35,4	38,4	55,9	43,6
2016	45,9	19,2	9,4	26,3	61,5
2017	49,7	38,2	28,1	50,6	41,6
2018	43,4	34,2	29,8	48,3	37,1
2019	48,2	34,6	33,1	45,9	39,9
2020	53,4	28,6	28,2	48,0	39,7
2021	43,8	24,2	26,3	46,6	35,2
2022	44,7	26,8	27,0	44,7	35,5
2023	38,2	24,6	23,3	42,3	32,4
Moy	44,8	29,5	27,1	45,4	40,7



Attention :
ce taux n'est que la moyenne
des 9 taux annuels ...

Pourquoi cette décroissance ?

Impact du « sillage »?

**



« *L'effet de sillage obligera à une planification transfrontalière* » de l'éolien offshore ... *

* Cf. article de Joël SPAES dans les « *Techniques de l'Ingénieur* » du 23 mars 2020

www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/offshore-eolien-leffet-de-sillage-obligera-a-une-planification-transfrontaliere-76800/

** Voir aussi, postérieur à cet exposé, www.enerzine.com/predire-l'imprévisible-le-defi-des-sillages-dans-le-olien-offshore/88641-2024-04 article qui confirme une **perte de rendement sur plusieurs dizaines de km.**

Energie solaire allemande, en 2023

Puissance installée, en hausse toujours soutenue : de 67,44 GW (fin 2022) à **82,39 GW** (fin 2023), soit une moyenne de 74,92 GW, dépassant largement (depuis fin 2022) **la capacité initiale du parc nucléaire français !**

La production annuelle fut de **59,5 TWh** ce qui implique une puissance moyenne de 6,792 GW et un **facteur de charge de 9,1 % seulement** (en nette baisse par rapport aux années précédentes).

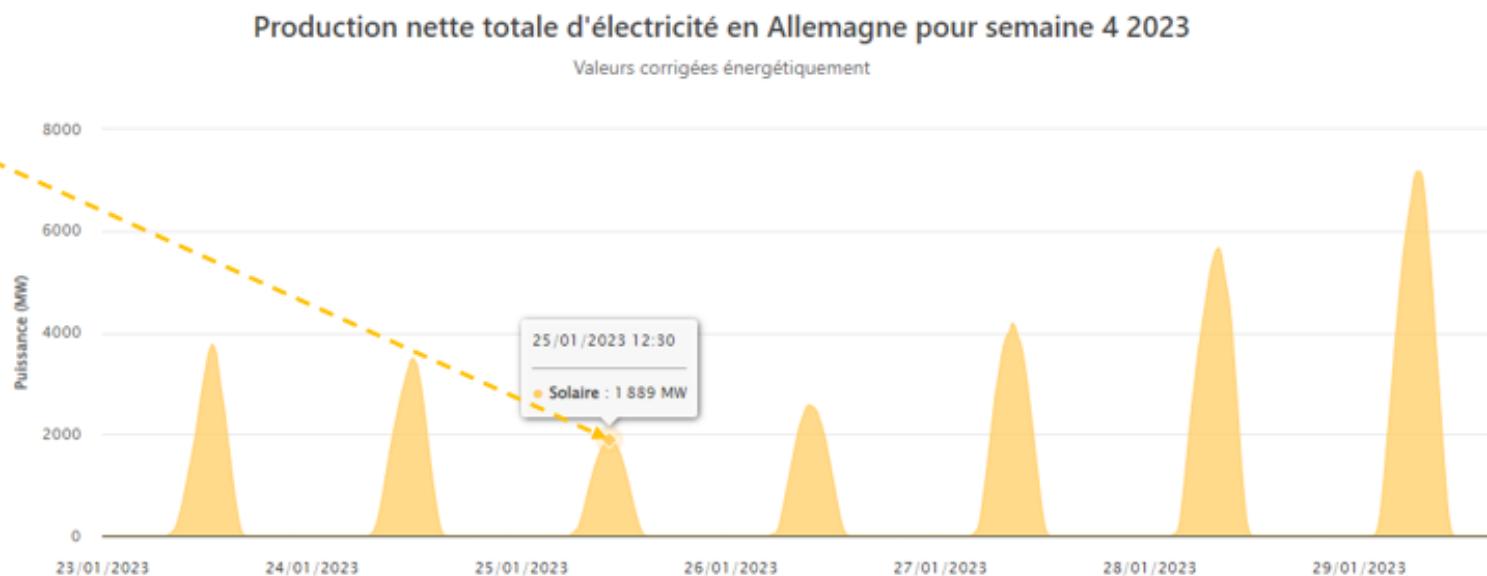
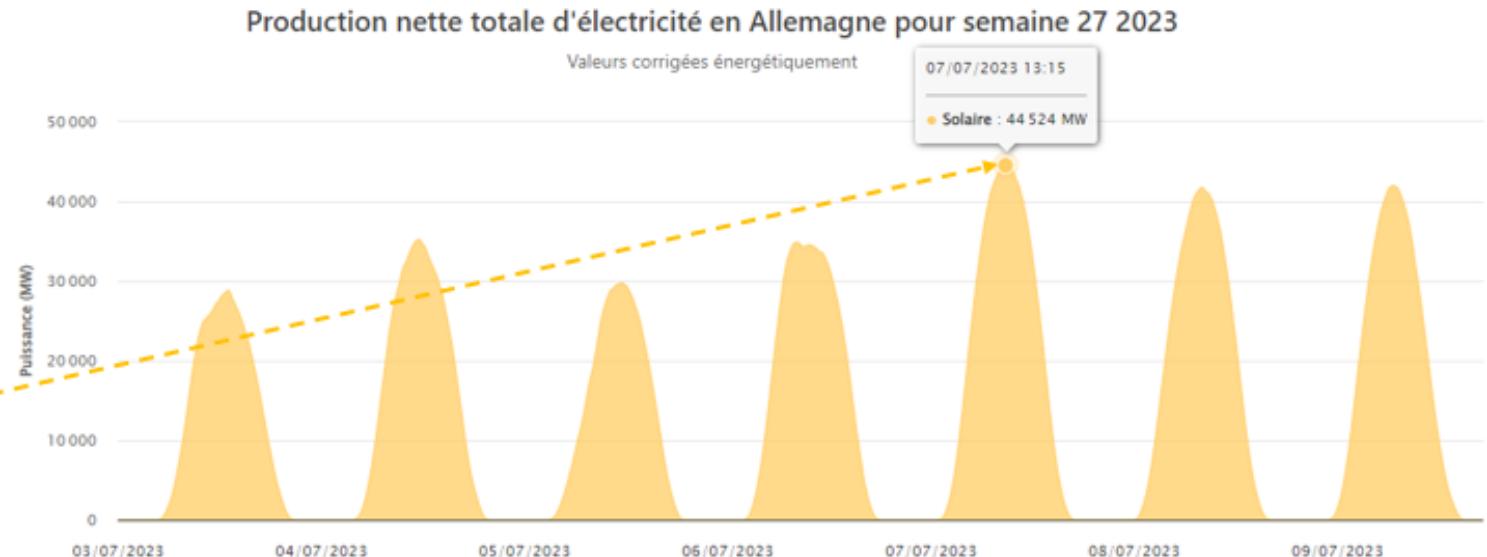
Pics solaires méridiens:

44,52 GW le 7 juillet

... mais seulement

1,89 GW le 25 janvier

... et rien chaque nuit ...



D'un extrême à l'autre

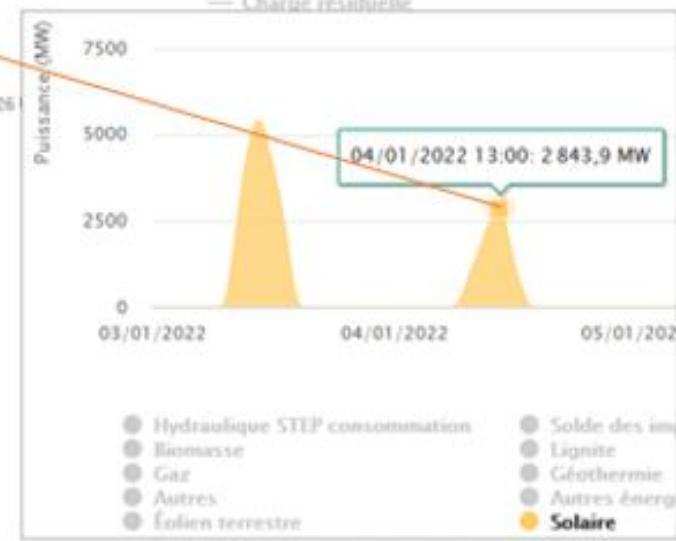
Production publique nette d'électricité en Allemagne 2022

Valeurs corrigées énergétiquement



Energy-Charts.info - dernière actualisation: 18/07/2022 10:26

10 jours plus tôt (24/12/2021, 12h15) le pic de 2026,9 MW représente 3,4 % des 59 GW photovoltaïques alors installés



Fluctuations solaires systématiques mais substantielles :

Semaine 22 :

- 2,5448 TWh en 7 jours
- Puis. moyenne : **15,15 GW**

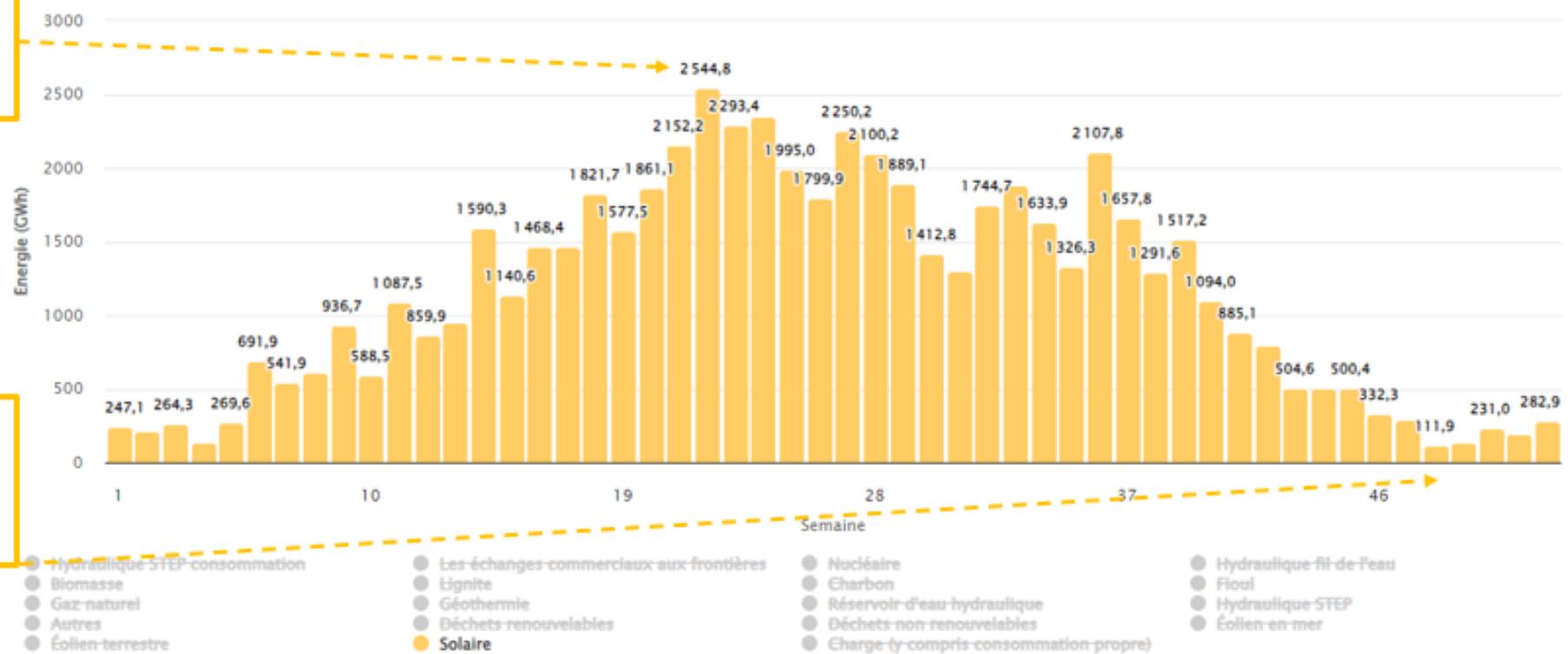
23 fois moins !!!

Semaine 48 :

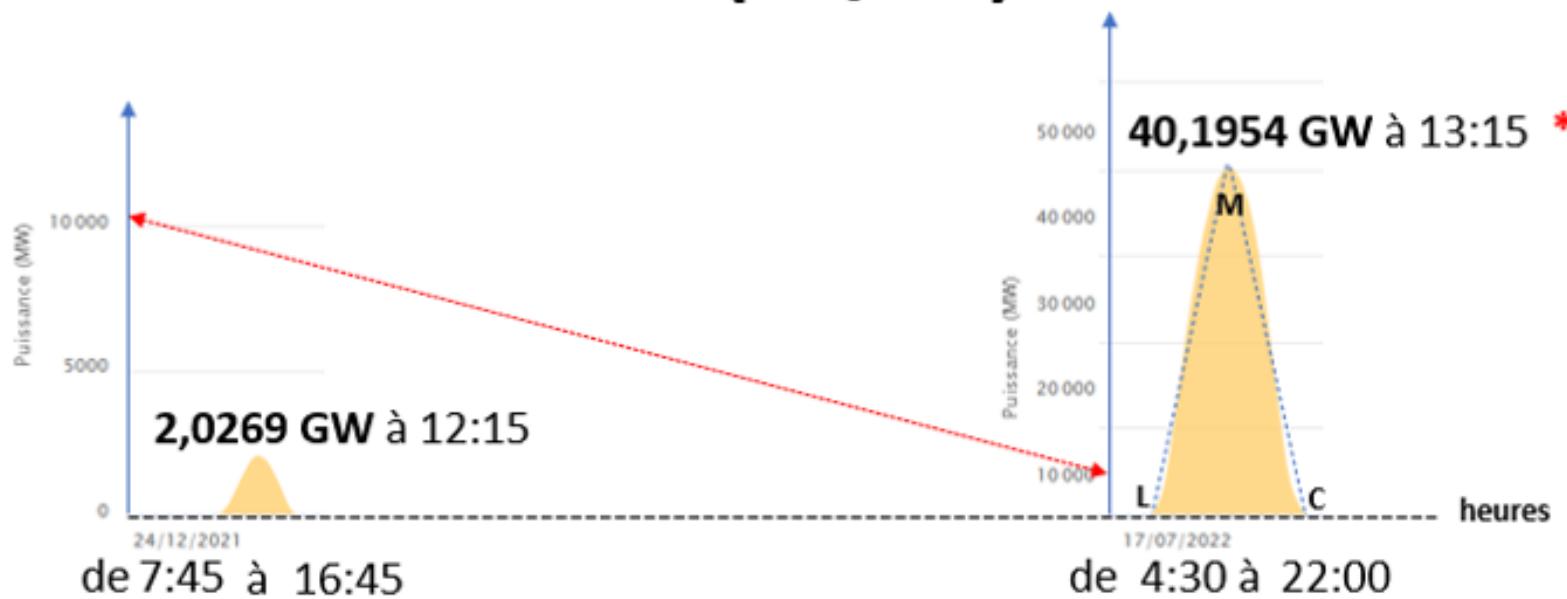
- 0,1119 TWh en 7 jours
- Puis. moyenne : **0,67 GW**

Production nette totale d'électricité en Allemagne 2023

Valeurs corrigées énergétiquement



Du solstice d'hiver 2021 (24/12) à la canicule 2022 (17/7)



soit $\sim 9,12 \text{ GWh}$ en 24 h **
pour 58,98 GW installés

soit $\sim 352 \text{ GWh}$ en 24 h
pour $> 61,94 \text{ GW}$ installés

Facteurs de charge :

$f_c = 0,64 \%$

$f_c = 23,68 \%$

* Extrait de [Energy-Charts.info](https://energy-charts.info/charts/power/chart.htm?l=fr&c=DE&stacking=stacked_absolute_area&week=28) - dernière actualisation: 18/07/2022 15:27 UTC+2 », feuille issue de https://energy-charts.info/charts/power/chart.htm?l=fr&c=DE&stacking=stacked_absolute_area&week=28

** Approximation par le triangle isocèle : $2,027 \text{ GW} \times 9 \text{ heures} / 2 = 9,12 \text{ GWh}$

Gradients de puissance solaire observés le vendredi 7 juillet 2023

Voir folio 3.6 bis

Matinée

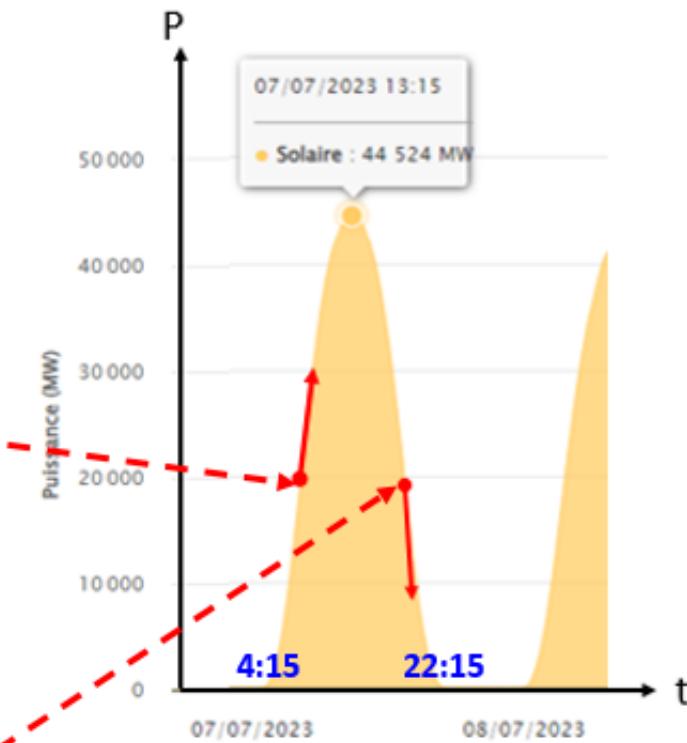
Heure	MW	écart MW	gradient GW/h
07:30	10 890		
07:45	13 118	2 228	8,91
08:00	15 500	2 382	9,53
08:15	17 918	2 418	9,67
08:30	20 412	2 494	9,98
08:45	22 876	2 464	9,86
09:00	25 243	2 367	9,47
09:15	27 507	2 264	9,06
09:30	29 637	2 130	8,52
09:45	31 687	2 050	8,20

De 17 à 18:00, le solaire perd 9 230 MW soit 9,3 GW en 1 heure

Mais la dérivée est plus sévère encore, entre 18:00 et 18:15

Après-midi

Heure	MW	écart MW	gradient GW/h
17:00	28 383		
17:15	26 217	-2 166	-8,66
17:30	23 964	-2 253	-9,01
17:45	21 609	-2 355	-9,42
18:00	19 153	-2 456	-9,82
18:15	16 687	-2 466	9,86
18:30	14 275	-2 412	-9,65
18:45	12 053	-2 222	-8,89
19:00	9 953	-2 100	-8,40
19:15	7 990	-1 963	-7,85



Soit 11 réacteurs 900 MW à arrêter ...

... puis à redémarrer, dans la même journée !

Production nette totale d'électricité en Allemagne pour semaine 27 2023

Valeurs corrigées énergétiquement



Gradients de puissance solaire, observés le 7 juillet 2023
mais actualisés 10 mois plus tard seulement ... *

Heure	MW	écart MW	gradient GW/h
17:00	27 065		
17:15	25 000	-2 065	-8,26
17:30	22 852	-2 148	-8,59
17:45	20 607	-2 245	-8,98
18:00	18 264	-2 343	-9,37
18:15	15 913	-2 351	-9,40
18:30	13 612	-2 301	-9,20
18:45	11 494	-2 118	-8,47

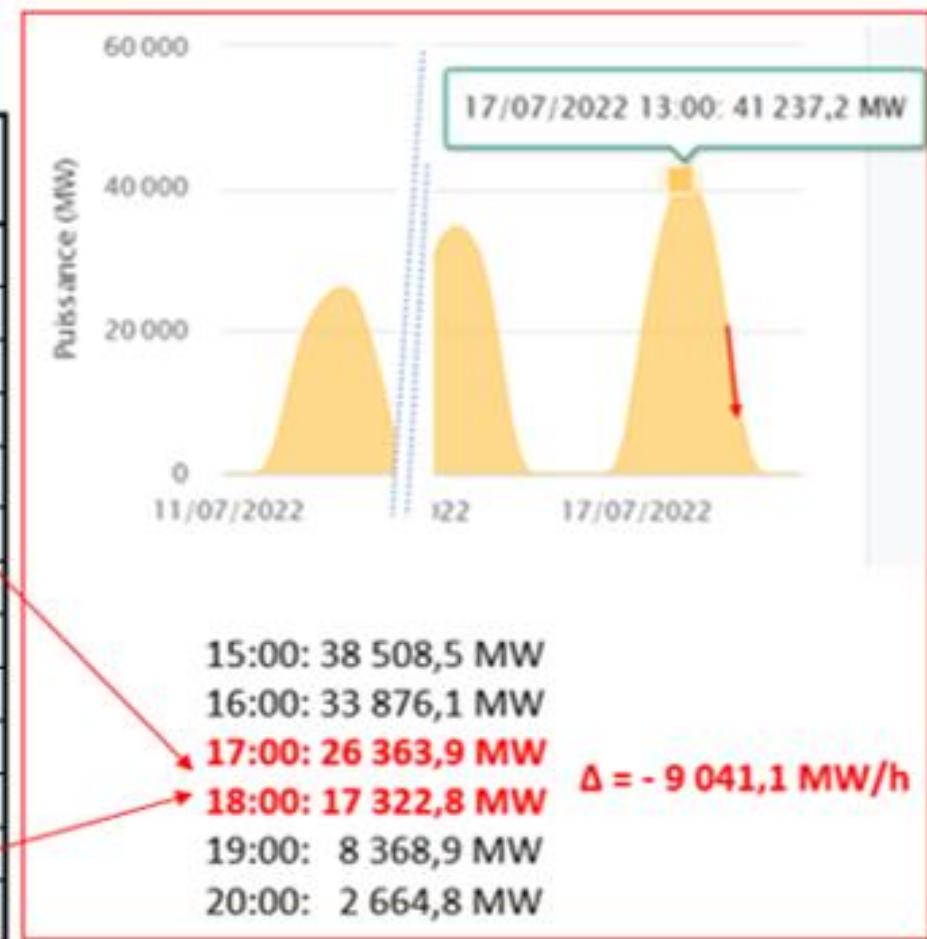
* folio 3.6 révisé le 30/06/2024 ...

De 17 à 18:00, le solaire perd
8 801 MW, soit 8,8 GW en 1 heure

et la dérivée atteint -9,4 GW/h à 18:00

Mais plus les Allemands développent leur PV, plus ils fragilisent leurs réseaux électriques ...

Date	Sem	MW fournis	Puis. alors instal. (GW)	f_c (%) max	Variation de 17 à 18 h	Gradient atteint GW/h	% de P_i
17/07/2022	28 ¹	41 237,2	62,51	66,0	-9 041,1	-9,0	-14,5
27/04/2021	17	39 372,7	55,65	70,8	-9 470,8	-9,5	-17,0
01/06/2020	23	36 649,1	51,46	71,2	-7 968,4	-8,0	-15,5
19/04/2019	16	33 317,1	46,87	71,1	-8 029,1	-8,0	-17,1
02/07/2018	27	31 878,3	43,97	72,5	-6 743,9 ³	-6,7	-15,3
27/05/2017	21	30 677,1	41,89	73,2	-6 671,6	-6,7	-15,9
08/05/2016	18	29 142,4	39,62	73,6	-6 453,1	-6,5	-16,3
21/04/2015	17	28 846,9	38,31	75,3	-6 966,6	-7,0	-18,2
06/06/2014	23	26 600,0	37,02	71,9	-5 670,0	-5,7	-15,3
21/07/2013	29	25 050,0	35,15	71,3	-5 380,0	-5,4	-15,3
25/05/2012	21	20 940,0	28,05	74,7	-4 520,0	-4,5	-16,1
09/05/2011	19	13 690,0	19,03	71,9	-2 860,0	-2,9	-15,0
10/10/2010	40	24 140,0 ²	17,94				



¹ Cf. https://energy-charts.info/charts/power/chart.htm?l=fr&c=DE&stacking=stacked_absolute_area&week=28
Voir détails ci-joints.

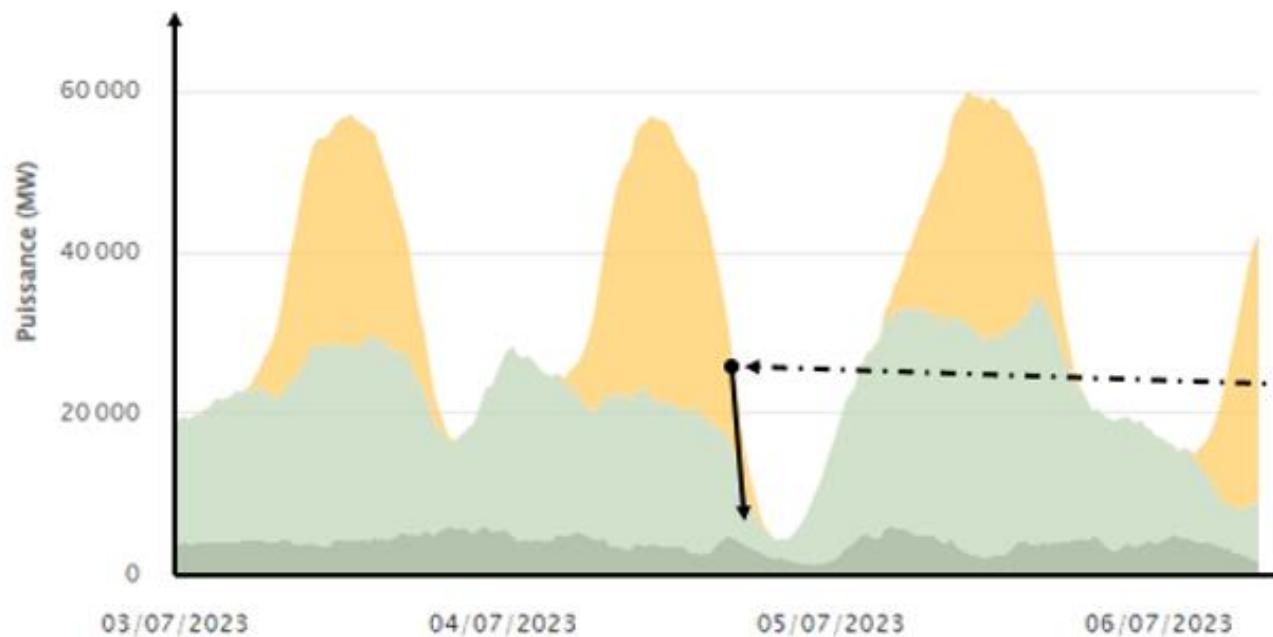
² Données Fraunhofer aberrantes : pic méridien supérieur à la puissance installée !

³ ... mais -6 889,9 MW de 18 à 19 h.

soit un gradient horaire atteignant, en moyenne, 16% de la puissance installée !

Gradients gravissimes à la descente, ... parfois, aggravés par une saute de vent :

Après-midi du 4 juillet 2023

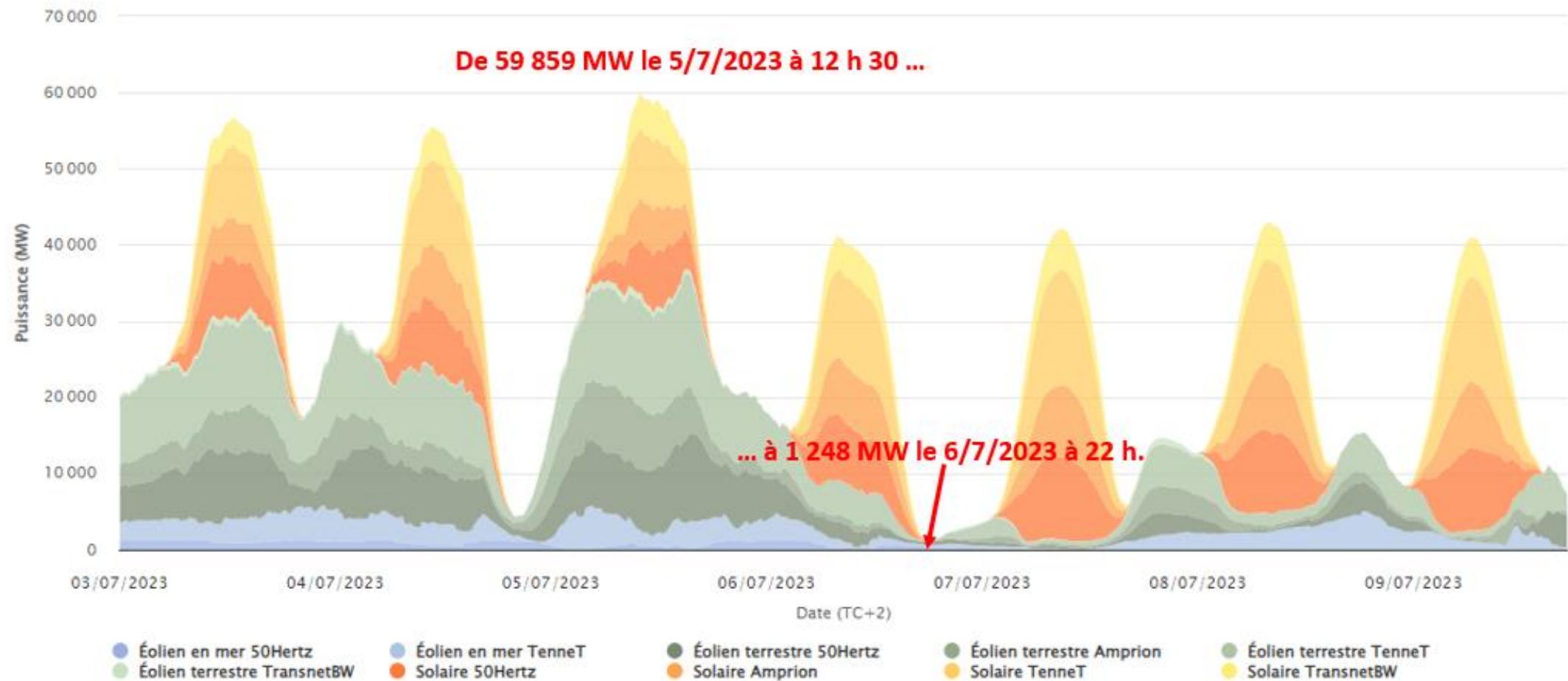


Heure	MW	écart MW	gradient GW/h
17:00	40 373		
17:15	38 480	-1 893	-7,57
17:30	36 643	-1 837	-7,35
17:45	34 481	-2 162	-8,65
18:00	32 339	-2 142	-8,57
18:15	29 381	-2 958	-11,83
18:30	26 118	-3 263	-13,05
18:45	23 069	-3 049	-12,20
19:00	19 863	-3 206	-12,82
19:15	16 963	-2 900	-11,60
19:30	14 533	-2 430	-9,72

... épisode nécessitant de redémarrer 15 réacteurs 900 MW dans l'heure ...

Complémentarité des EnRi, éolienne et solaire ???

Production publique nette d'électricité en Allemagne pour semaine 27 2023



Dispersion des productions hebdomadaires EnRi (vent + soleil)

Année	minima				f_c (%)
	GWh	sem	GW _{m-1}		
2015	592,5	4	76,51	4,61	
2016	1 012,6	50	89,28	6,75	
2017	908,1	3	90,11	6,00	
2018	1 439,9	42	102,7	8,35	
2019	1 608,2	45	109	8,78	
2020	1 600,3	50	115,5	8,25	
2021	1 623,6	1	116,5	8,30	
2022	1 356,5	49	133	6,07	
2023	1 424,2	4	133,8	6,34	
			f_c moyen	7,0	

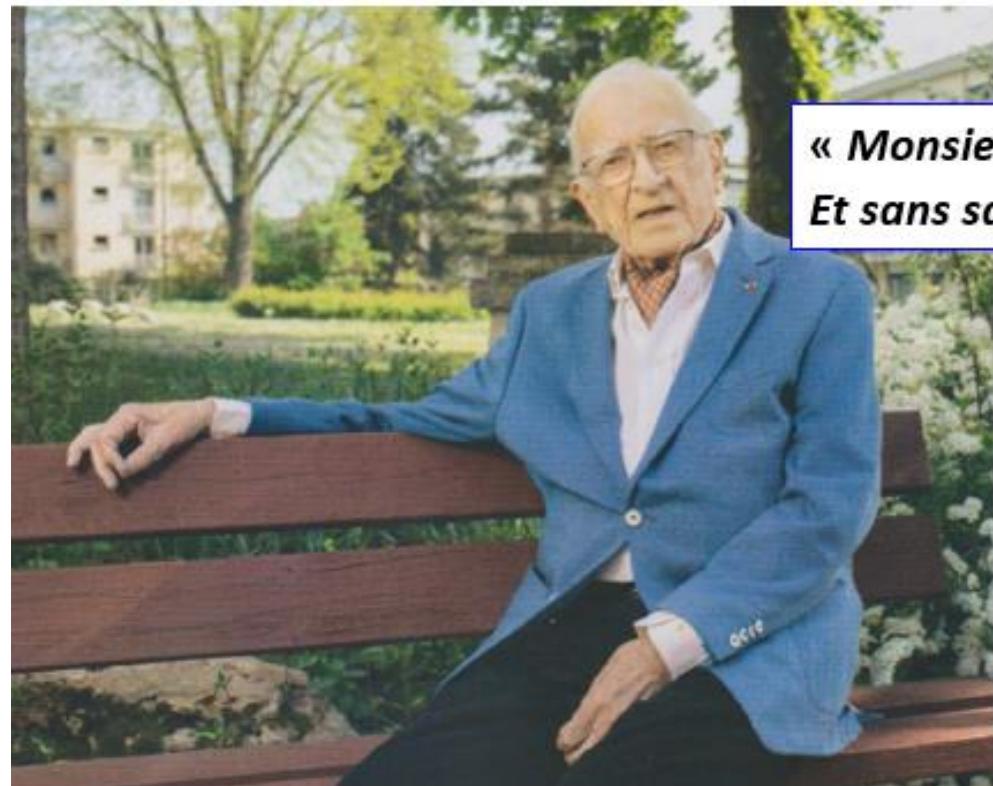
Maxima			
GWh	sem	GW _{m-1}	f _c (%)
3 986,3	52	75,3	31,51
4 060,7	4	83,8	28,84
4 661,8	8	90,66	30,61
4 738,5	49	104,1	27,09
6 116,8	11	105	34,68
6 445,6	8	110,3	34,78
4 872,6	10	117,6	24,66
6 580,2	7	124,4	31,49
6 505,5	51	150,4	25,75
		f _c moyen	29,9

Ratio
M/m
6,8
4,3
5,1
3,2
3,9
4,2
3,0
5,2
4,1

La dispersion (rapport entre les productions hebdomadaires, max et mini sur une année) ne varie plus que du simple au double

**maxima (dus au vent) et minima (dus au manque de soleil)
sont manifestement plus fréquents en hiver**

« Il n'y a pas de marché pour un produit aléatoire »



**« Monsieur, achèteriez vous une voiture qui démarre 1 jour sur 4, ou sur 8 ?
Et sans savoir quel jour ! »**

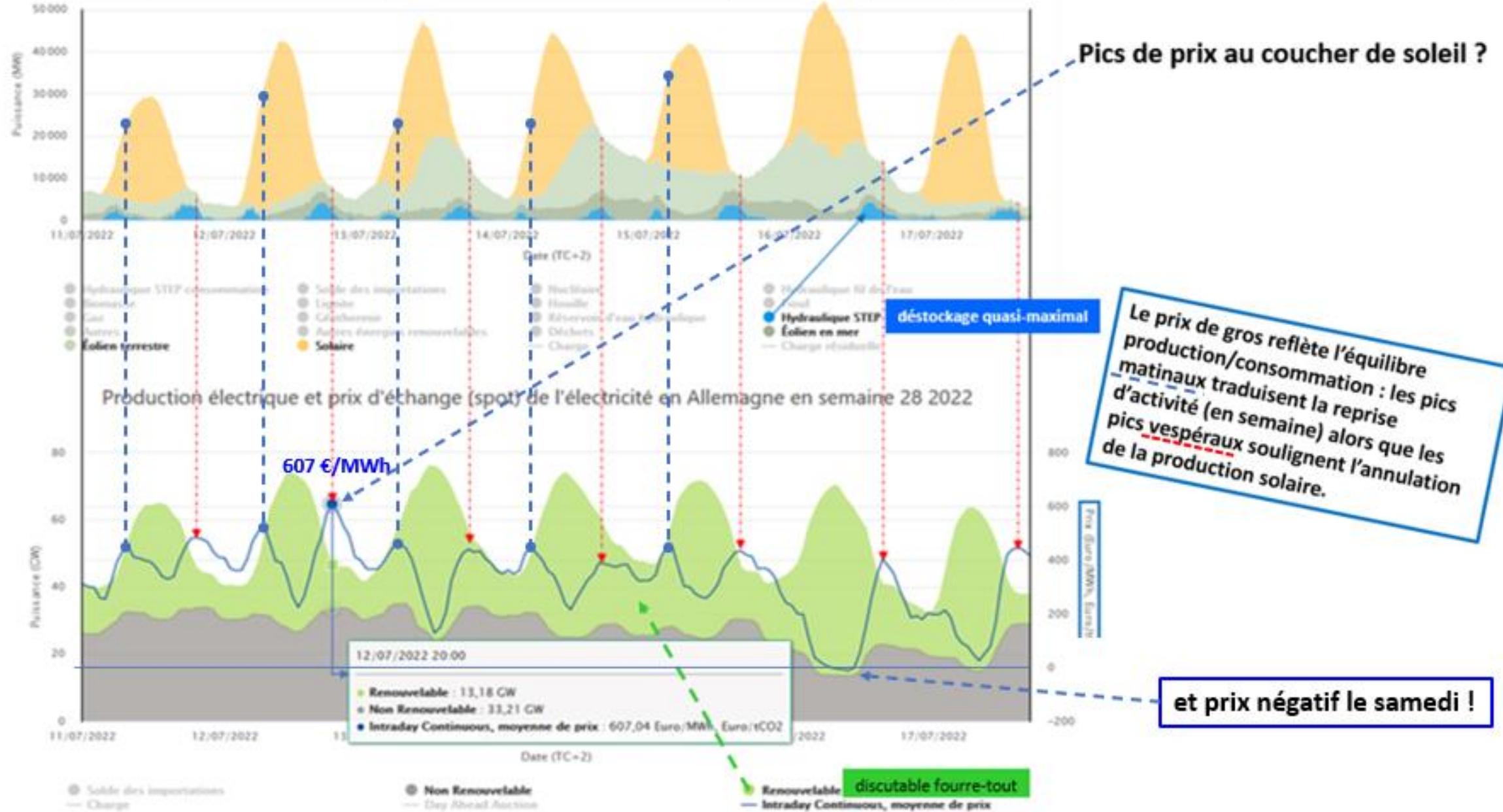
Marcel Boiteux (1922-2023) *

* Communiqué de l'Elysée, du 8 septembre 2023 :

Inlassable défenseur de l'atome, cette conviction faillit coûter à Marcel Boiteux sa vie, en 1977, au cours d'un attentat à son domicile. Successeur en 1977 comme PDG d'EDF d'un autre artisan de l'Etat stratège, Paul Delouvrier, Marcel Boiteux continua d'approfondir et de déployer pendant dix ans sa vision et son ambition pour la Nation. A son départ de l'entreprise en 1987, 58 réacteurs électronucléaires étaient en activité ou en construction, véritable performance technologique, économique et humaine.

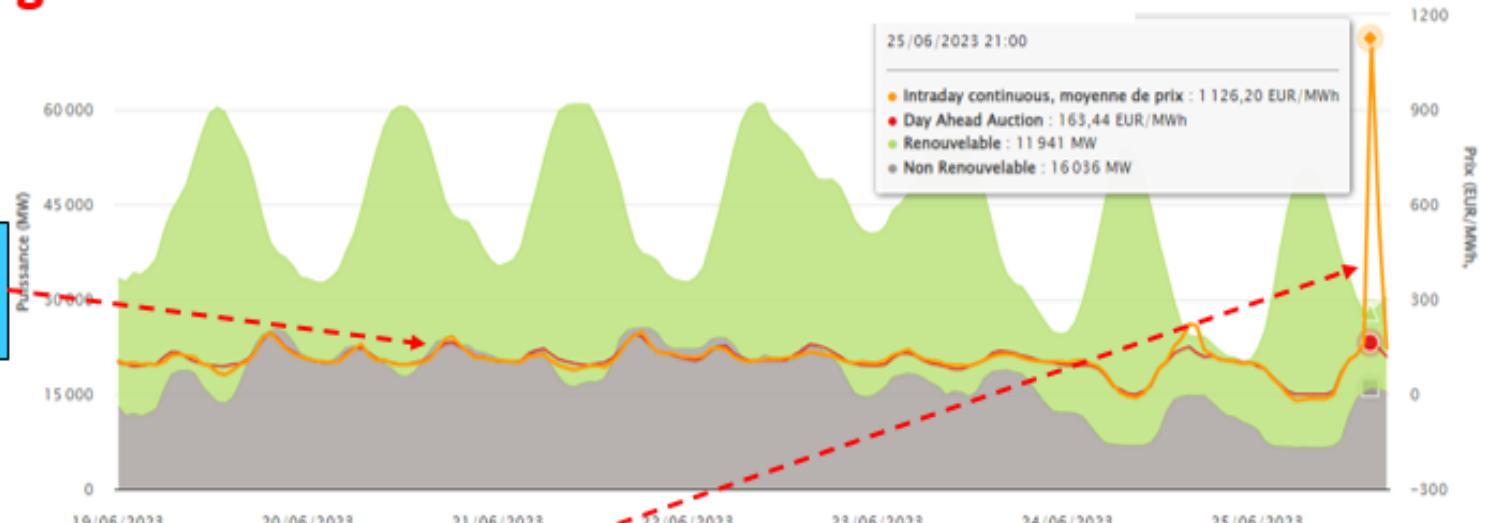
« J'ai toujours répugné à me lancer dans une action dont je ne puisse penser que d'une façon ou d'une autre, elle pourrait contribuer au bien public », écrivait, dans sa correspondance, Marcel Boiteux.

Impact des énergies fatales sur les prix de gros, par l'offre et la demande



Production électrique et prix de gros allemands en semaines 25 et 26 2023

En jours ouvrés, les prix de gros * suivent assez fidèlement la production pilotable



En jours fériés, tout dépend du niveau de la production fatale, sauf recours manifeste à la climatisation** : à 18 h, 27,4 °C le 25 juin, seulement 20,8 °C le 2 juillet ...

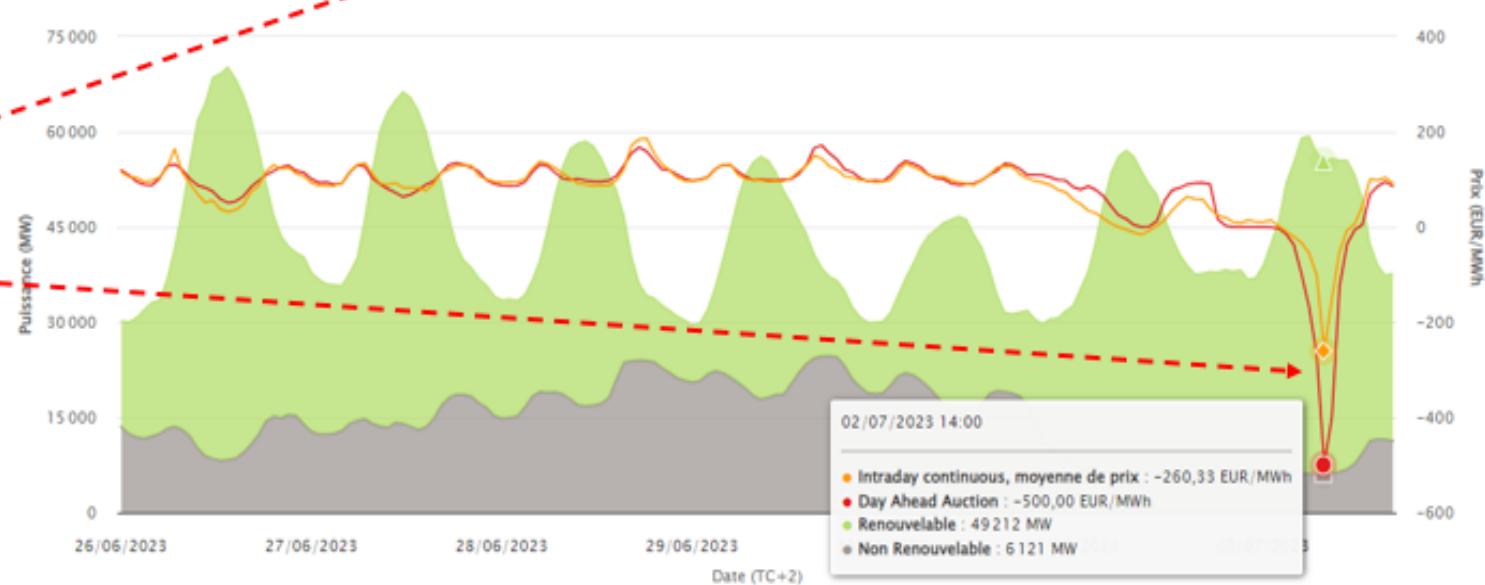
* Day Ahead Auction : enchère passée la veille

Prix en temps réel : pour le jour même prix qui n'est plus affiché que le lendemain ...

** La température de l'air en Allemagne est donnée sur

https://energy-charts.info/charts/climate_hours/chart.htm?l=fr&c=DE&source=air_temperature&year=2023&month=07&legendItems=

Production électrique et prix d'échange (spot) de l'électricité en Allemagne pour semaine 26 2023



Hydraulique-STEP consommation
Renouvelable
Intraday continuous, moyenne de prix

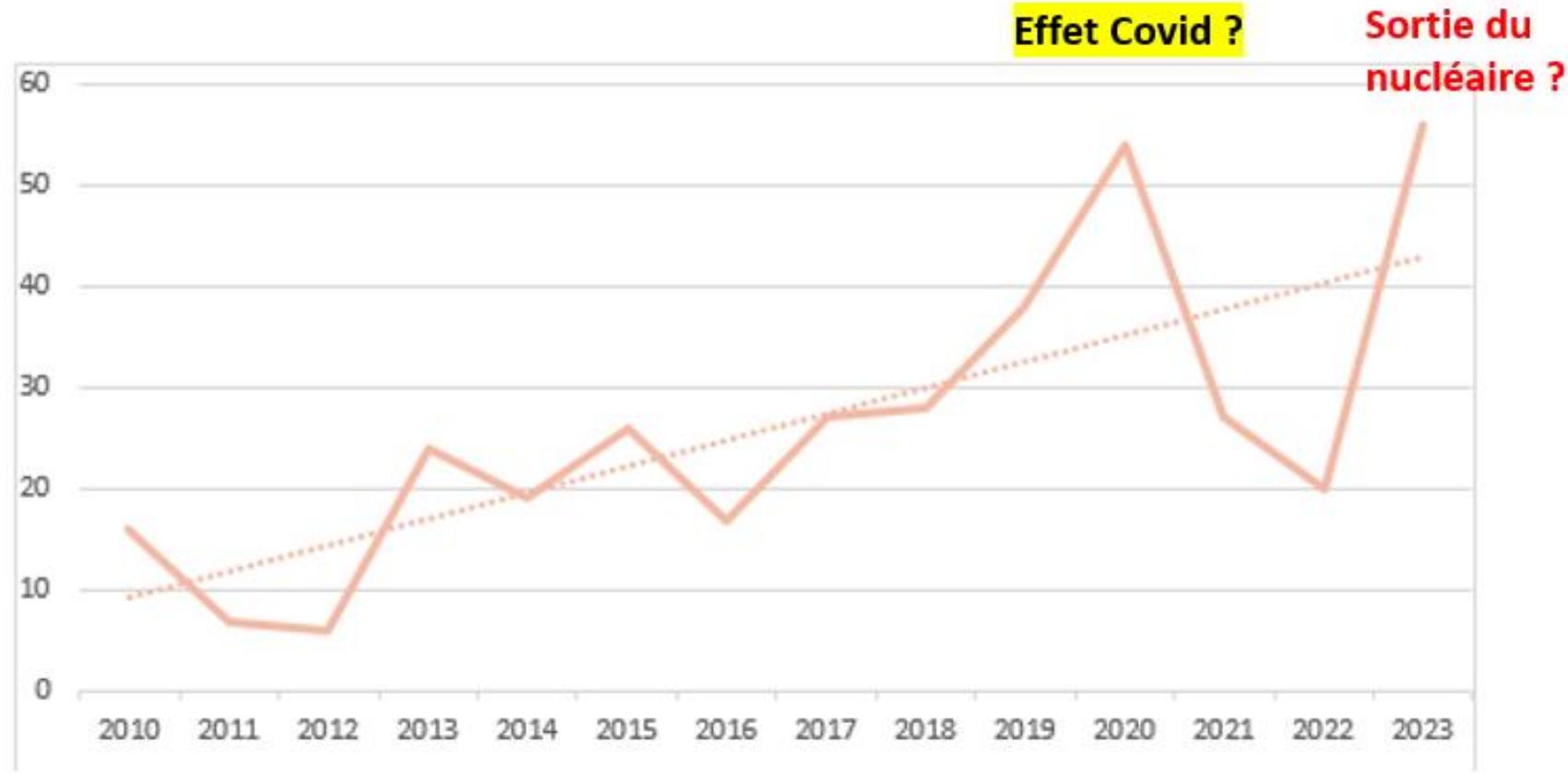
Les échanges commerciaux aux frontières
Charge
Intraday auction: moyenne des enchères de 15-min

Non Renouvelable
Day Ahead Auction
Intraday continuous: prix le plus bas

De plus en plus de prix négatifs

Nombre de jours à **prix spot négatif** au moins une fois dans la journée

2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
16	7	6	24	19	26	17	27	28	38	54	27	20	56



en Allemagne, comme
dans l'UE 

... tendance soulignée par *Briefing Energie* du 20 mars 2024

UE - Pour la première fois en 2023, les énergies renouvelables représentent plus de la moitié de la capacité installée totale dans l'UE - La capacité installée des centrales électriques conventionnelles (gaz et charbon) est restée stable, analyse l'**Agence de coopération des régulateurs européens de l'énergie (Acer)** dans son [rapport](#) sur le marché de l'électricité paru ce 20 mars. Pour la première fois, l'électricité éolienne dépasse la production de gaz et de charbon, constate l'Acer tout en relevant que l'industrie de l'éolien « *reste affectée par des procédures d'autorisation complexes* ». **Conséquence de cet essor des renouvelables, des prix négatifs pour l'électricité (6 470 occurrences annuelles) ont été douze fois plus fréquents qu'en 2022 (558 occurrences)**. Une tendance qui fait dire à l'Acer que l'intégration du marché doit encore être améliorée et que les solutions de flexibilité doivent être développées (pour éviter que la surproduction à un temps T ne tire trop les prix à la baisse). Les prix de l'électricité (comme ceux du gaz) ne sont toutefois pas revenus aux niveaux d'avant la pandémie et « *continuent de poser des problèmes d'inflation et de compétitivité dans de nombreux pays de l'UE* », note l'Acer.

Prix négatifs les plus marquants de l'année 2023 (*Intraday* < - 10 €/MWh) :

... quasi tous en jours fériés

		h	€/MWh
dimanche 2 juillet 2023		14	-260,33
dimanche 28 mai 2023		14	-252,84
10/04/2023 : lundi de Pâques		14	-241,25
29/05/2023 : lundi de Pentecôte		14	-149,54
dimanche 30 avril 2023		12	-116,90
dimanche 24 septembre 2023		14	-47,59
dimanche 16 juillet 2023		14	-44,68
dimanche 21 mai 2023		14	-31,82
dimanche 23 juillet 2023		10	-26,41
dimanche 30 juillet 2023		13	-26,31
samedi 20 mai 2023		13	-25,86
dimanche 4 juin 2023		14	-24,38
dimanche 11 juin 2023		13	-21,62
dimanche 25 juin 2023		11	-19,43
18/05/2023 : Ascension		14	-17,15
25/12/2023 : Noël		4	-15,67
mardi 26 décembre 2023		0	-13,95
vendredi 29 décembre 2023		0	-13,10
dimanche 3 septembre 2023		14	-12,81
samedi 24 juin 2023		14	-10,33
dimanche 7 mai 2023		13	-10,10
dimanche 10 septembre 2023		14	-9,99

prix négatif de 9 à 14 h.

prix négatif de 13 à 15 h.

prix négatif de 13 à 15 h.

prix négatif de 23 à 14 h.

prix négatif de 23 à 5 h.

... et à la mi-journée !

Mais le solaire engendre aussi des pics de prix de plus en plus fous :

Année	Nb de pics de prix journaliers (en €/MWh) supérieurs à ...										
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
2010	18										
2011	12										
2012	17	2									
2013	10										
2014	3										
2015	1										
2016	2										
2017	12	1									
2018	9										
2019	5	2	1								
2020	14	3	1	1	1						
2021	191	82	28	6	1						
2022	354	300	176	125	58	30	13	3	1		
2023	325	65	10	7	3	1	1	1	1	1	

... qui se produisent souvent **à la tombée du jour** :

Année	Pic annuel			
	€/MWh	mois	jour	heure
2010	190,00	12	2	18
2011	128,98	11	14	18
2012	272,95	2	7	9
2013	163,44	4	5	12
2014	139,12	7	21	11
2015	121,66	8	31	20
2016	114,70	1	21	17
2017	200,43	1	31	17
2018	180,59	12	14	13
2019	312,41	6	25	20
2020	554,69	9	15	19
2021	574,94	12	21	17
2022	932,42	8	21	21
2023	1 126,20	6	25	21

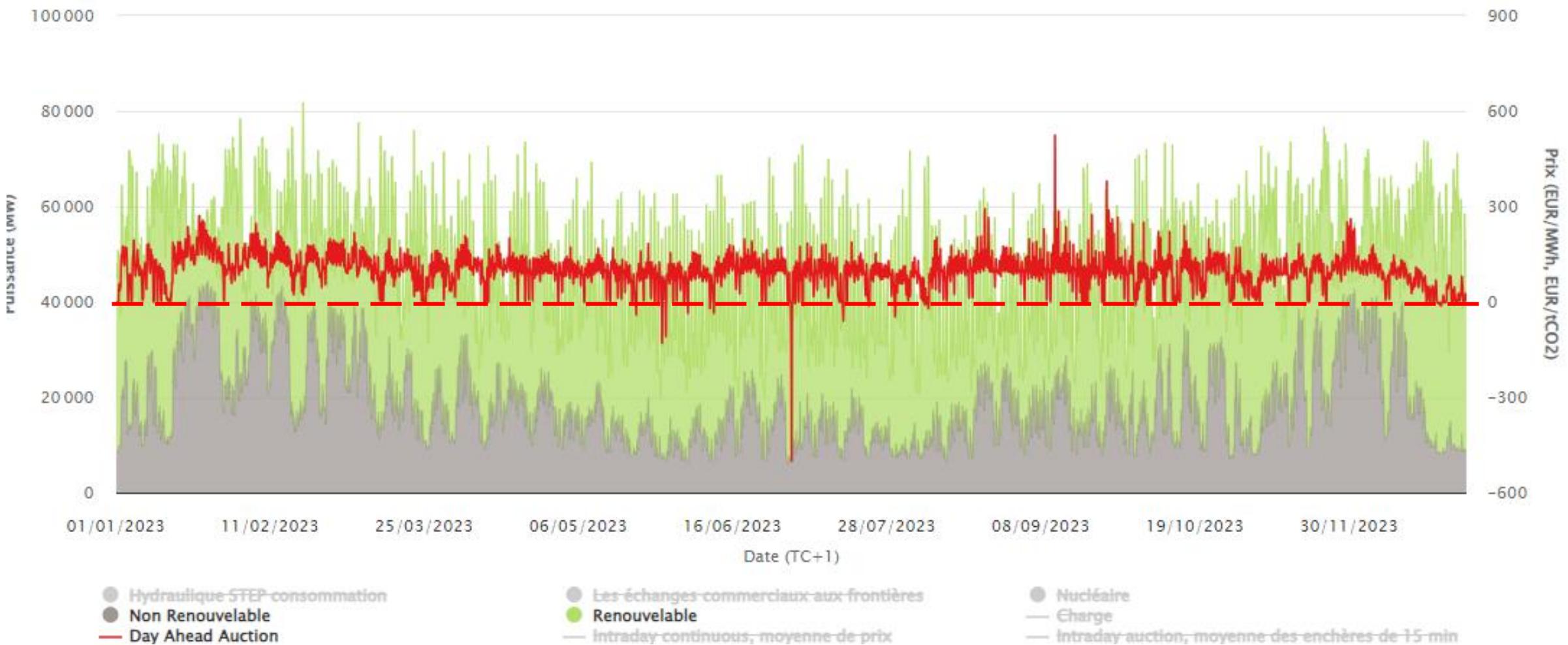
et 137,30 €/MWh à 18 h

solstice de juin 2023

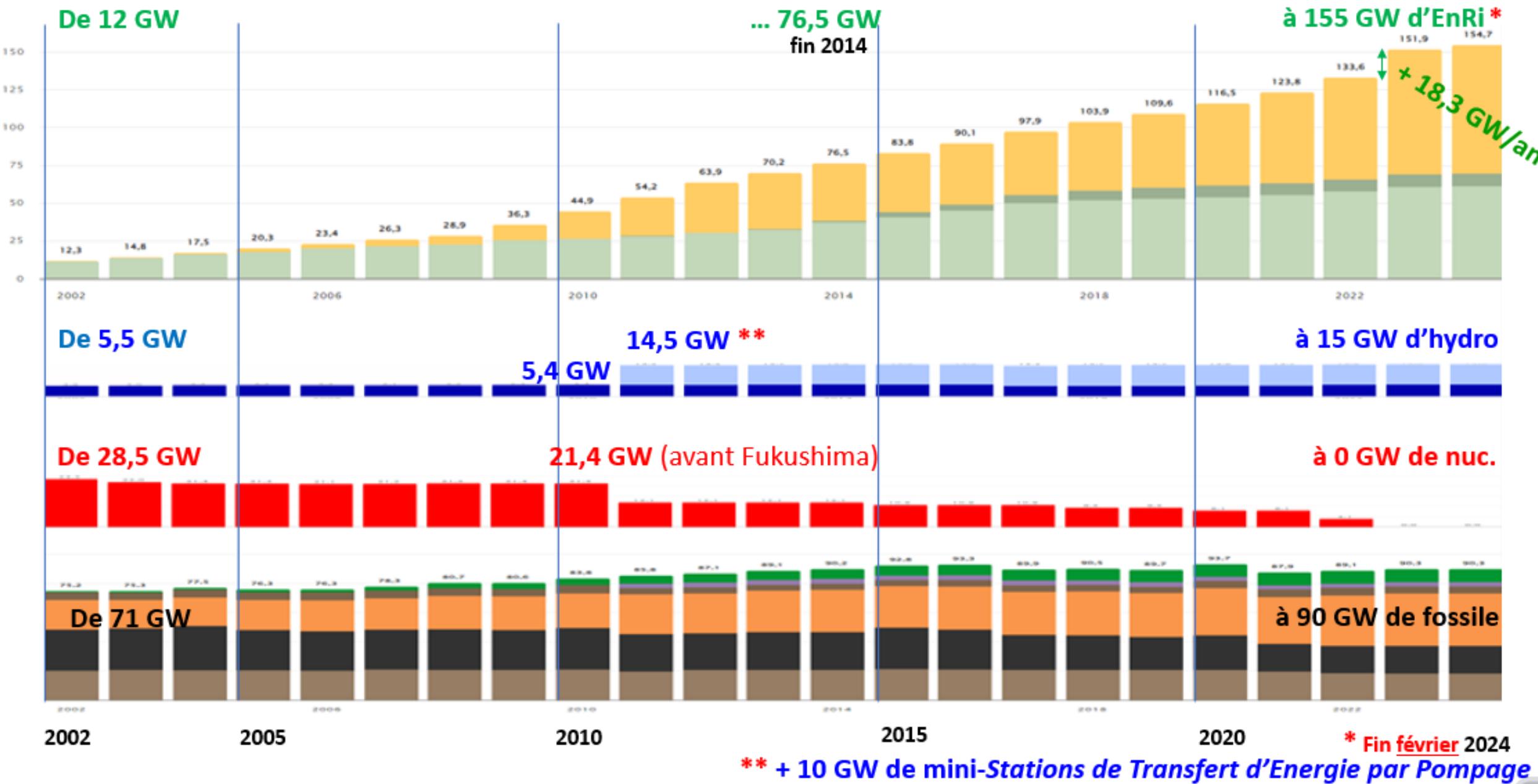
Nouvelles dispositions : depuis août 2023, les producteurs intermittents ...

... sont payés pour ne plus produire en cas de prix négatifs !

Production électrique et prix d'échange (spot) de l'électricité en Allemagne 2023

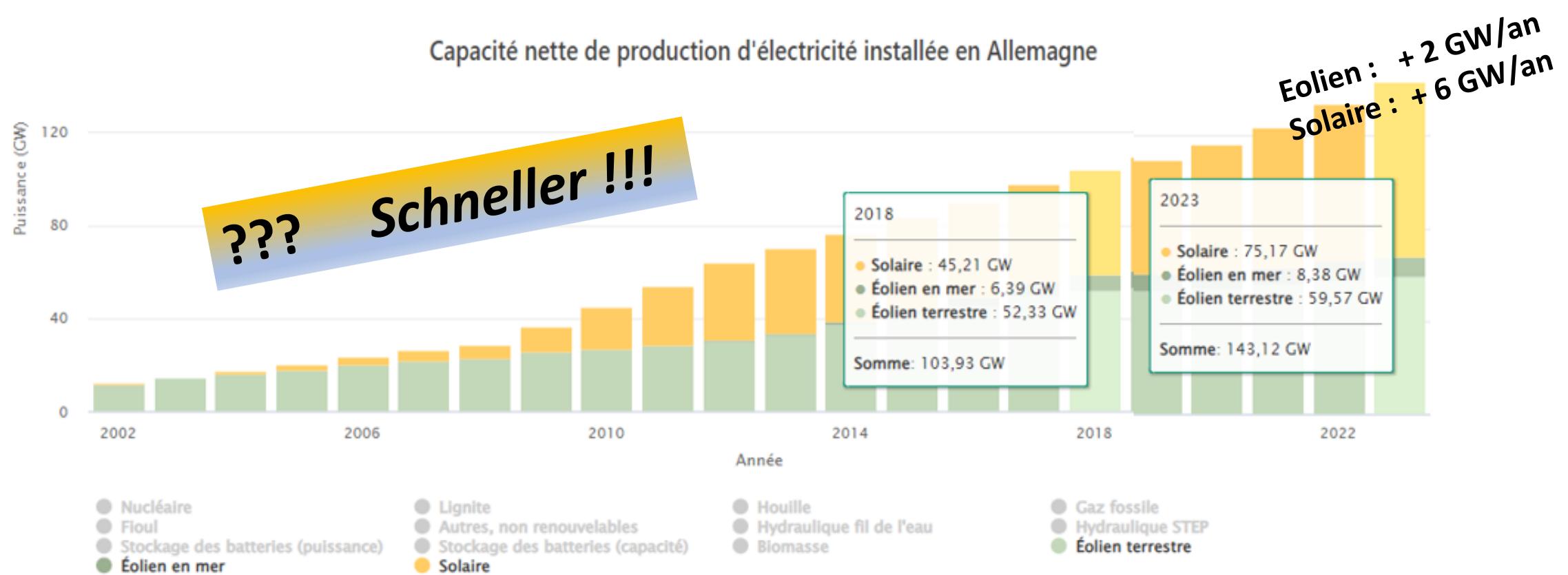


Evolution de la capacité nette de production d'électricité installée en Allemagne (en fins* d'année)



Faut-il accroître les parcs d'EnRii ?

- Cela ne peut accroître substantiellement leur contribution quand celle-ci est minimale (notamment pour le PV).
- Mais cela perturbe tout le réseau si leur contribution est **intempestive** : cas des gradients solaires, proportionnels à la puissance PV installée.
- Surtout, « *il n'y a pas de marché pour une fourniture aléatoire* » (Marcel Boiteux)



« Perspectives » françaises d'évolution de la capacité nette de production d'électricité



L'ambition est :

- de **multiplier par 5** la production d'électricité solaire pour atteindre **100 GW** de capacité installée (93 TWh de production **),
- de **multiplier par 2** l'éolien terrestre pour arriver entre **40** et **45 GW** de capacité,
- et de porter la production d'éolien offshore, qui atteint à peine 1 GW, à **45 GW**

d'ici à 2050 (la moitié du chemin devant être réalisée en 2035).

Cela implique la construction de 1000 mâts dans nos eaux : « c'est un sujet à discuter, pose **Roland Lescure**. Nous avons le chemin et les objectifs. Il nous faut discuter des choses concrètes et de la méthode pour atteindre ces objectifs. Sur l'éolien terrestre, par exemple, le doublement des capacités de production éoliennes se fait-il en doublant le nombre de mâts ou en doublant la puissance des mâts installés ? Comment s'assurer que les régions où il n'y a pas d'éoliennes contribuent à l'effort collectif ? Alors que dans certaines, **ce n'est pas le vent qui manque***** mais la volonté d'y aller ».

* Versus **155 GW** en Allemagne ...

** Louable précision, impliquant un facteur de charge de **10,6 %**

*** Comme en Normandie ?!

Il faut passer au solaire thermique (de simples tubes de métal avec de l'eau dedans)

- ne nécessite que des matériaux « *triviaux* »
- de moindre coût
- disponibles, sans importation du bout du monde :
 - ni transport ni impact carbone associé,
 - indépendance
 - bon pour notre balance commerciale
- accessibles à nos professionnels (chaudronnerie)
- recyclables ...
- ni **impact sur le réseau électrique** (donc hors « *monopole d'EDF* » !), ni déstabilisation (gradients ...)
- sans conséquence sur le **marché de l'électricité** (rationalisation des échanges)
- alliant production de chaleur et **stockage** (~~batterie en tampon~~) !

Et pourquoi pas des STEP (pour stockage, flexibilité) ?

- Dans la lignée des Revins, Montézic, Grandmaison, Super-Bissorte ...
- Projets du Clou, Villard d'Arène, Redenat, Orlu ... vraisemblablement inacceptables.

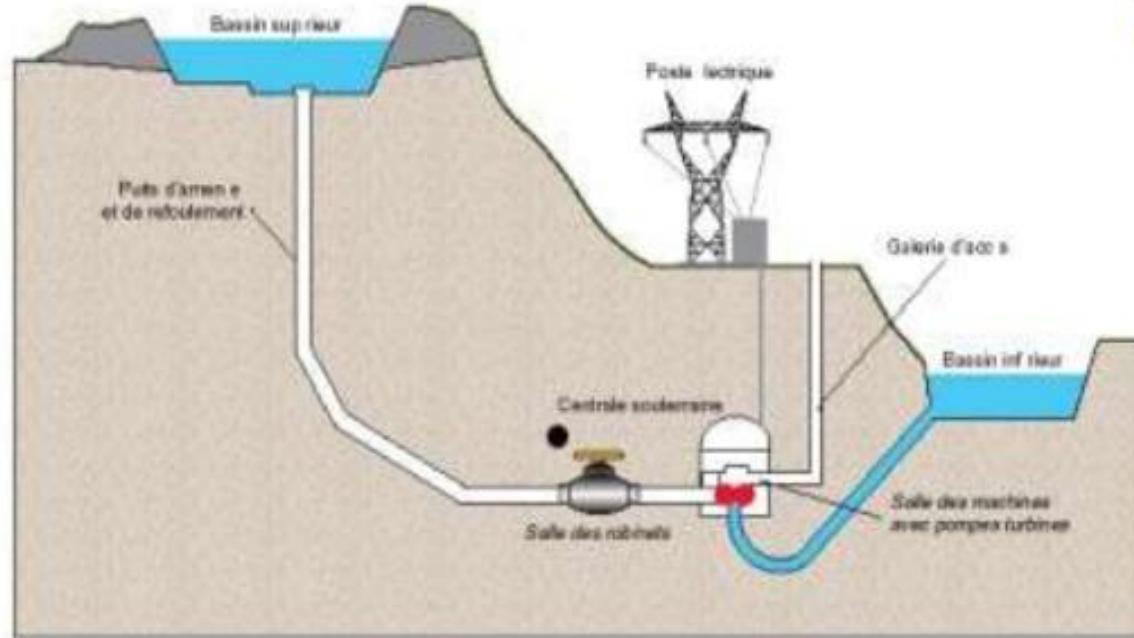


Fig. 2 : Schéma de principe d'une STEP – source : www.debatlyonchambery.org

« Les stations de pompage (STEP) », Encyclopédie de l'énergie J-F. Tournery déc-15



Bassin supérieur sous le col du Glandon,
usine à Vaujany
et bassin inférieur à Allemont

Plutôt des mini-STEP (à l'allemande) ?

- ... moins provoquantes, bien qu'il s'agisse de « bassines » !
- dans nos stations alpines et pyrénéennes, qui offrent plus de dénivelé que les collines de la Rhénanie du Nord

Centrale de Koepchenwerk,
près de Herdecke(RWE)



Au juste, l'électricité, c'est quoi ?

On n'achète pas de l'électricité au kilo, ou au baril, non !

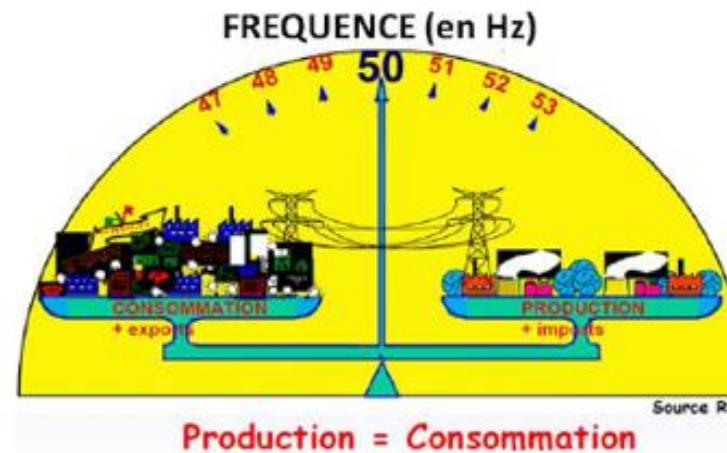
Ce n'est pas une matière, comme du mineraï. Ni du liquide comme du pétrole !

L'électron ne vaut pas par sa masse mais par son ... agitation.

L'électricité est donc un « service » insaisissable (quand on y touche, c'est nous qui sommes « saisis » !) et peu descriptible :

analogie possible à une fièvre dont on mesure le degré par la notion de « fréquence » ?

La fréquence est un indicateur, à tout instant, de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité.

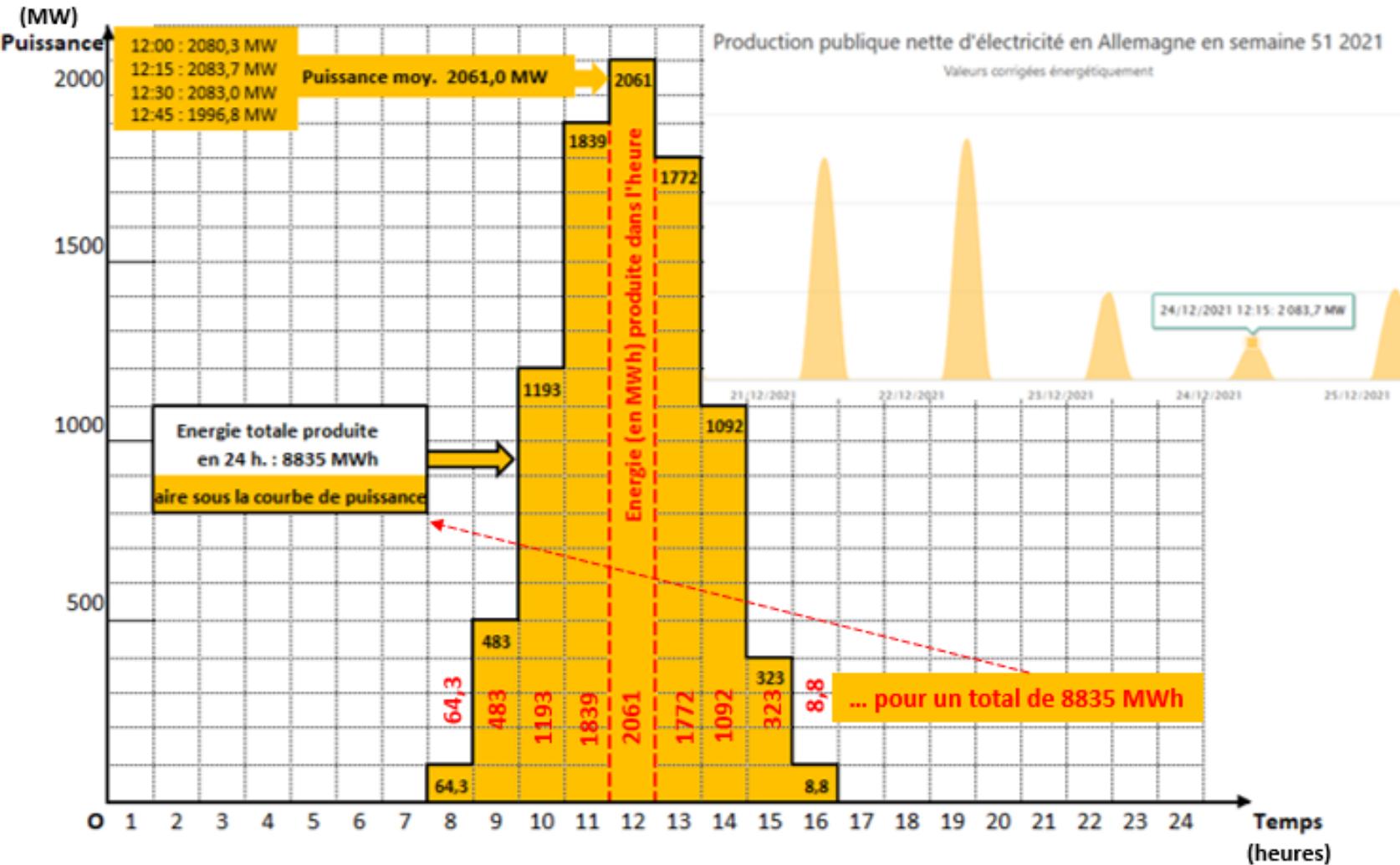


Si la demande est supérieure à l'offre, la fréquence baisse.

Si l'offre est supérieure à la demande, la fréquence augmente.

Hors de la plage, risque de « *black-out* » (comme le 4 novembre 2006, d'Allemagne à Gibraltar !) ...





Pour ne pas confondre kW et kWh
... à l'instar des simples km et km/h
ou des milles et noeuds marins !!! *

Notions de puissance (en Watt), énergie (en Joule ou kWh) et « facteur de charge » en %

L'**énergie produite** en cette veille de Noël 2021, soit **8.835 MWh**, représente une **puissance moyenne de 368 MW**.

Rapportés aux **58,98 GW** solaires alors installés en Allemagne, ces **0,368 GW** donnent un rendement, ou **facteur de charge** de **0,62 %**.

* Rappel : les préfixes k (kilo), M (méga), G (giga), T (téra) ... multiplient l'unité par 1000, 1 million, 1 milliard, 1 billion ...

En termes mathématiques, l'énergie produite, sur une durée donnée, est l'intégrale temporelle de la puissance.

Il en est de même pour :

- un **volume** d'eau, de gaz, de fuel ... exprimé en litres ou en m^3 , intégrale du **débit** (différence entre alimentation et consommation) exprimé en l/sec ou m^3/h ;
- ou une **distance** parcourue (en km) par un véhicule ou un individu, intégrale de sa **vitesse** (qui **doit** être exprimée en km/h *).

En termes économiques, la facture d'électricité d'un client se compose de 3 parties :

- l'abonnement, qui est fonction de la **puissance** souscrite (en kW ou kVA), représentative de ce que peut exiger le client,
- la consommation, proportionnelle à l'**énergie** soutirée par celui-ci (en kWh)
- et les taxes afférentes (CSPE**, TURPE***, etc...).

Energie et **puissance** sont donc des notions bien distinctes que trop d'observateurs non scientifiques (clients, décideurs politiques, journalistes, ...) ont bien du mal à différencier, ce qui ne facilite pas les débats.

* Et non pas, comme trop souvent dans le langage courant, en **kmh** (prononcé « *kilomètres-heures* »), **unité inexistante** !

** « *Contribution au Service Public d'Electricité* », devenue « *Taxe Intérieure sur la Consommation Finale d'Electricité* », puis « *accise* » : « *impôt indirect portant sur certains produits ou objets de consommation (alcool, bijoux, carburant, tabac, etc.)* », selon Larousse !

*** *Tarif d'Utilisation des Réseaux Publics d'Electricité*

Un prix négatif, quésaco ?

Oui, ça existe dans l'électricité, depuis que la bourse EPEX (*European Power Exchange*) en a accepté l'usage, en **2009**.

Enerpresse du **9/12/2013** signalait que « EPEX Spot, appelle [...] « *des outils flexibles de négociation à court terme (qui) permettront de maîtriser la transition énergétique tout en maintenant la sécurité d'approvisionnement.* » [...] EPEX insiste, martelant que « *les prix négatifs envoient un signal fort en matière de flexibilité de production et de capacités de stockage.* » J-F. Conil-Lacoste, président du directoire d'EPEX Spot, ajoute que « *les marchés doivent évoluer vers plus de flexibilité, sinon des sources intermittentes* [sic !] *d'électricité continueront à échapper aux mécanismes de marché. Il est crucial que les renouvelables soient globalement intégrés pour une transition énergétique rentable* [re-sic !]. »

Enerpresse du **14/03/2014** : « *EPEX, bourse de l'électricité spot basée à Paris, a enregistré, ce dimanche, un nouvel épisode de prix négatifs sur le marché allemand (et autrichien). Le prix en base (la veille pour le lendemain, soit samedi pour dimanche) s'est établi en moyenne à - 4,13 euros/MWh, mais cette cotation descend à - 37,71 €/MWh pour les heures du « petit matin » (5 h à 8 h). Le record horaire de prix négatif s'établit à - 60,26 €/MWh, avec une forte poussée des échanges sur ces périodes, les producteurs, cherchant à évacuer beaucoup plus de courant qu'il n'est appelé par le réseau.* Cause principale de cette « anomalie » : *la forte montée en puissance des éoliennes allemandes (jusque 25 GW en service sur les heures concernées, alors que le solaire PV a plafonné à 5 GW au pic du soleil) et une demande très faible un dimanche agréable quasi printanier dès [...] On note également que [...] l'Allemagne a été exportatrice sur ces périodes vis-à-vis de la France qui, exportait, elle, toute la journée vers d'autres pays. Comme d'habitude, il convient de rappeler qu'il s'agit d'échanges commerciaux. Autrement dit, le fait d'être importateur de courant « soldé » ne veut pas dire que l'on en manque !* »

Bref, un prix négatif résulte d'une consommation fictive :

- « **OFNI** » au plan Financier
- « **écocide** » au plan environnemental !

Surcoûts EDF liés à l'*obligation d'achat* (ou « complément de rémunération ») / marché

Les quantités d'électricité et les coûts d'achat prévisionnels déclarés par EDF en métropole continentale au titre de l'année 2023 sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Mise à jour des quantités d'électricité et coûts d'achat prévus par EDF au titre de 2023

	Cogénération gaz	Hydraulique	Eolien à terre	Eolien en mer	Incinération	Biogaz	Biomasse	Photovoltaïque	Surplus des ELD	Gaz de Mines	TOTAL
Quantités (GWh)	5 494,7	2 777,9	18 954,9	2 077,2	235,9	2 198,8	1 737,3	14 336,9	161,1	46,4	48 021,1
Prévision initiale pour 2023 (GWh)	4 089,5	2 861,2	19 875,7	2 749,6	305,2	2 242,8	2 218,9	13 769,7	191,8	110,8	46 475,5
Quantités en 2022 (GWh)	6 300,6	4 082,4	21 487,1	292,0	994,6	2 561,9	2 533,7	12 407,3	123,8	68,0	50 851,4
Coût d'achat (M€)	1 329,2	291,6	1 837,6	372,1	16,3	445,4	293,0	3 500,8	15,8	3,5	8 105,3
Prévision initiale pour 2023 (M€)	2 284,3	282,0	1 840,9	458,8	29,0	407,1	346,5	3 359,7	18,2	8,2	9 034,6
Coût d'achat en 2022 (M€)	2 073,9	370,1	1 992,1	49,5	60,4	476,0	397,7	3 254,9	11,9	5,0	8 691,6
Coût d'achat unitaire (€/MWh)	241,9	105,0	96,9	179,1	69,0	202,5	168,7	244,2	98,3	75,8	168,8
Prévision initiale pour 2023 (€/MWh)	558,6	98,6	92,6	166,8	95,0	181,5	156,2	244,0	94,9	73,8	186,6
Coût d'achat unitaire en 2022 (€/MWh)	329,2	90,7	92,7	169,6	60,8	185,8	157,0	262,3	96,5	74,3	170,9

Tarif de l'éolien terrestre = 2,3 x tarif ARENH

Tarif de l'éolien offshore = 4,3 x tarif ARENH

Tarif solaire photovoltaïque = 5,8 x tarif ARENH

La CRE estimait le surcoût de l'année 2023 à plus de 6 milliards ...

NB : **ARENH** = tarif d' « *Accès Réglementé à l'Electricité Nucléaire Historique* » au bénéfice des concurrents d'EDF, ce qui constitue une **vente à perte** (42 €/MWh, inchangé depuis 2012).

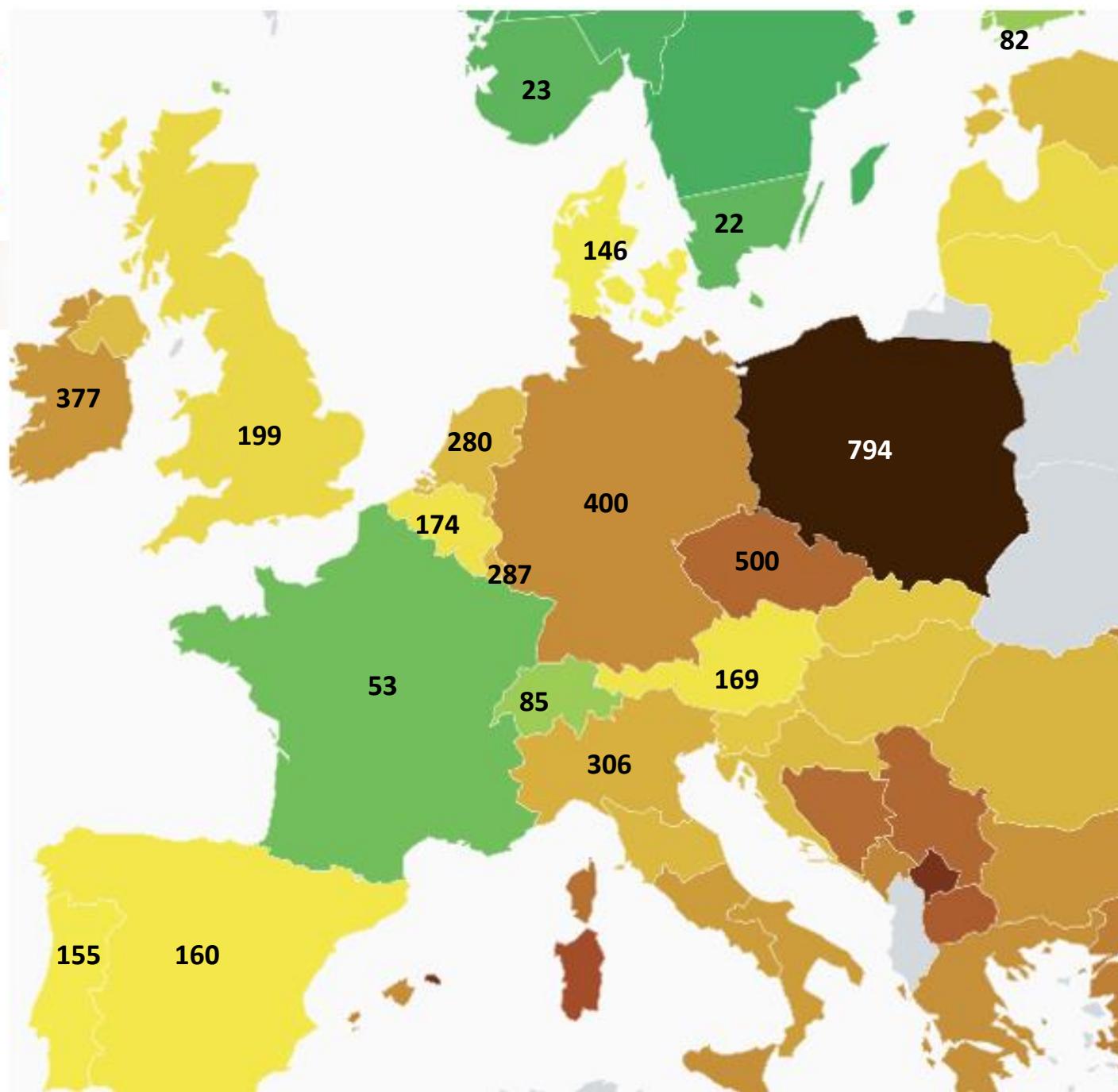
**Ann. 2 à délibération
CRE du 13/07/2023**

Intensité carbone (gCO₂-éq/kWh)

www.electricitymaps.com

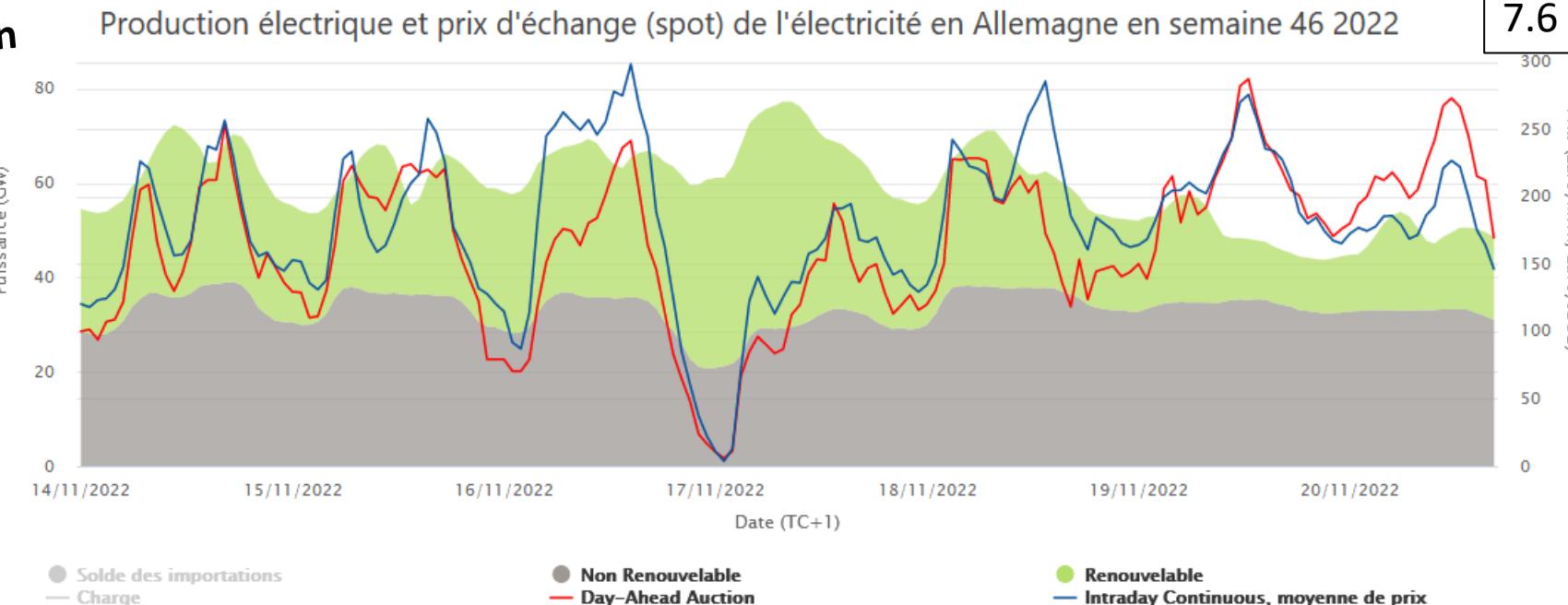


En temps réel et
... mémorisable Année 2023



Quand Fraunhofer varie sa présentation

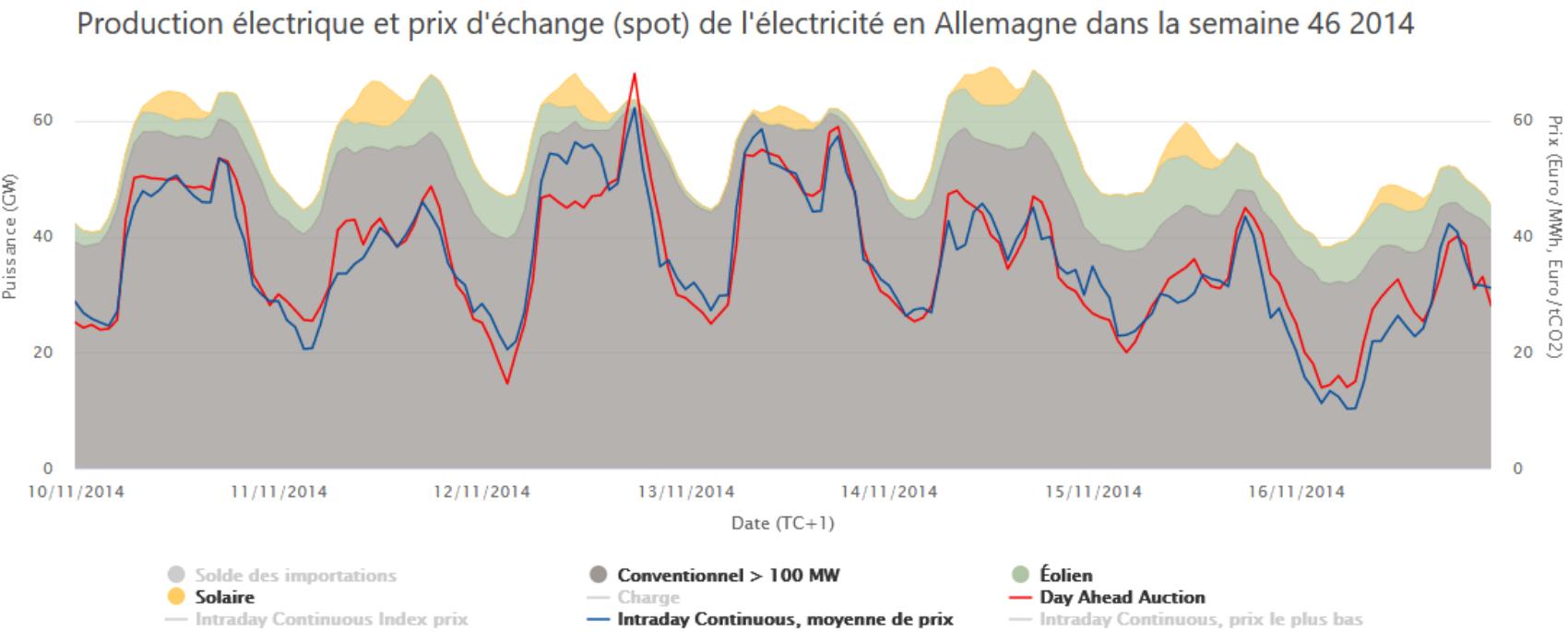
Fraunhofer a, courant 2021, modifié sa page « *production électrique et prix d'échange* », ne distinguant plus éolien et solaire, regroupés avec d'autres énergies (hydraulique, biomasse, etc...), sous l'appellation « *Renouvelable* » ...



Ceci avec effet rétroactif, jusqu'à l'année 2015 inclusive.

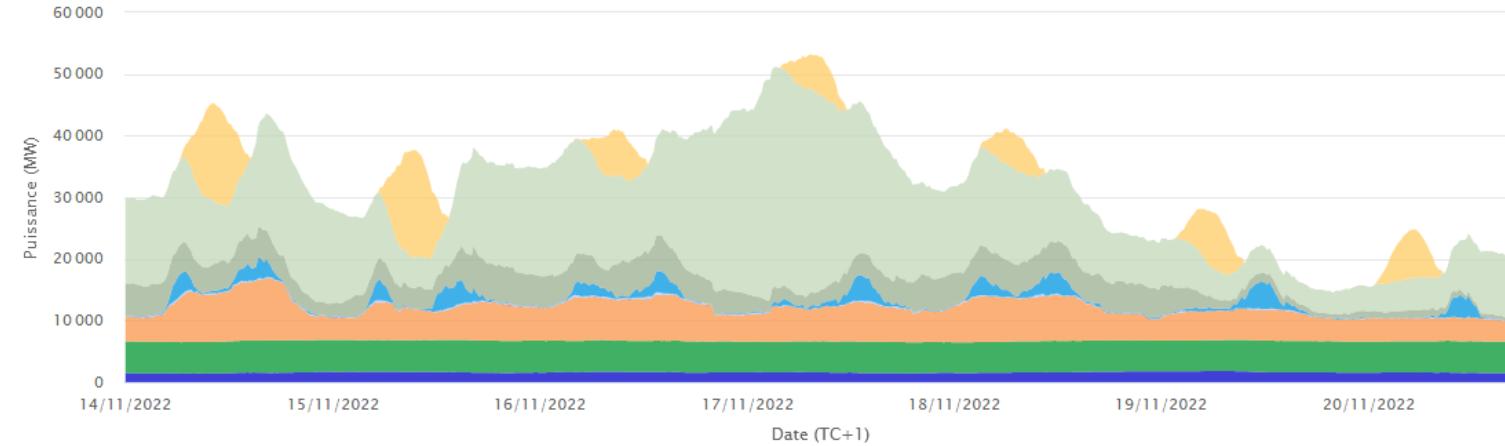
Sauts de vent un peu moins voyantes, sans parler de celles du soleil estival ...

A l'été 2023, nouvelle évolution : le prix spot *intraday* devient orange ... Pourquoi ?



Production publique nette d'électricité en Allemagne en semaine 46 2022

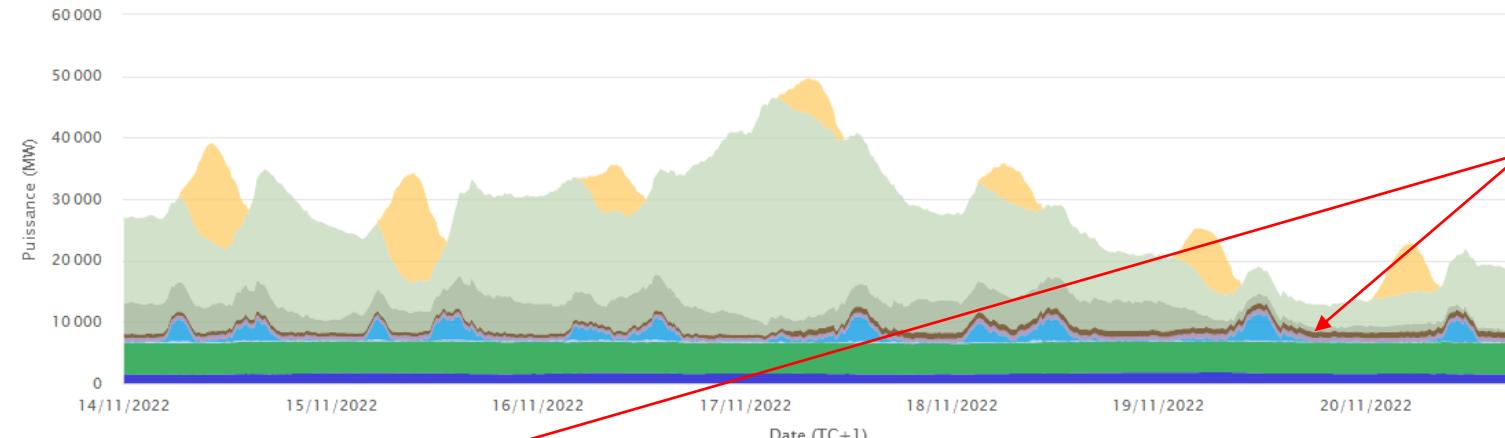
Valeurs corrigées énergétiquement



17/11/2022 06:30	
Valeurs corrigées énergétiquement	
● Solaire : 0,0 MW	
● Éolien terrestre : 35 985,7 MW	
● Éolien en mer : 1 775,7 MW	
● Déchets : 546,8 MW	
● Autres : 27,1 MW	
● Hydraulique STEP : 14,4 MW	
● Réservoir d'eau hydraulique : 83,7 MW	
● Géothermie : 18,7 MW	
● Biomasse : 4 970,4 MW	
● Hydraulique fil de l'eau : 1 549,3 MW	
Somme: 44 971,8 MW	

Production nette totale d'électricité en Allemagne en semaine 46 2022

Valeurs corrigées énergétiquement



17/11/2022 06:30	
Valeurs corrigées énergétiquement	
● Solaire : 0,0 MW	
● Éolien terrestre : 35 985,7 MW	
● Éolien en mer : 1 775,7 MW	
● Déchets : 546,8 MW	
● Autres : 482,7 MW	
● Hydraulique STEP : 14,4 MW	
● Réservoir d'eau hydraulique : 83,7 MW	
● Géothermie : 18,7 MW	
● Biomasse : 4 970,4 MW	
● Hydraulique fil de l'eau : 1 549,3 MW	
Somme: 45 427,4 MW	

« Autres » énergies ?
entre 200 et 800 MW,
essentiellement* privées.
Oui, mais quèsaco ?

Renouvelables
ou

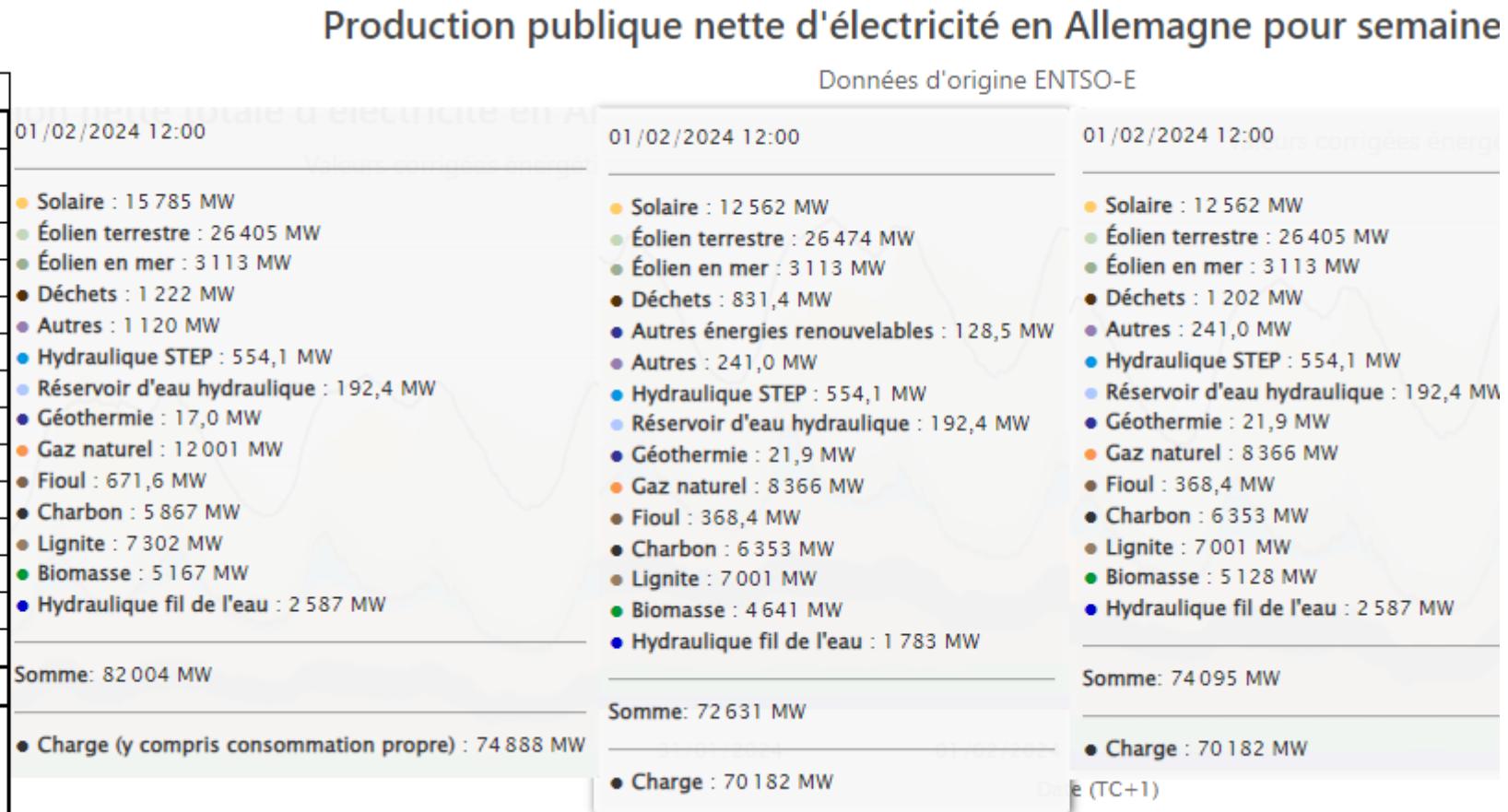
Non Renouvelables

???

*3,95 sur 4,23 TWh au 1^{er} semestre 2022,
mais ce n'est sans doute pas représentatif ...

Des différenciations bizarres (avec des erreurs ?)

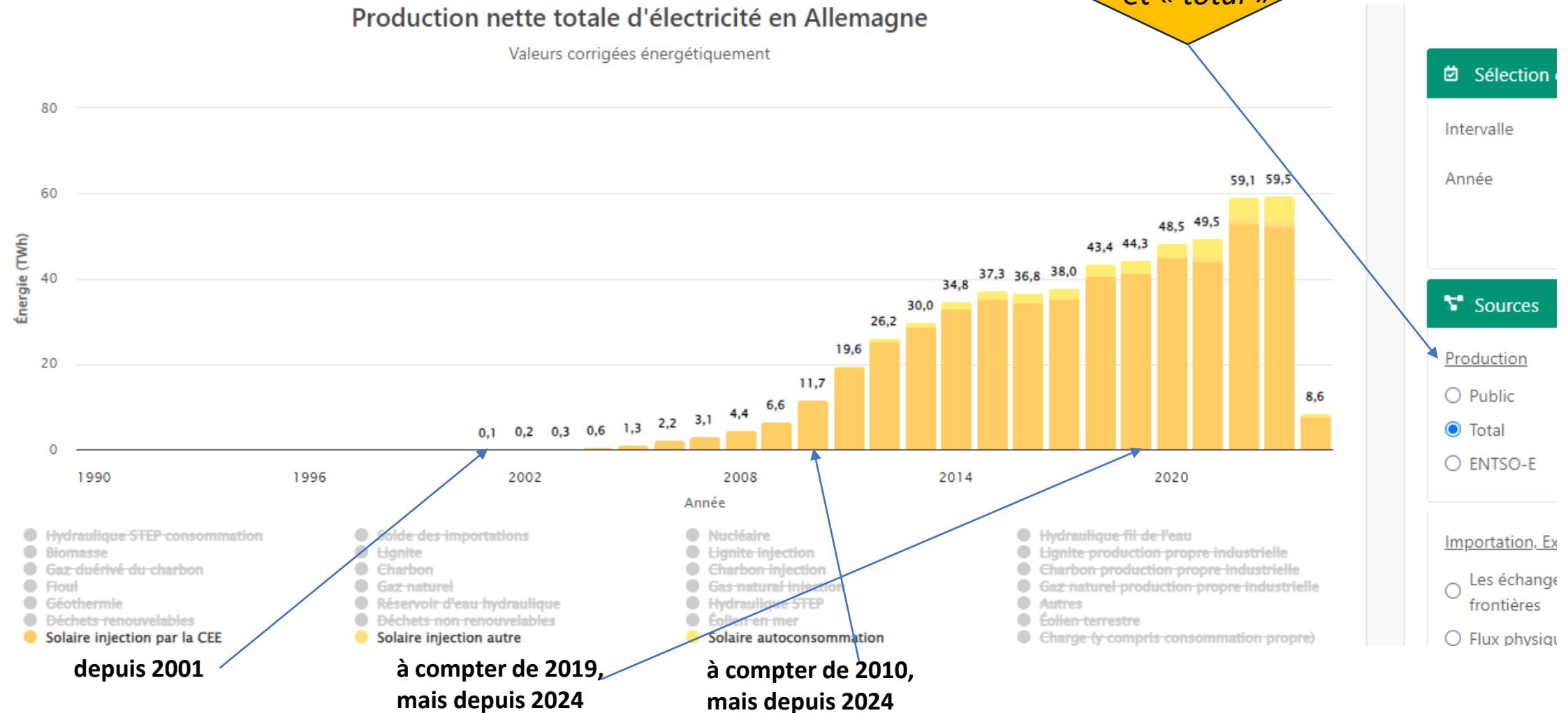
MW au 1/2/2024 à 12:00	Totale	ENTSO-E	Publique
Solaire	15 785	12 562	12 562
Eolien terrestre	26 405	26 474	26 405
Eolien en mer	3 113	3 113	3 113
Déchets	1 222	831,4	1 202
Autres EnR		128,5	
Autres (?)	1 120	241,0	241,0
STEP	554,1	554,1	554,1
Réservoir hydro.	192,4	192,4	192,4
Géothermie	17,0	21,9	21,9
Gaz naturel	12 001	8 366	8 366
Fioul	671,6	368,4	368,4
Charbon	5 867	6 353	6 353
Lignite	7 302	7 001	7 001
Biomasse	5 167	4 641	5 128
Hydro fil de l'eau	2 587	1 783	2 587
Somme	82 004	72 631	74 095
Charge	74 888 y c. cons. propre	70 182	70 182



La production « totale » ajoute à celle dite « publique » des productions autonomes solaire, « autres » (?), gaz, lignite et fil de l'eau.

Subtils et très récents distinguos

La production (en TWh) est maintenant différenciée mais pas la puissance installée (en GW) répartie entre « *public* » et « *total* »









POUR METTRE PLUS DE SCIENCE
DANS LES CONSCIENCES... ... ET DES FAITS
FACE AUX OPINIONS TOUTES FAITES!



ADHÉREZ À
PNC-FRANCE

Cotisation déductible des
impôts

©403
22

Cf. www.pnc-france.org