



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Innovation technologique
Liliane Bettencourt 2021-2022

Énergie solaire photovoltaïque et transition énergétique



Fondation
Bettencourt
Schueller

Reconnue d'utilité publique depuis 1987

Mercredi 16 Mars 2022

Photovoltaïque et transition énergétique Vision à 10 ans, 30 ans

Daniel LINCOT

Le futur à la lumière des expériences et évolutions
actuelles sur le plan local

André JOFFRE

daniel.lincot@cnrs.fr



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Innovation technologique
Liliane Bettencourt 2021-2022
Énergie solaire photovoltaïque et transition énergétique



Mercredi 16 Mars 2022

Photovoltaïque et transition énergétique visions à 10 ans, 30 ans

Daniel LINCOT



daniel.lincot@cirs.fr

Sous la direction de Jean-Michel LOURTIOZ,
Jane LECOMTE et Sophie SZOPA

assistés de Catherine EVEN et Guillaume ROUX



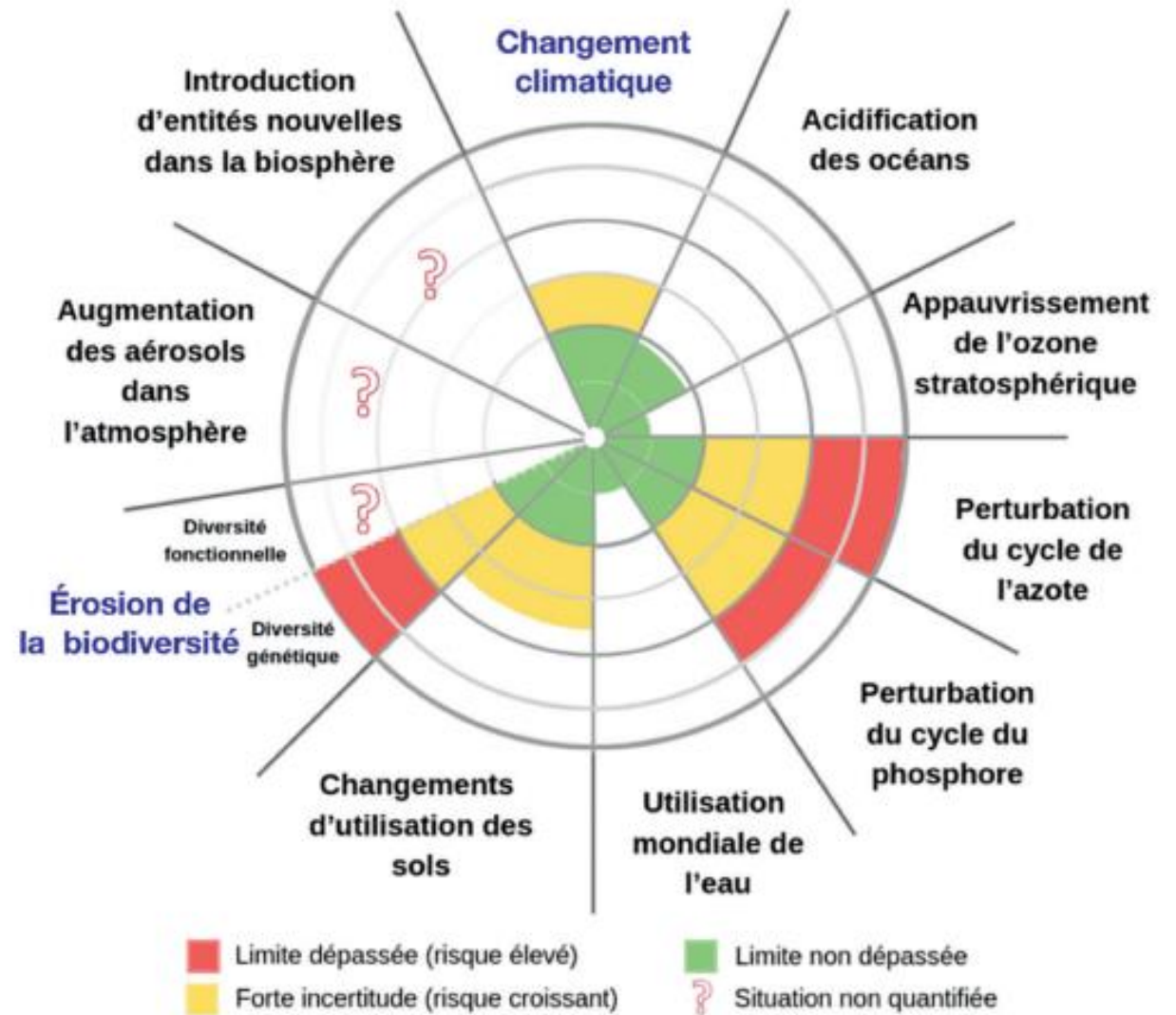
Enjeux de la transition écologique

Enseigner la transition écologique aux
étudiants de licence à l'université

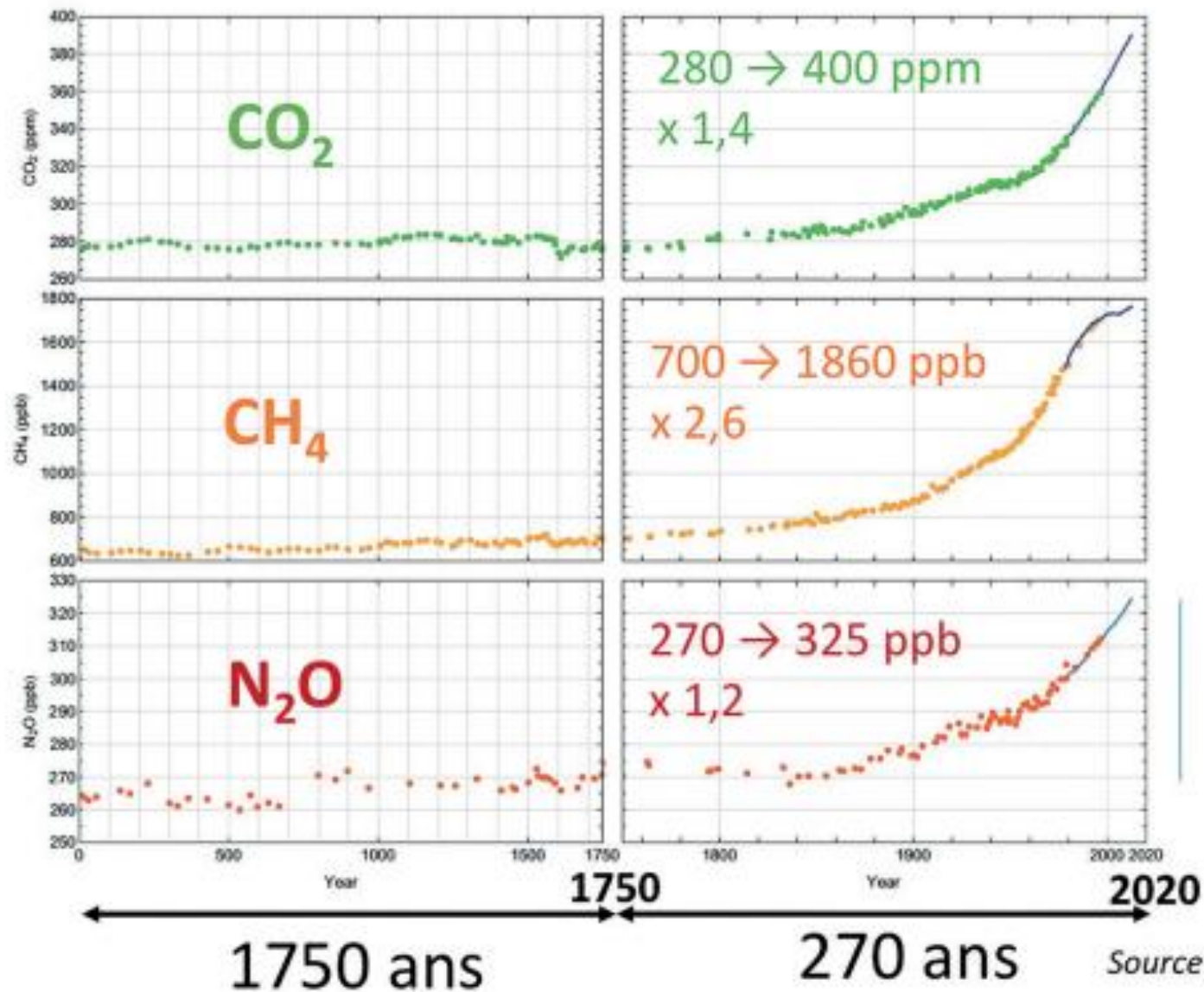
université
PARIS-SACLAY

edp sciences

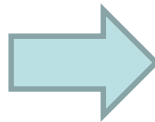
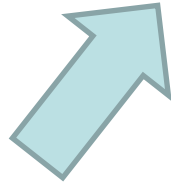
<https://www.edp-open.org/books/edp-open-books/427-enjeux-de-la-transition-ecologique>



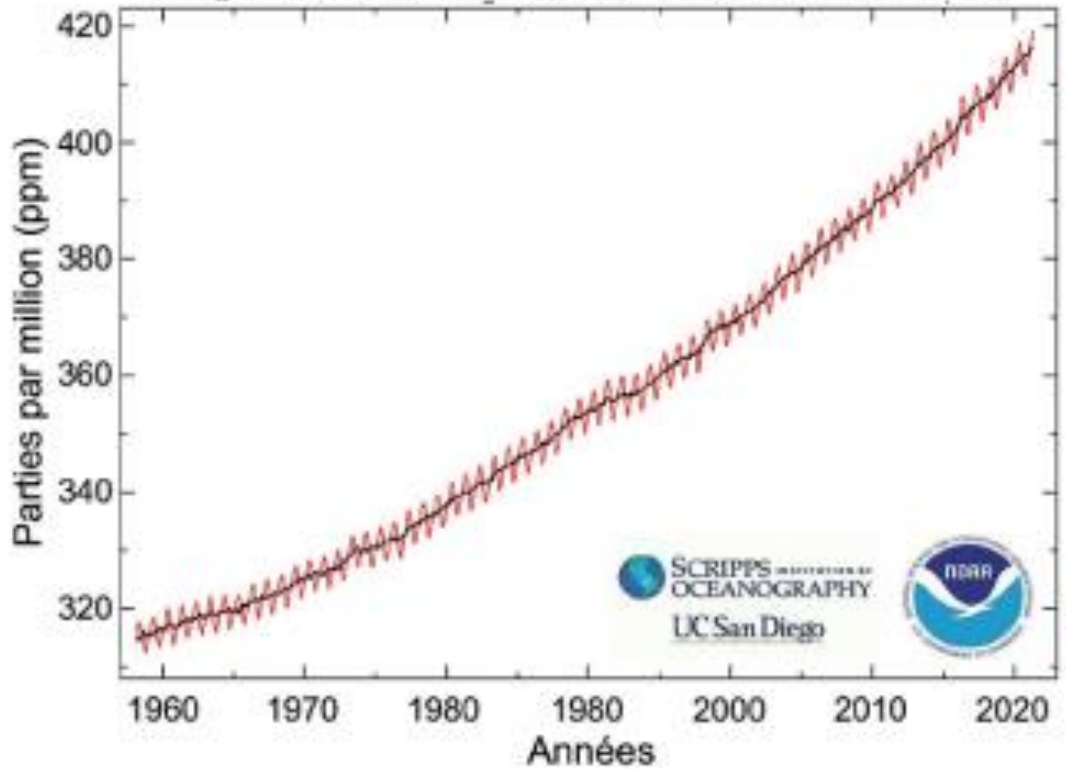
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>



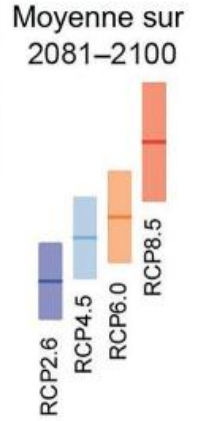
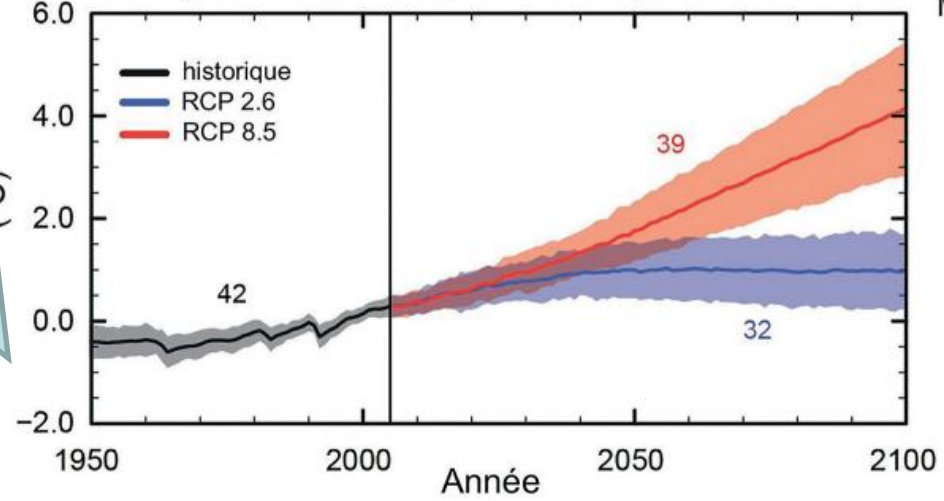
Activités humaines Energies fossiles



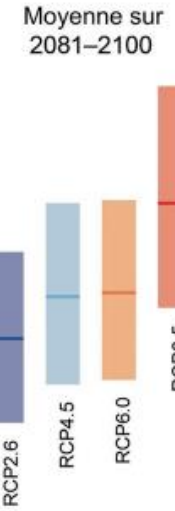
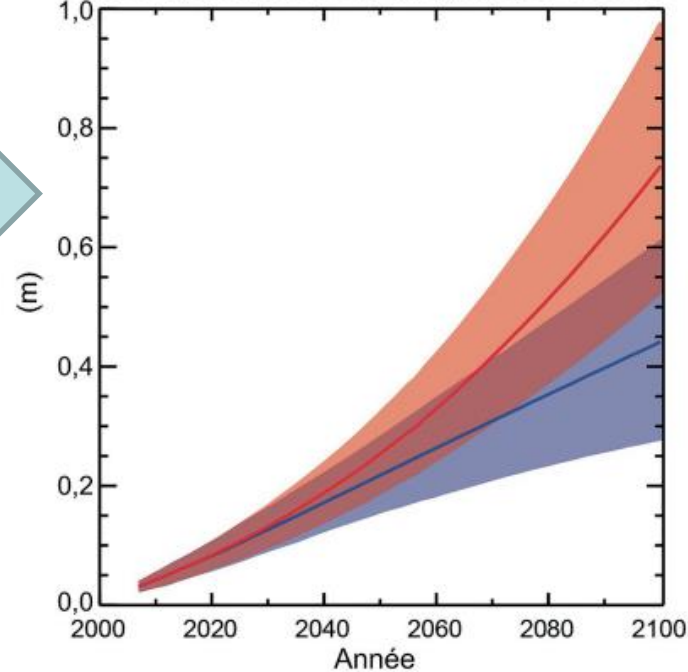
CO₂ atmosphérique à l'observatoire de Mauna Loa



Changement de la température moyenne de surface

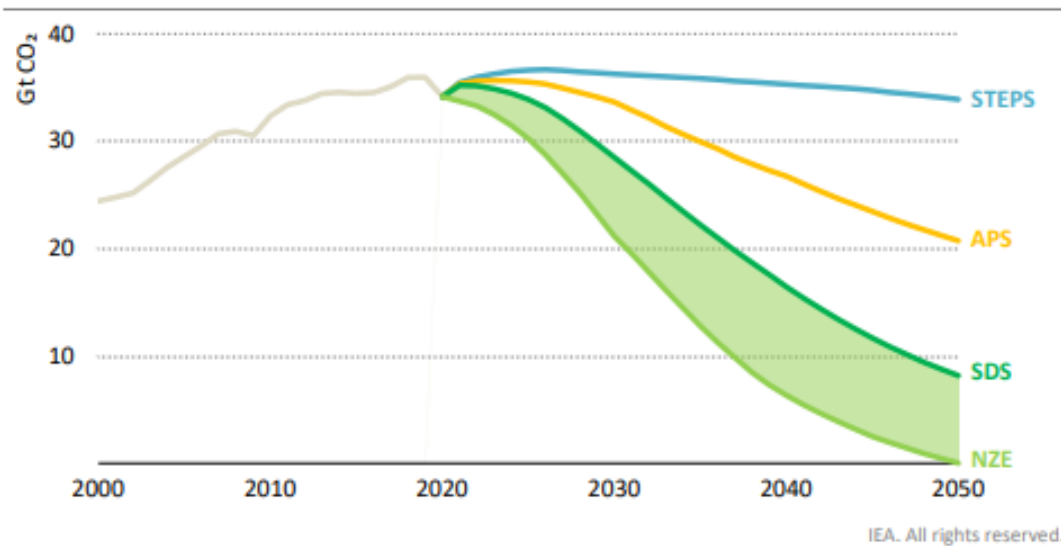


Élévation du niveau moyen des océans



Ce que nous devons faire

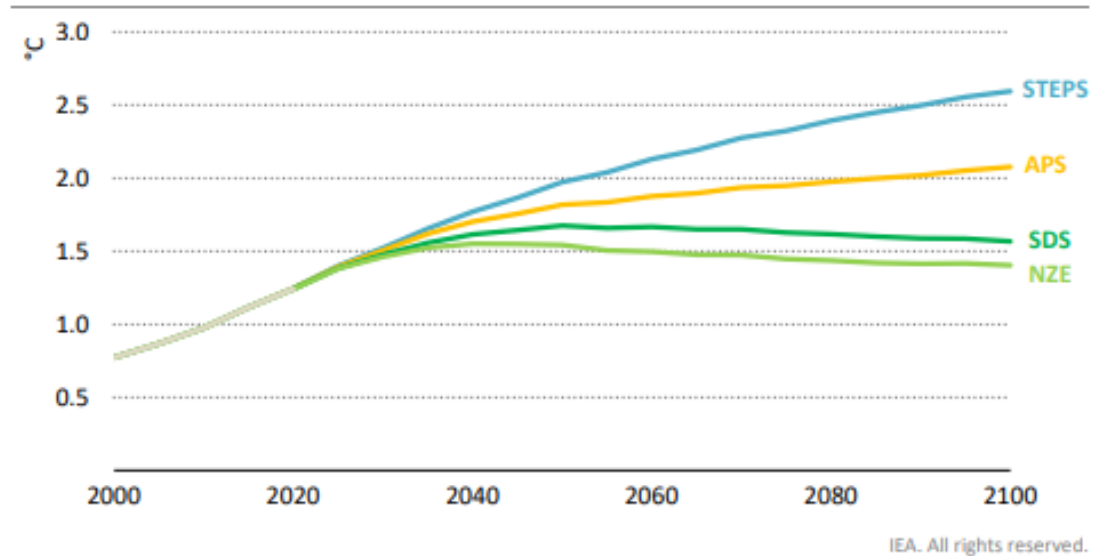
Figure 1.4 ▶ CO₂ emissions in the WEO-2021 scenarios over time



The APS pushes emissions down, but not until after 2030; the SDS goes further and faster to be aligned with the Paris Agreement; the NZE delivers net zero emissions by 2050

Note: APS = Announced Pledges Scenario; SDS = Sustainable Development Scenario; NZE = Net Zero Emissions by 2050 Scenario.

Figure 1.5 ▶ Global median surface temperature rise over time in the WEO-2021 scenarios



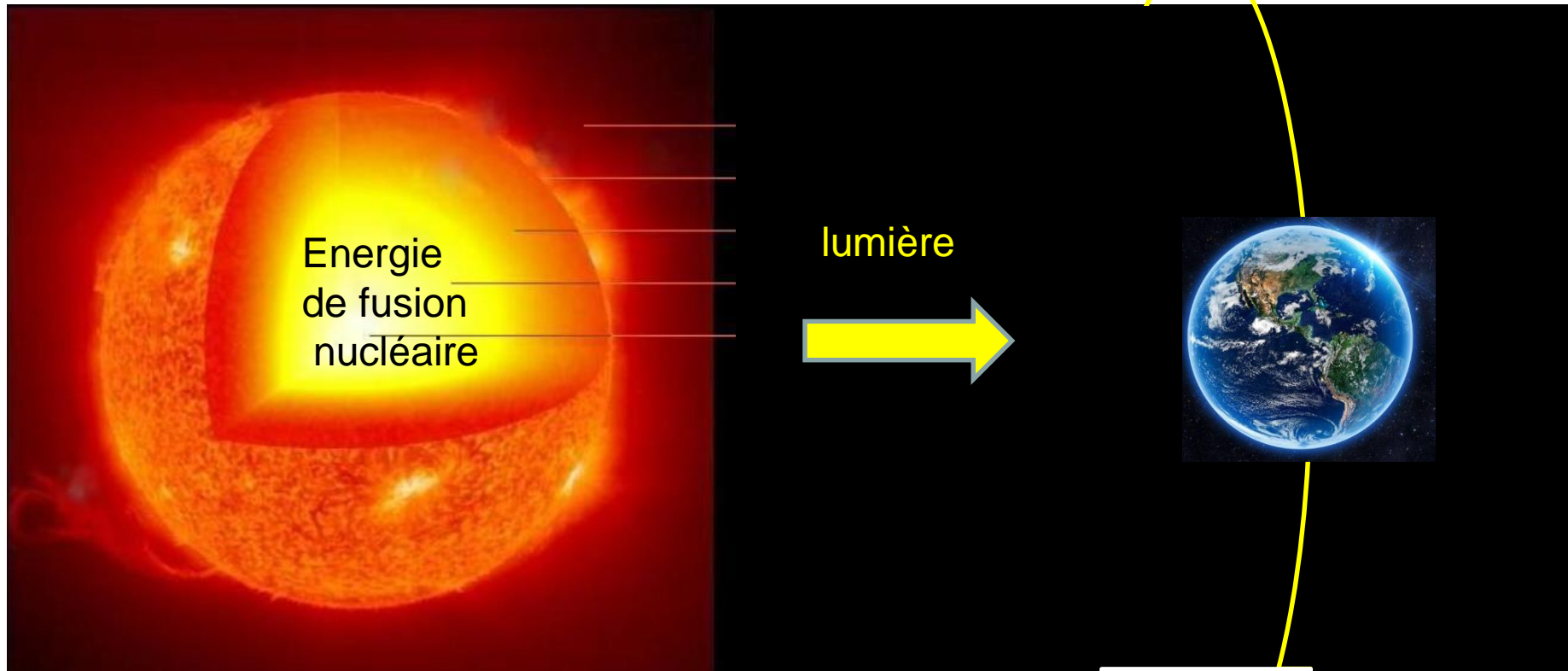
The temperature rise is 2.6 °C in the STEPS and 2.1 °C in the APS in 2100 and continues to increase. It peaks at 1.7 °C in the SDS and 1.5 °C in the NZE around 2050 and then declines

Source: IEA analysis based on outputs of MAGICC 7.5.3.



<https://iea.blob.core.windows.net/assets/888004cf-1a38-4716-9e0c-3b0e3fdbf609/WorldEnergyOutlook2021.pdf>

Le recours au soleil : se brancher sur la lumière ?



627 millions de tonnes d'hydrogène fusionnent en une seconde

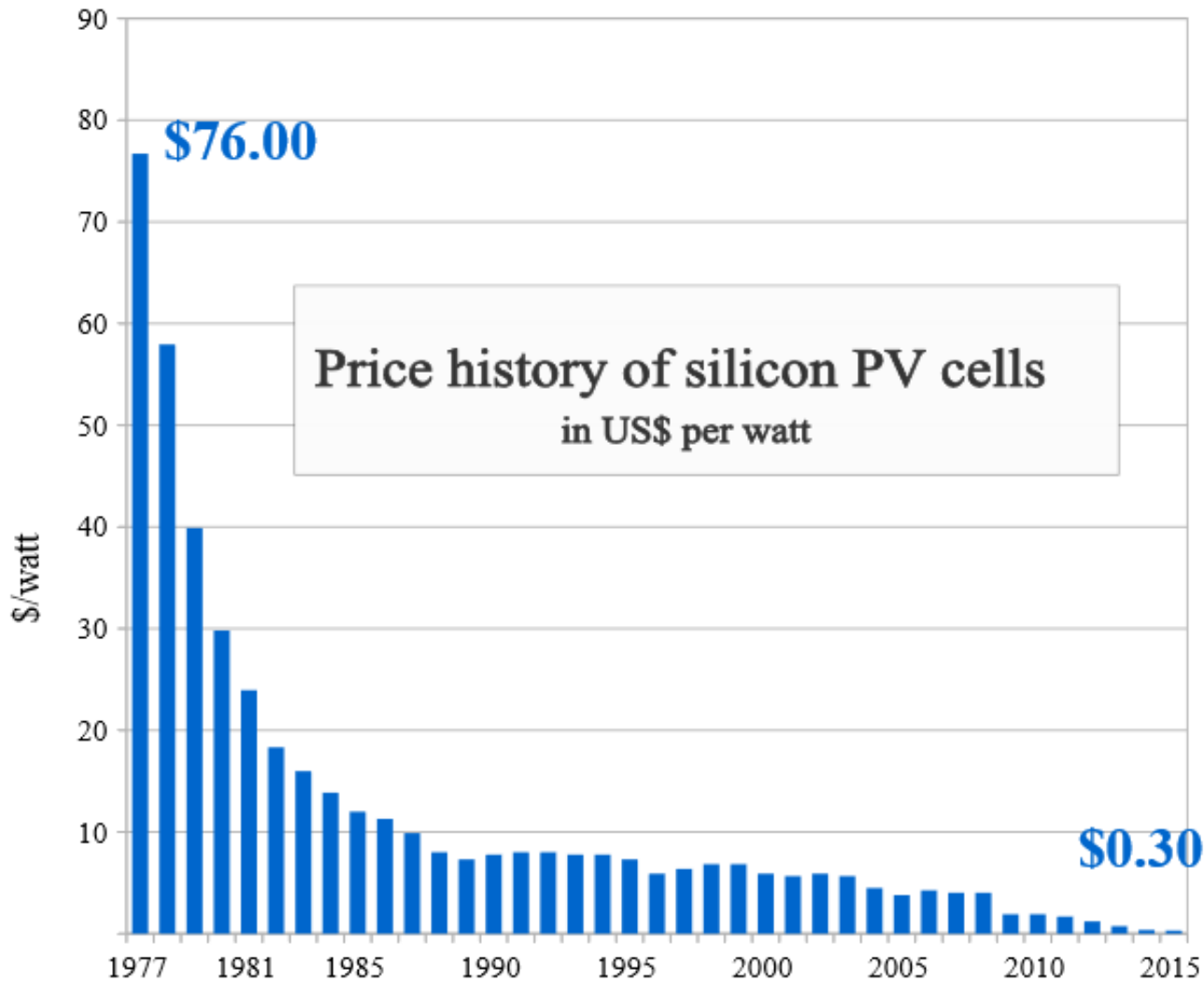
Puissance libérée : $3,8 \cdot 10^{26}$ W

Puissance interceptée par la terre :
 $1,7 \cdot 10^{17}$ W = 170 000 TW (120 000 TW au sol)
Puissance consommée par l'humanité : 17 TW

Rapport : 10 000

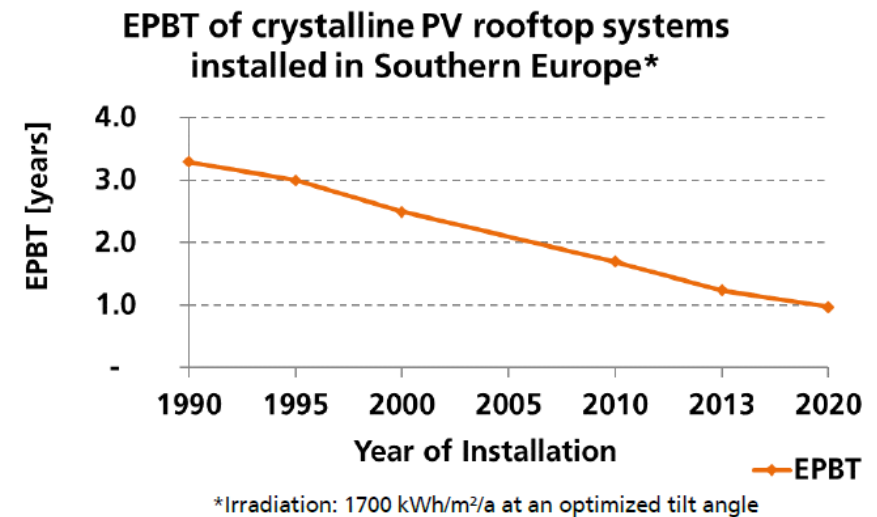
Puissance reçue par m^2 : 1360 W

Les atouts du photovoltaïque dans la transition énergétique



Source: Bloomberg New Energy Finance & pv.energytrend.com

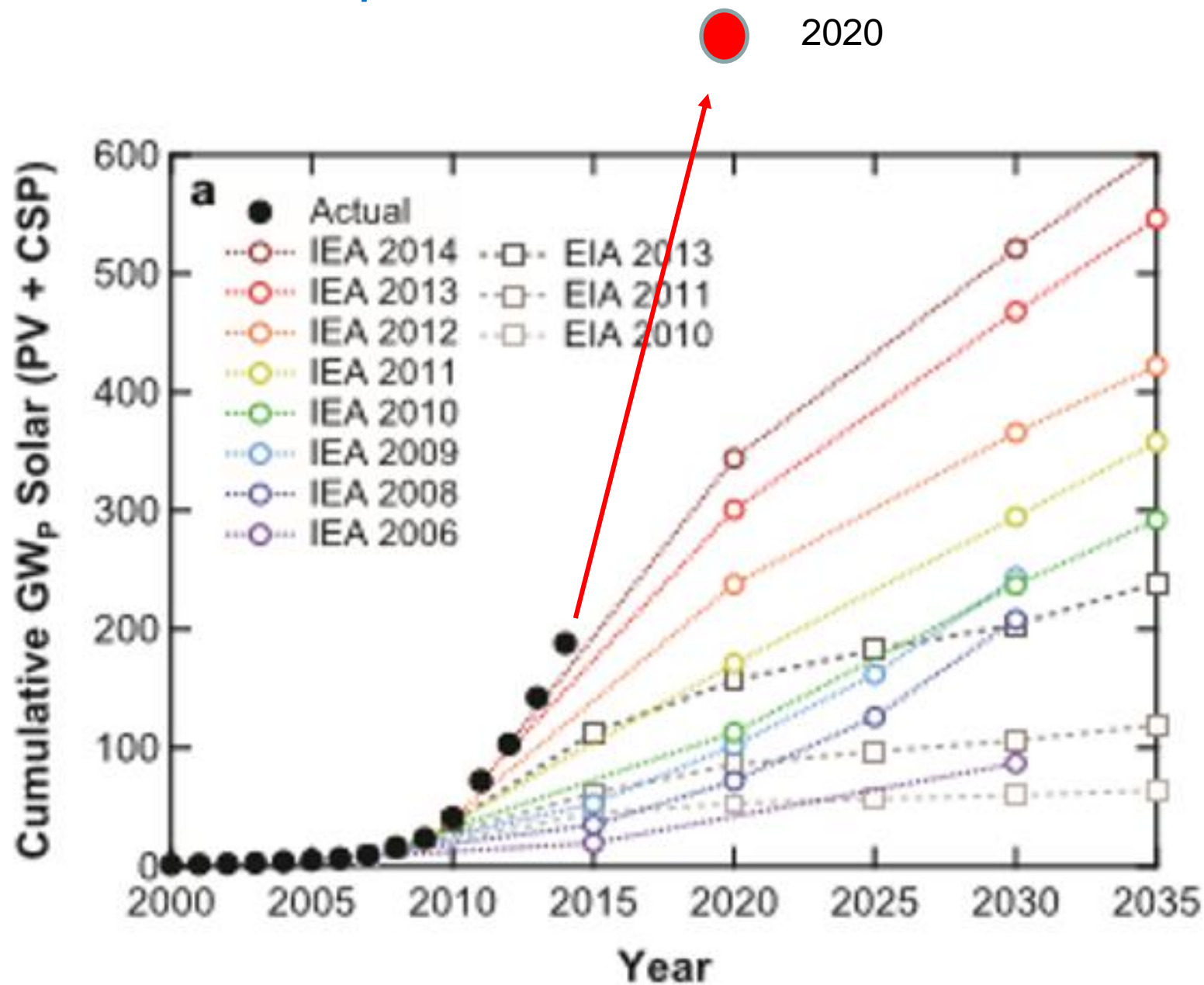
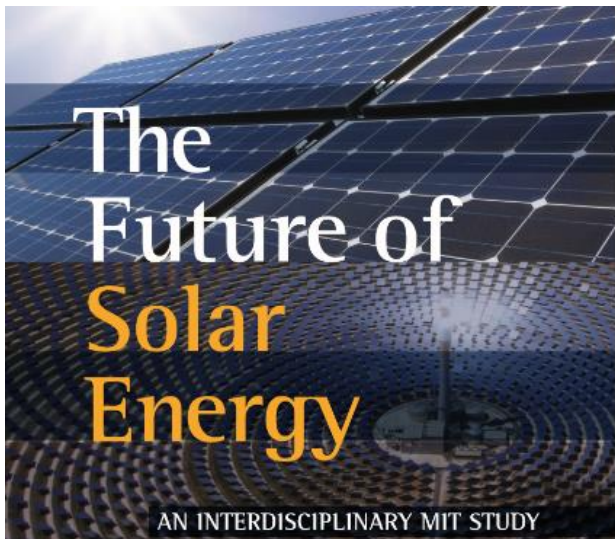
- Conversion directe
- Compétitivité économique
- Abondance de la ressource (soleil, silicium)
- Excellent Bilan CO₂ (15-30 g CO₂/kWh)
- Déployable rapidement dans le monde entier
- Systèmes multi-échelles (mW-GW)
- Non dangereux
- Marge de progression importante



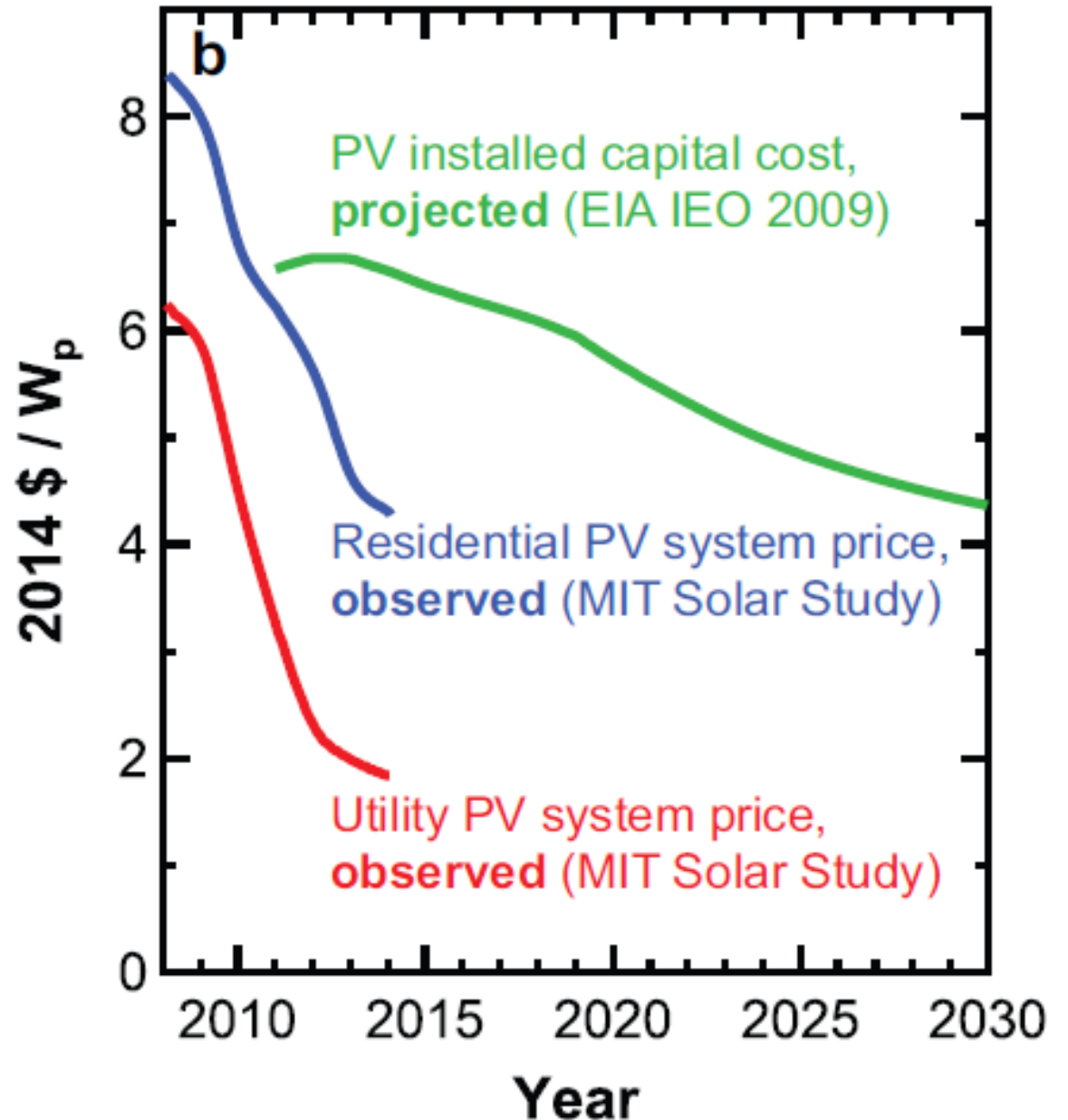
Retour sur les prévisions passées

2015

Les limites des prévisions

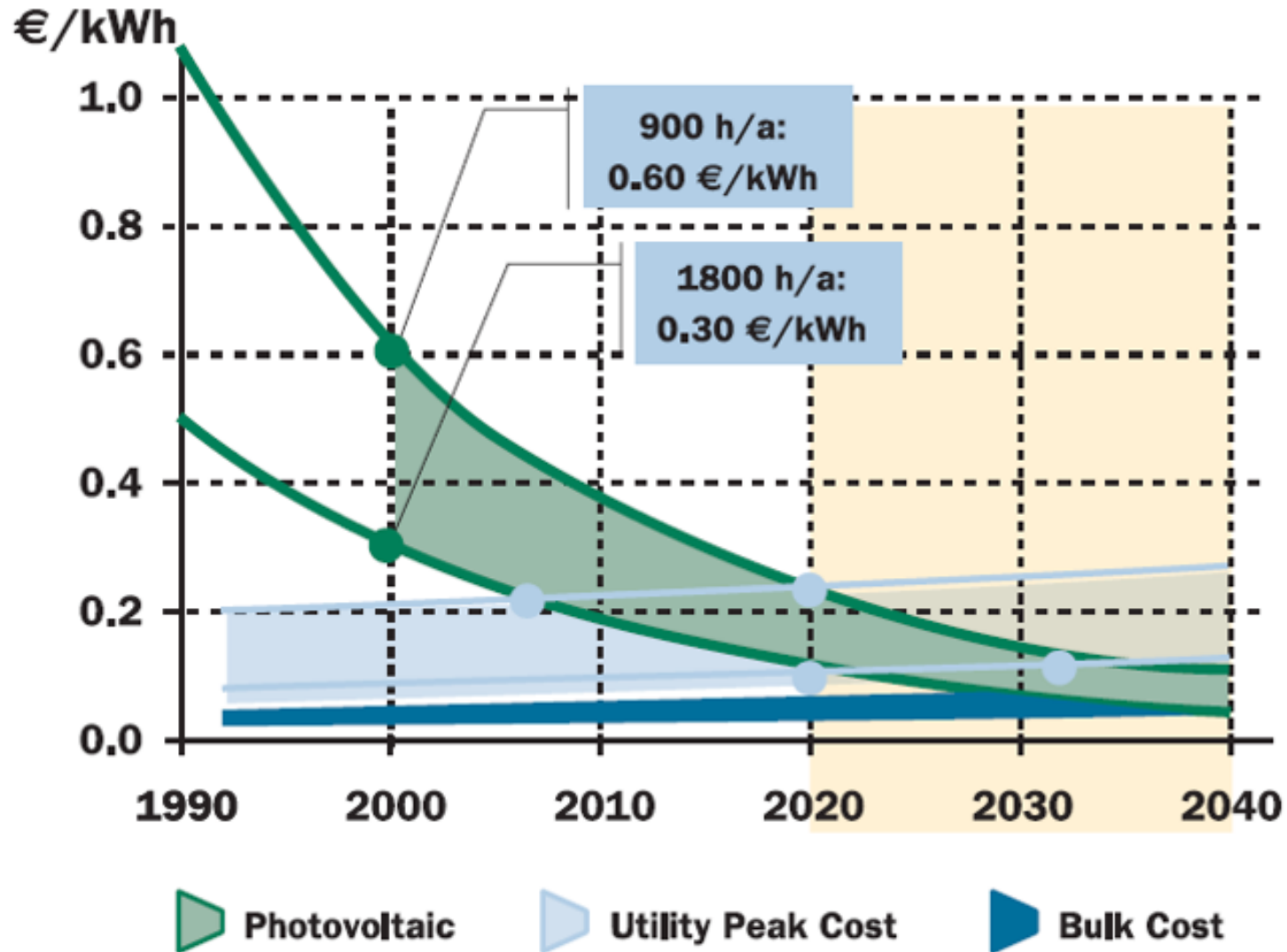


The cost of PV installations has also fallen much more rapidly than projected. In 2014, prices for residential PV systems reached the level projected for installed PV capital costs in 2030 according to EIA's 2009 *International Energy Outlook* report, and utility PV system prices have fallen even faster.



Prévisions 2008

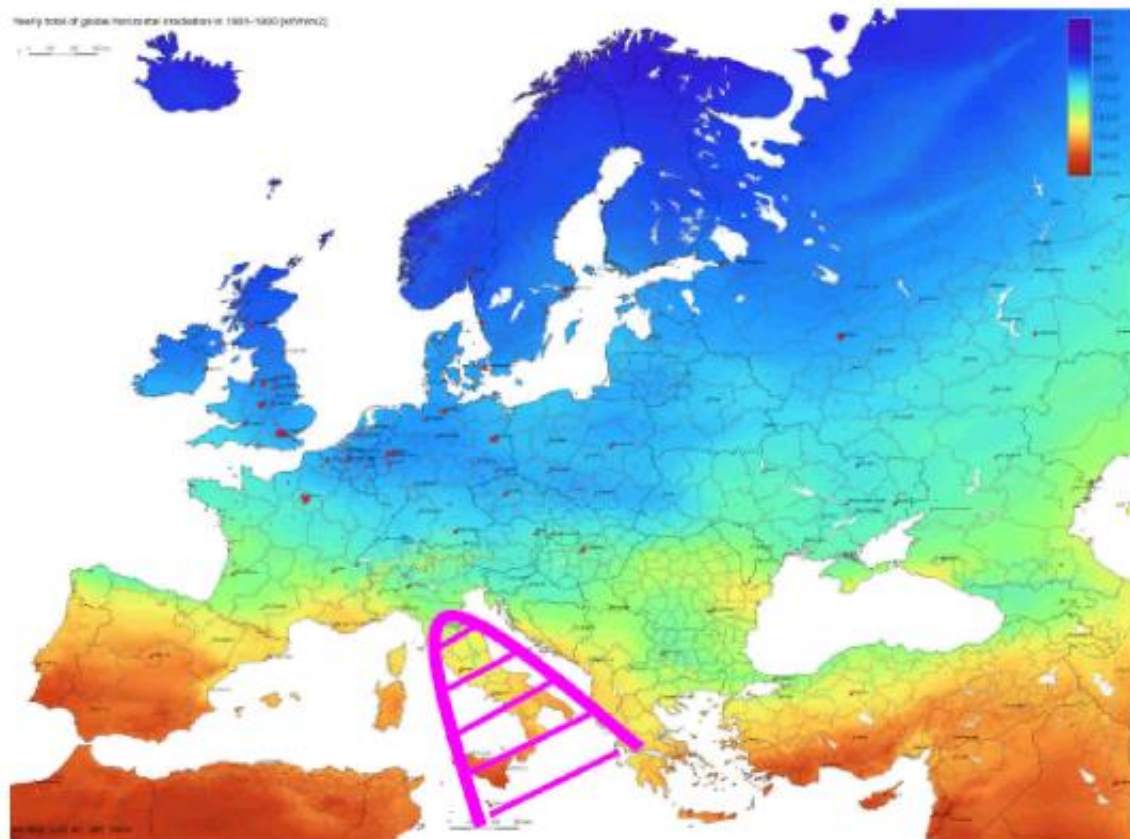
1000 Euros



2008

Grid parity in Europe – 2010

(lines to guide the eye)

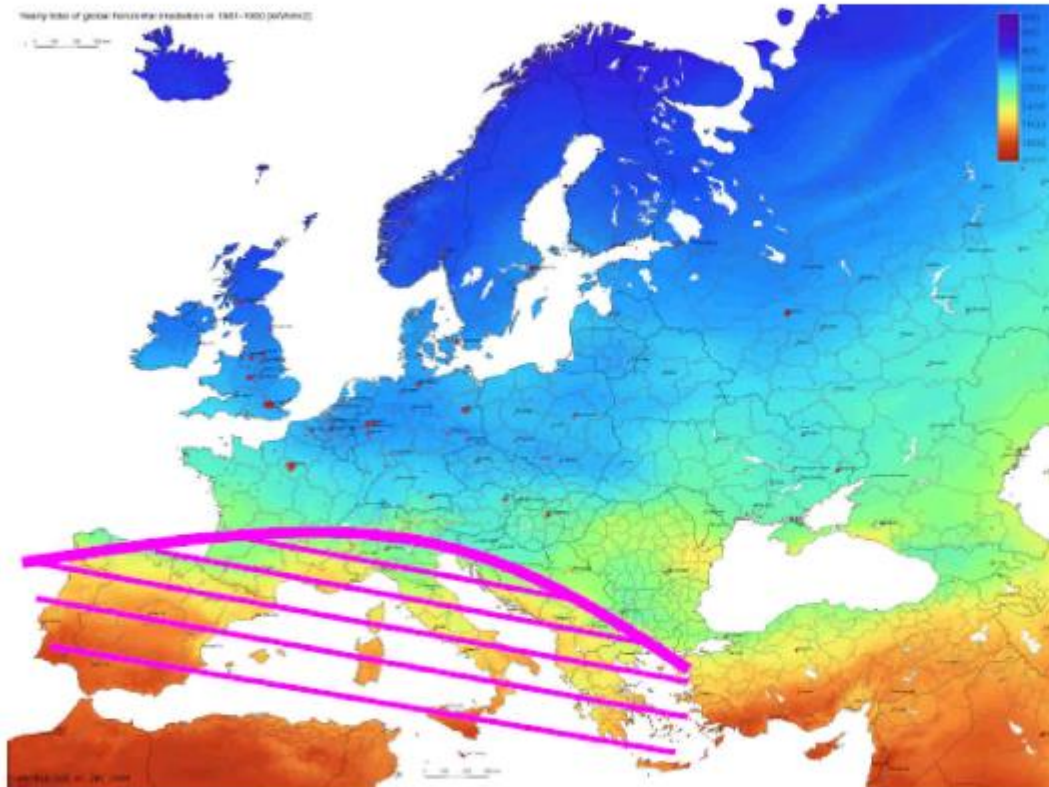


irradiation (kWh/m ² -yr)	PV generation cost (€/kWh)
600	0.50
1000	0.30
1400	0.21
1800	0.17

Présentation
Sénat
28/11/2011

Grid parity in Europe – 2015

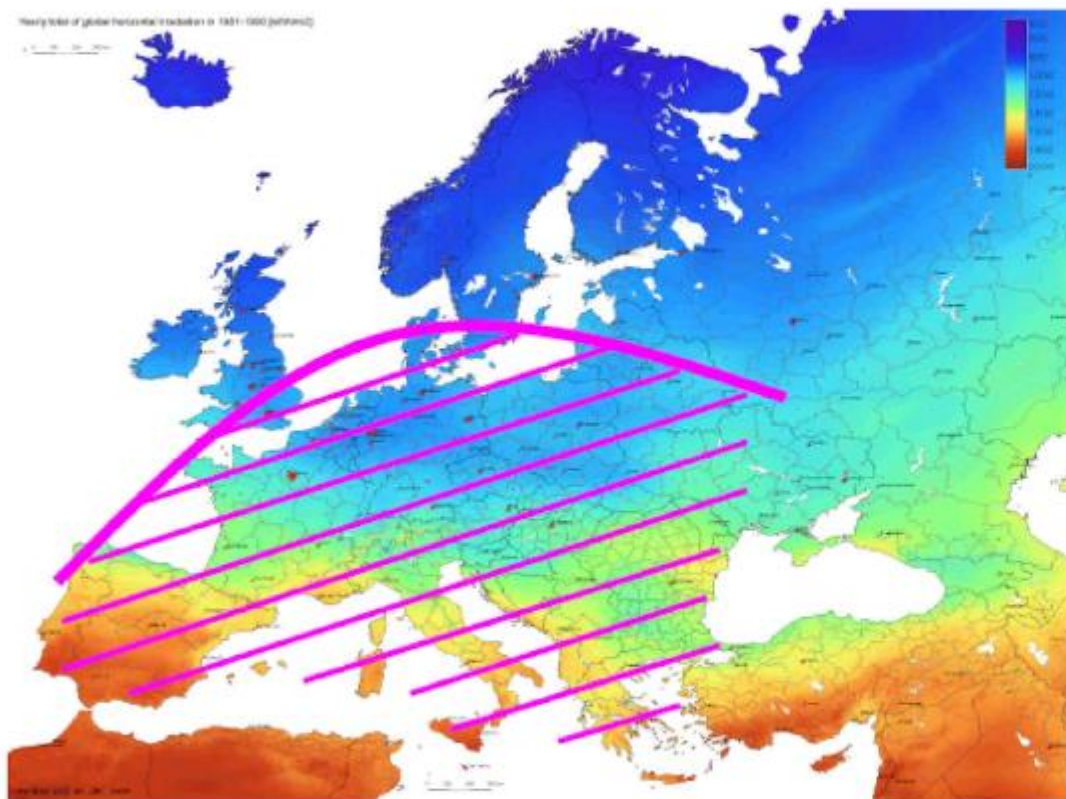
(lines to guide the eye)



irradiation (kWh/m ² .yr)	PV generation cost (€/kWh)
600	0.42
1000	0.25
1400	0.18
1800	0.14

Grid parity in Europe – 2020

(lines to guide the eye)



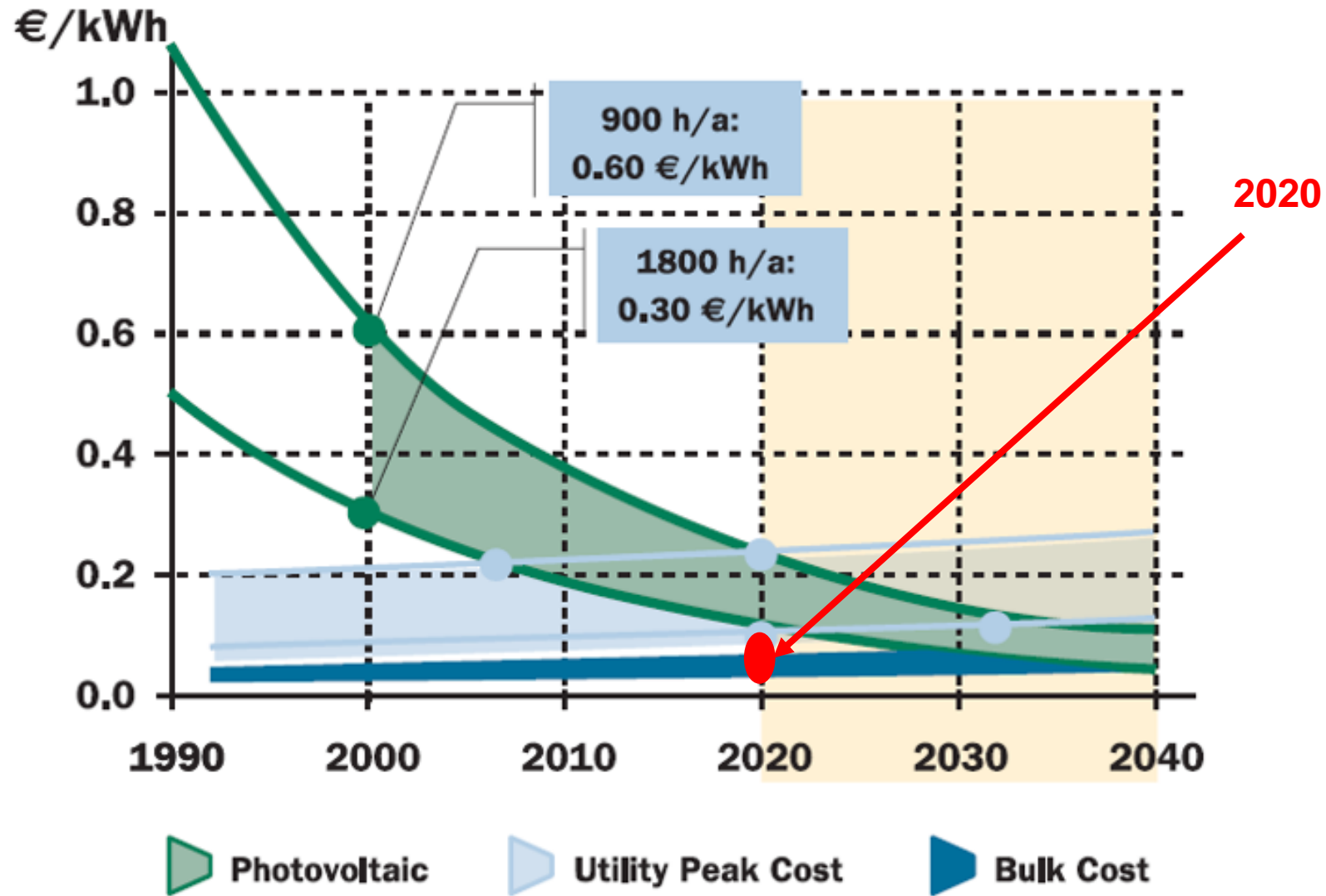
irradiation (kWh/m ² .yr)	PV generation cost (€/kWh)
600	0.33
1000	0.20
1400	0.14
1800	0.11

PV Electricity will be competitive within the next years

EUPV TP GA 06 June 2008

Source : PV Platform <http://www.eupvplatform.org/>

Situation en 2020



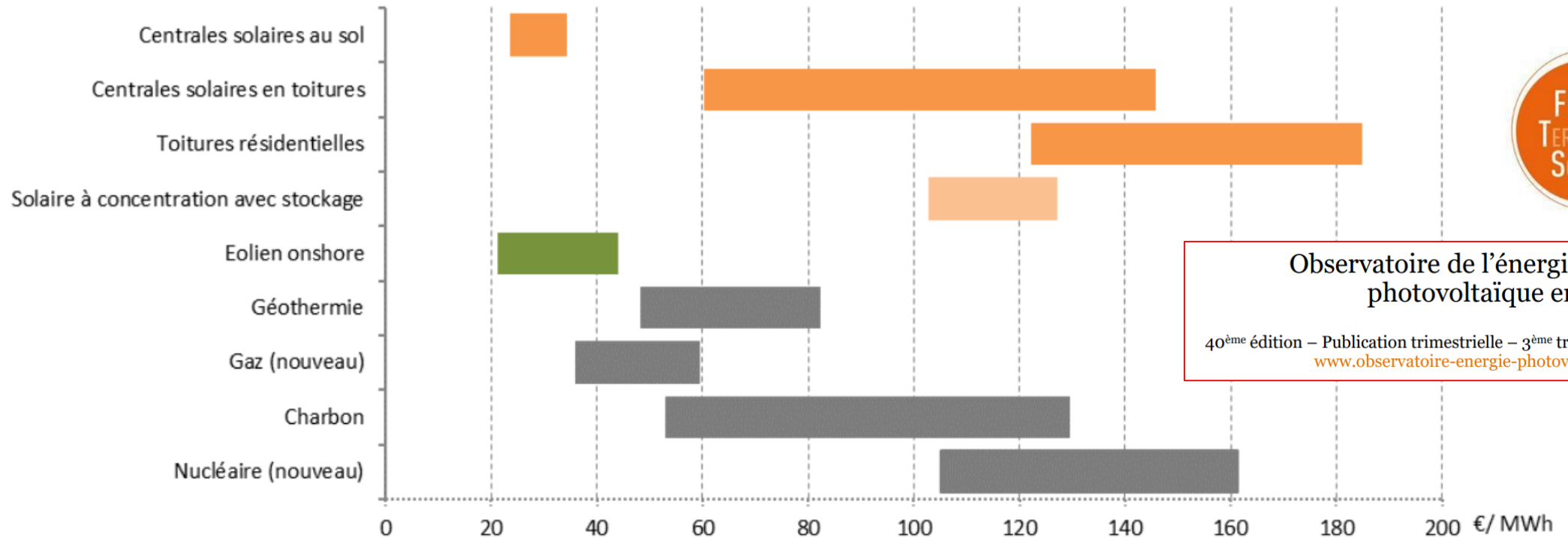
Source : PV Platform <http://www.eupvplatform.org/>

Daniel Lincot Collège de France 16-03:2022

Situation en 2021 au niveau mondial

2. Comparaison des coûts de production des nouvelles capacités électriques

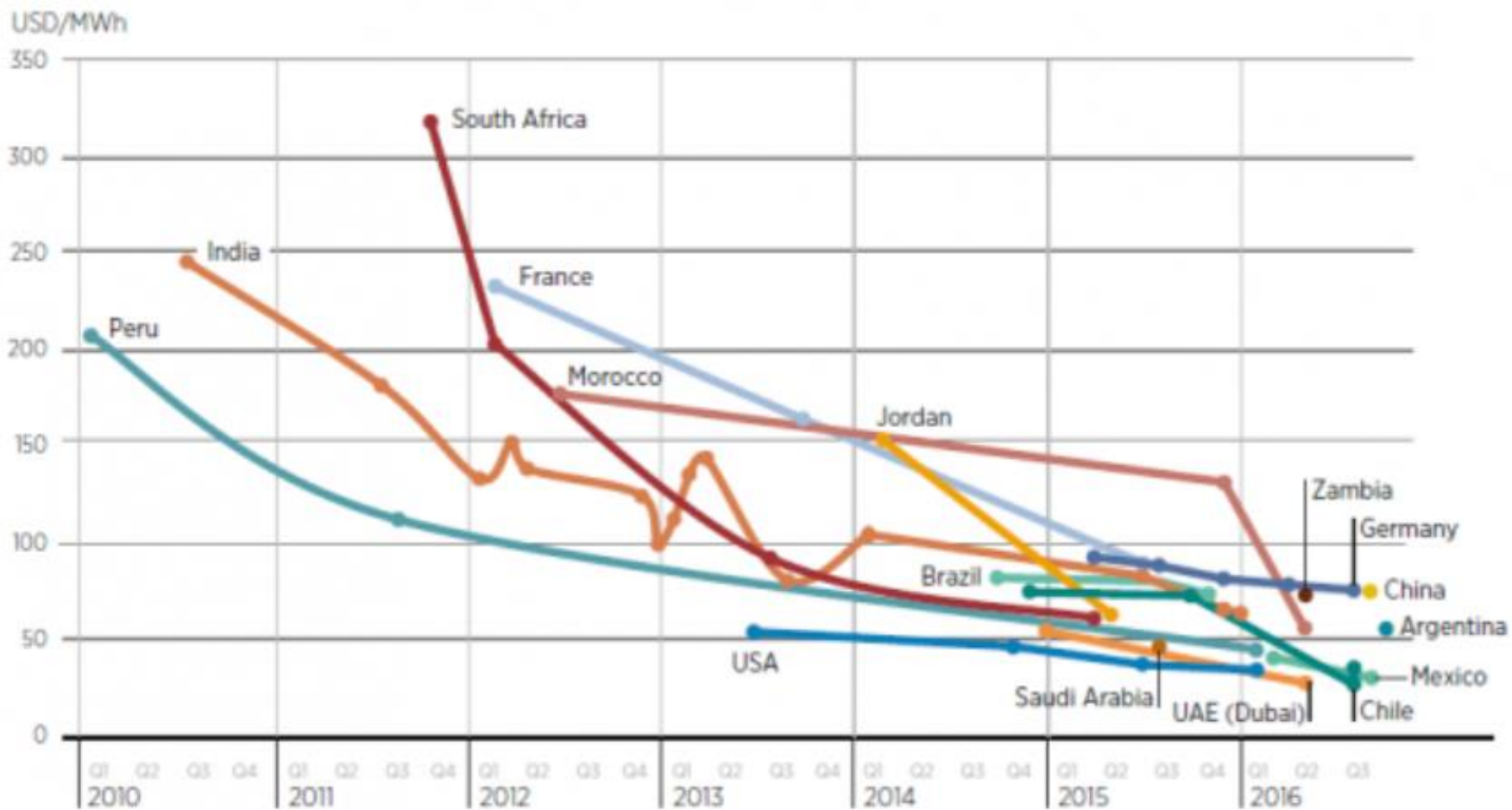
Levelized Cost Of Electricity* (Monde 2020)



Observatoire de l'énergie solaire photovoltaïque en France

40^{ème} édition – Publication trimestrielle – 3^{ème} trimestre 2021
www.observatoire-energie-photovoltaïque.com

Figure 2.3 Evolution of utility-scale solar PV auction prices around the world



Source: IRENA, 2017a

La situation en France

La situation en France - Appel d'offre de la commission de régulation de l'énergie (CRE)

Famille	Nombre de dossiers		Prix moyen pondéré des dossiers (€/MWh)		Puissance cumulée des dossiers (MWc)		Puissance cumulée appelée (MWc)
	Déposés	<i>Dossiers que la CRE propose de retenir</i>	Déposés	<i>Dossiers que la CRE propose de retenir</i>	Déposés	<i>Dossiers que la CRE propose de retenir</i>	
F-1	40	36	57,6	56,8	598	557	550
F-2	78	61	67,0	63,8	289	233	230
F-3	22	21	86,8	87,5	74	65	70
Toutes familles	140	118	62,7	61,0	962	855	850

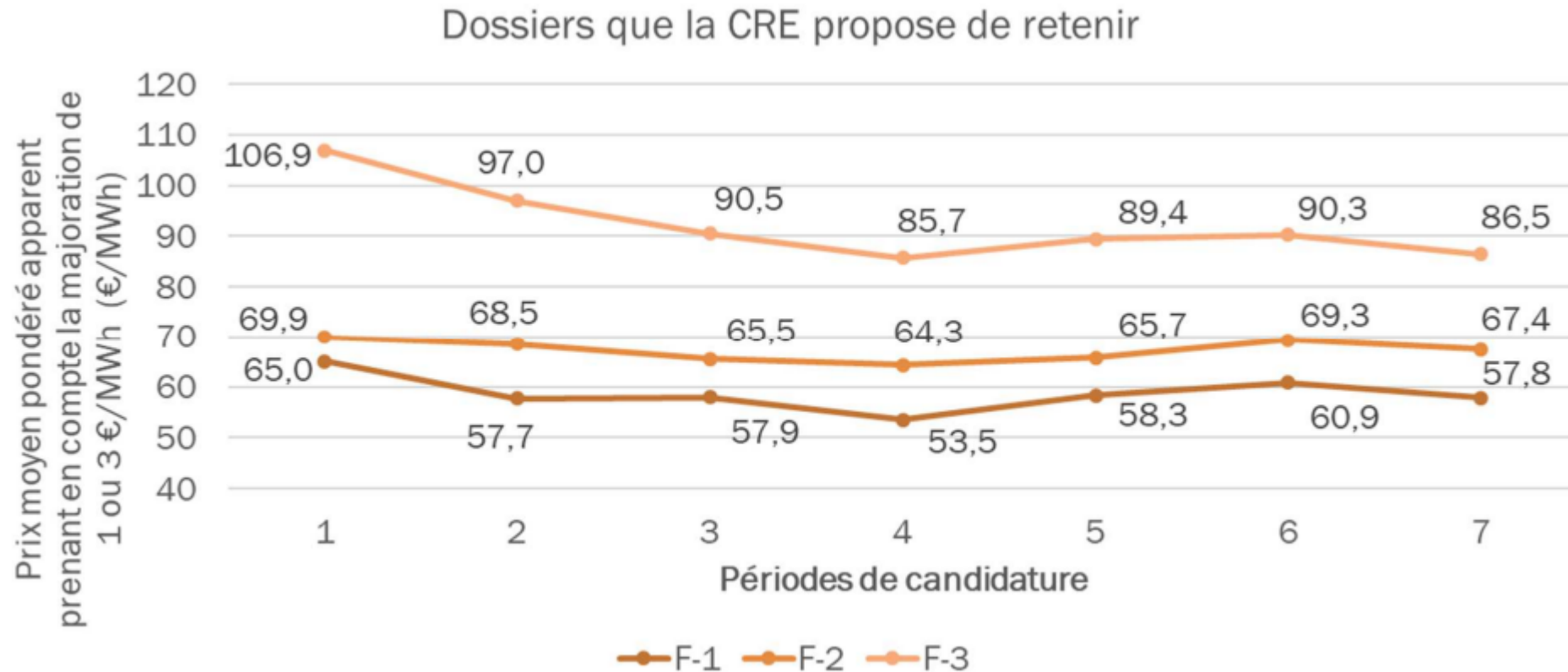
F-1 : 56,8 euros/MWh pour les **installations de plus grande puissance de 5 et 30 MWc**

F-2 : 63,8 euros/MWh pour les **installations de puissance comprise entre 500 kWc et 5 MWc**

F-3: 87,5 euros/MWh pour les **installations sur ombrières de parking de puissance comprise entre 500 kWc et 10 MWc.**

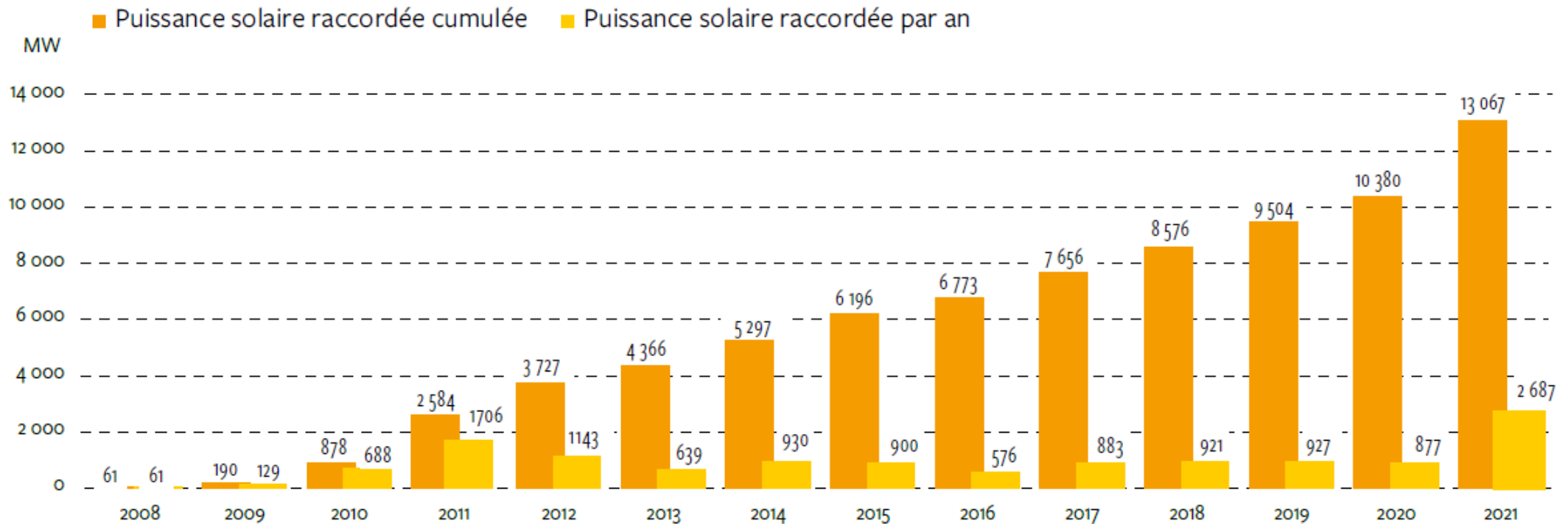
<https://www.lechodusolaire.fr/wp-content/uploads/2019/03/CRE-AO-PV-sol-060319.jpg>

Evolution en fonction du temps

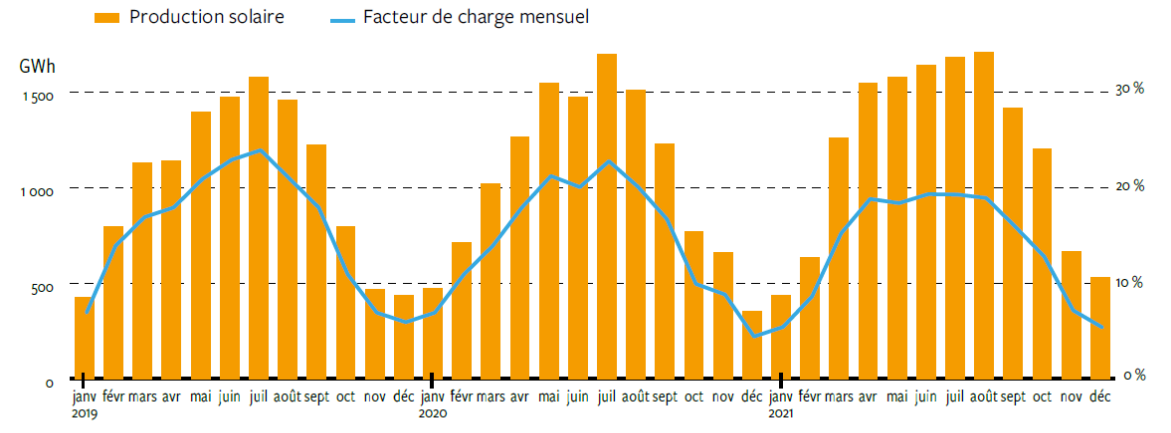
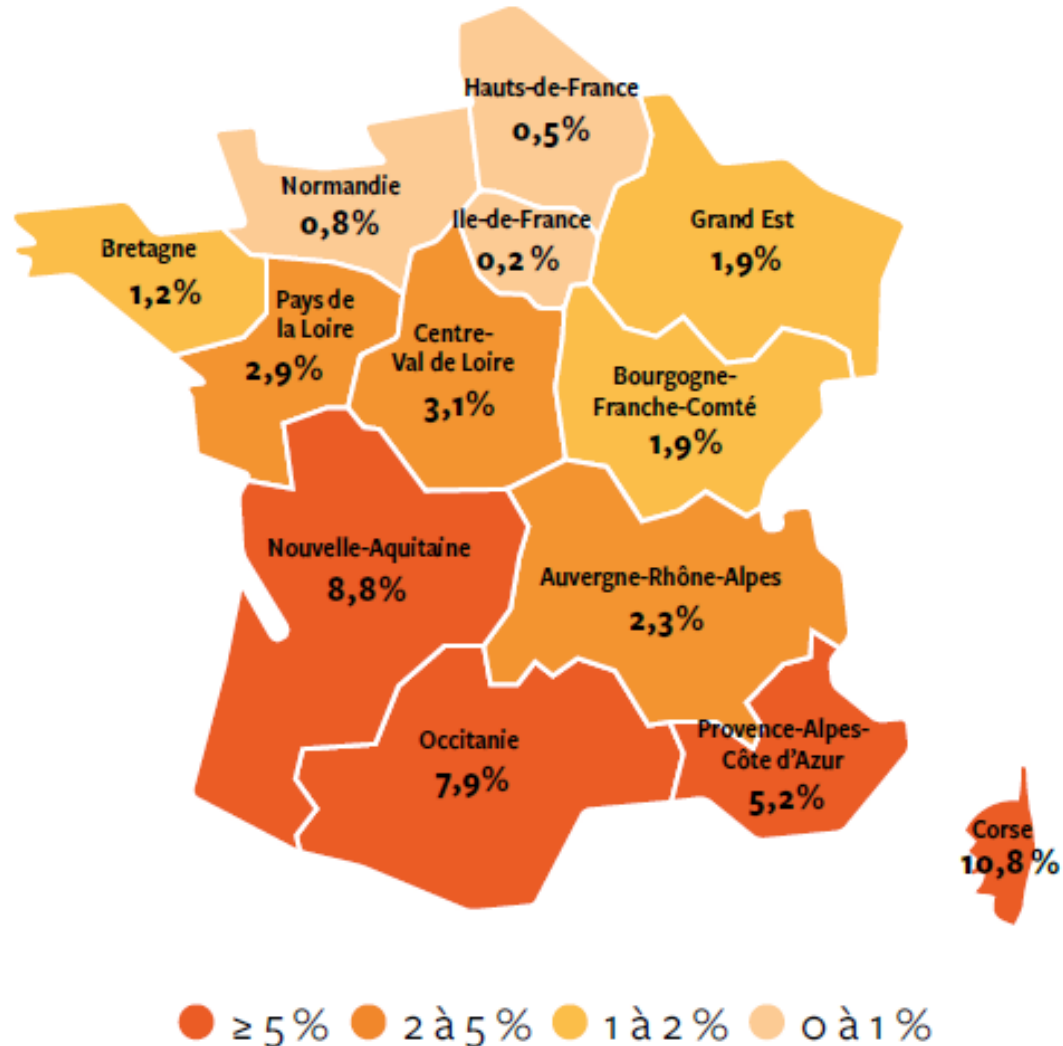


file:///C:/Users/daniel.lincot/Downloads/200312_2020-050_AO_PV_SOL_7eP_Rapport_Synthese_Rapport_Public.pdf

Évolution de la puissance solaire raccordée



Couverture de la consommation par la production solaire en 2021



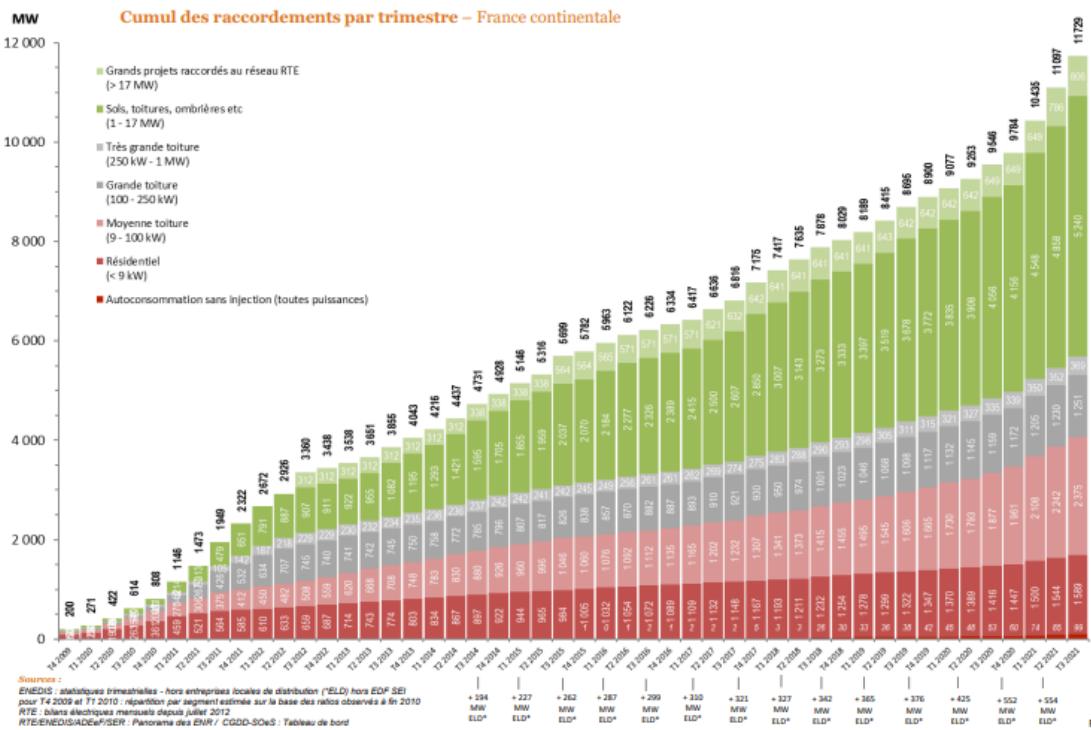
14,3 TWh produits en une année

**Le solaire couvre
3 %**
de l'électricité annuelle
consommée en 2021.

Analyse du parc photovoltaïque Français

Par type d'installation

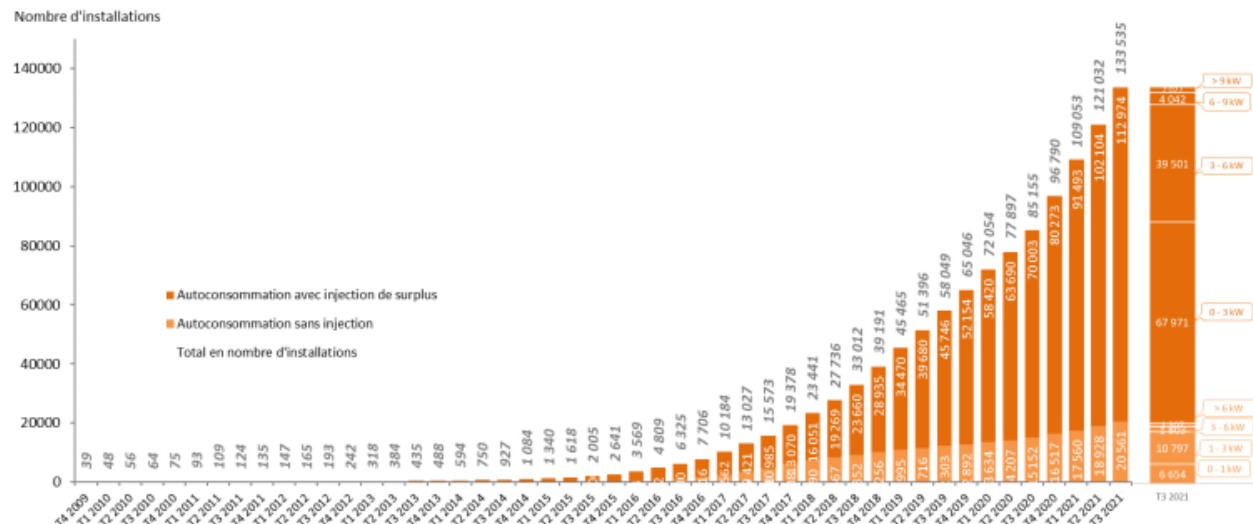
4. Analyse du parc photovoltaïque français (1/4)



En autoconsommation totale ou partielle

4. Analyse du parc photovoltaïque français en autoconsommation (2/4)

Cumul des raccordements par trimestre en nombre d'installations – France continentale



Source : France territoire solaire 2021



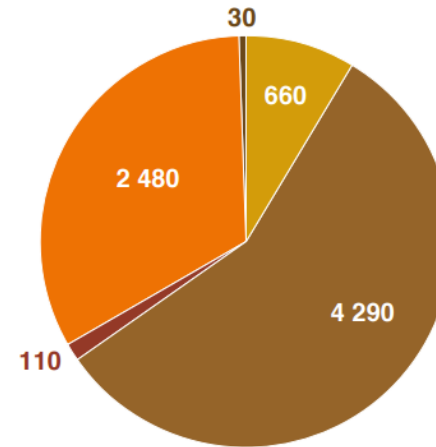
Aspect sociaux-économiques France



Métiers

Répartition des emplois 2019 selon la chaîne de valeur (ETP)

Source: "Marché et emplois concourant à la transition énergétique dans le secteur des énergies renouvelables et de récupération", Ademe, 2021.

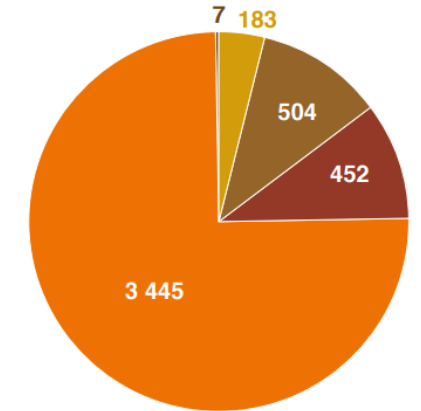


- Fabrication des équipements
- Installation
- Études préalables
- Exploitation et vente de l'énergie
- Lié à l'exportation

Secteurs

Répartition du chiffre d'affaires 2019 selon la chaîne de valeur (ETP)

Source: "Marché et emplois concourant à la transition énergétique dans le secteur des énergies renouvelables et de récupération", Ademe, 2021.

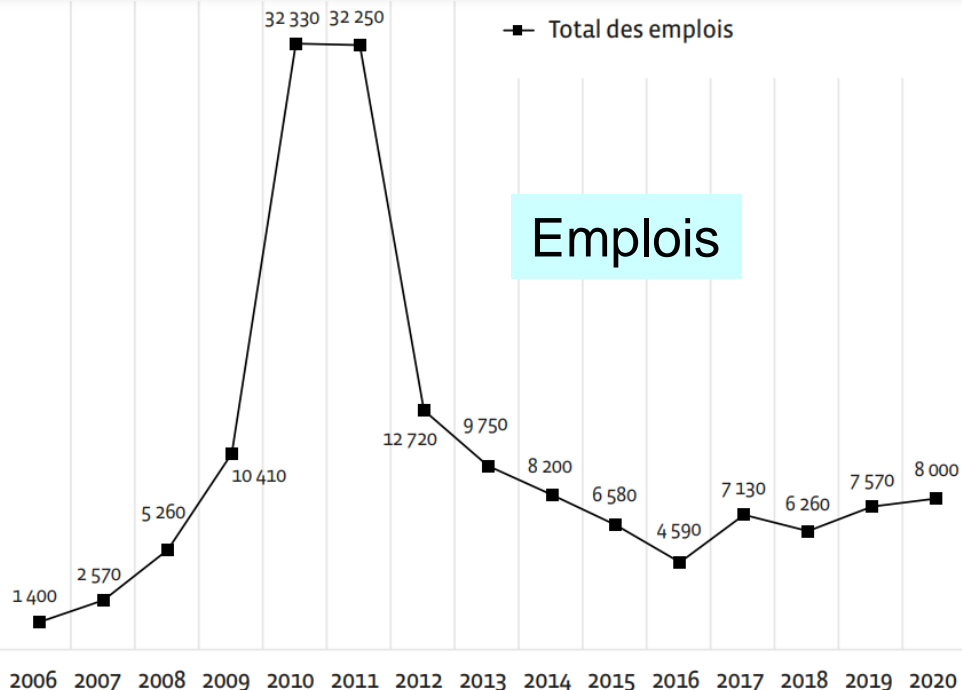


- Équipements fabriqués en France
- Importation d'équipements
- Installation, études préalables
- Exploitation et vente de l'énergie
- Exportation d'équipements

Chiffre d'affaire 2020 : 5 milliards d'Euros

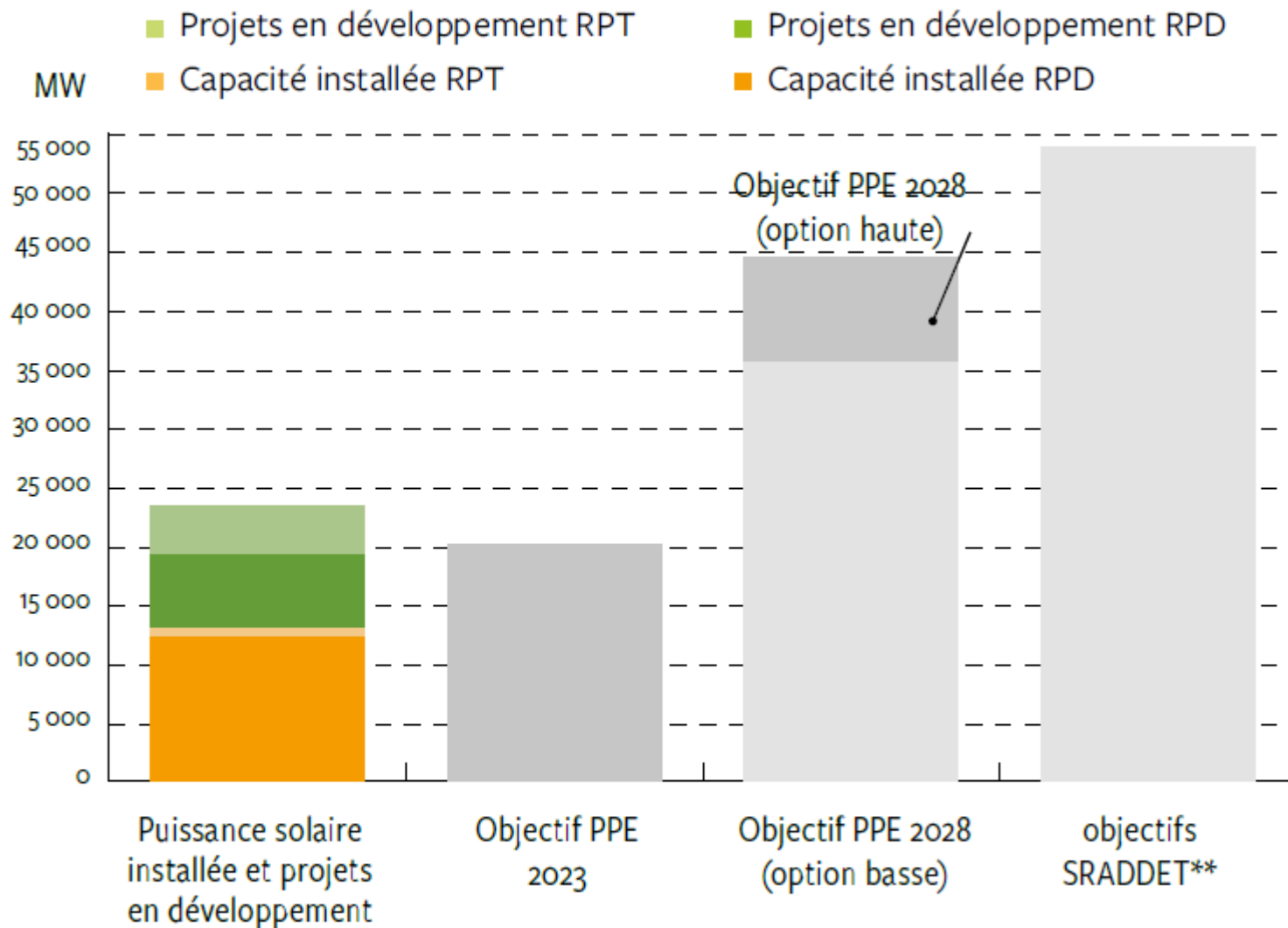
http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/energie_renouvelable_france/ObservER-Barometre-EnR-Electrique-France-2021-20220203.pdf

Emplois



Quelles prévisions pour le futur ?

Puissance installée et projets en développement, objectifs PPE et SRADDET



* hors Corse

** objectifs 2030 agrégés des SRADDET (Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires) approuvés ou en cours d'approbation

**Objectifs
nationaux 2023
atteints à***
64,3%

Futurs énergétiques 2050

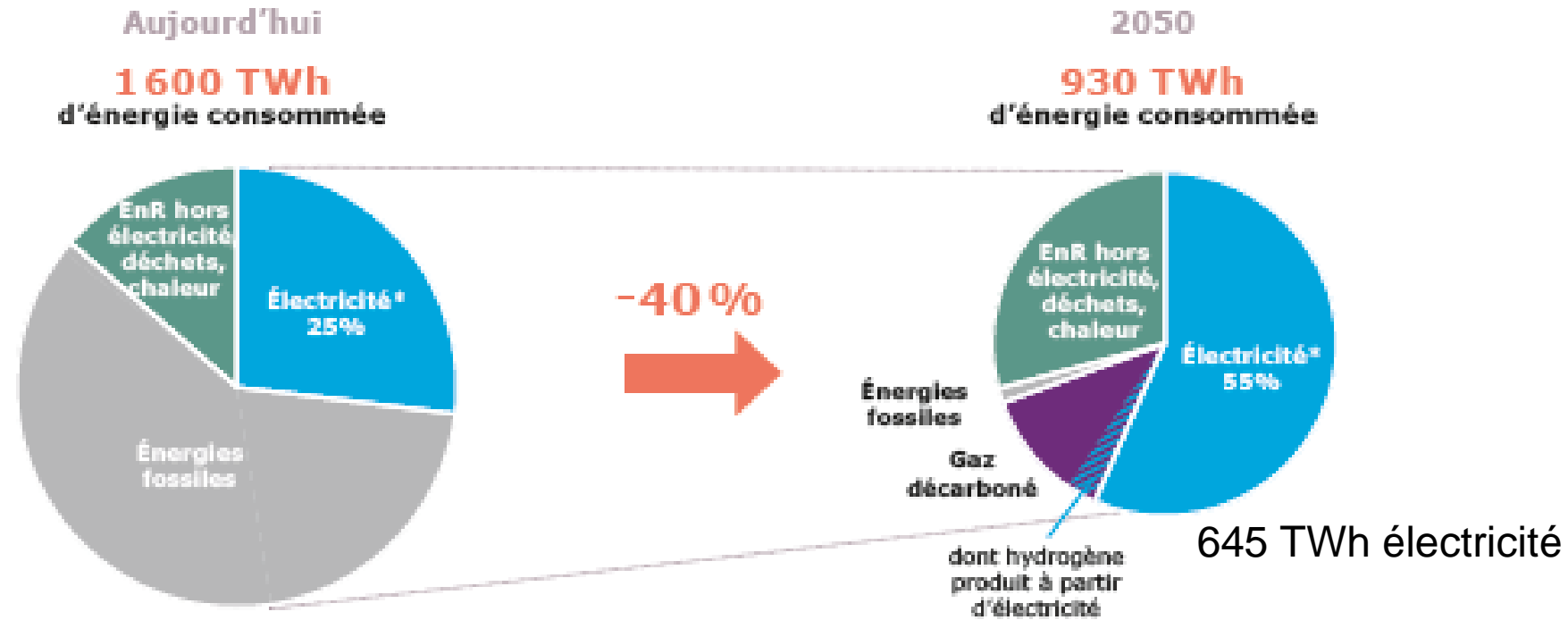
Principaux résultats

Octobre 2021



Figure 2

Consommation d'énergie finale en France et dans la SNBC



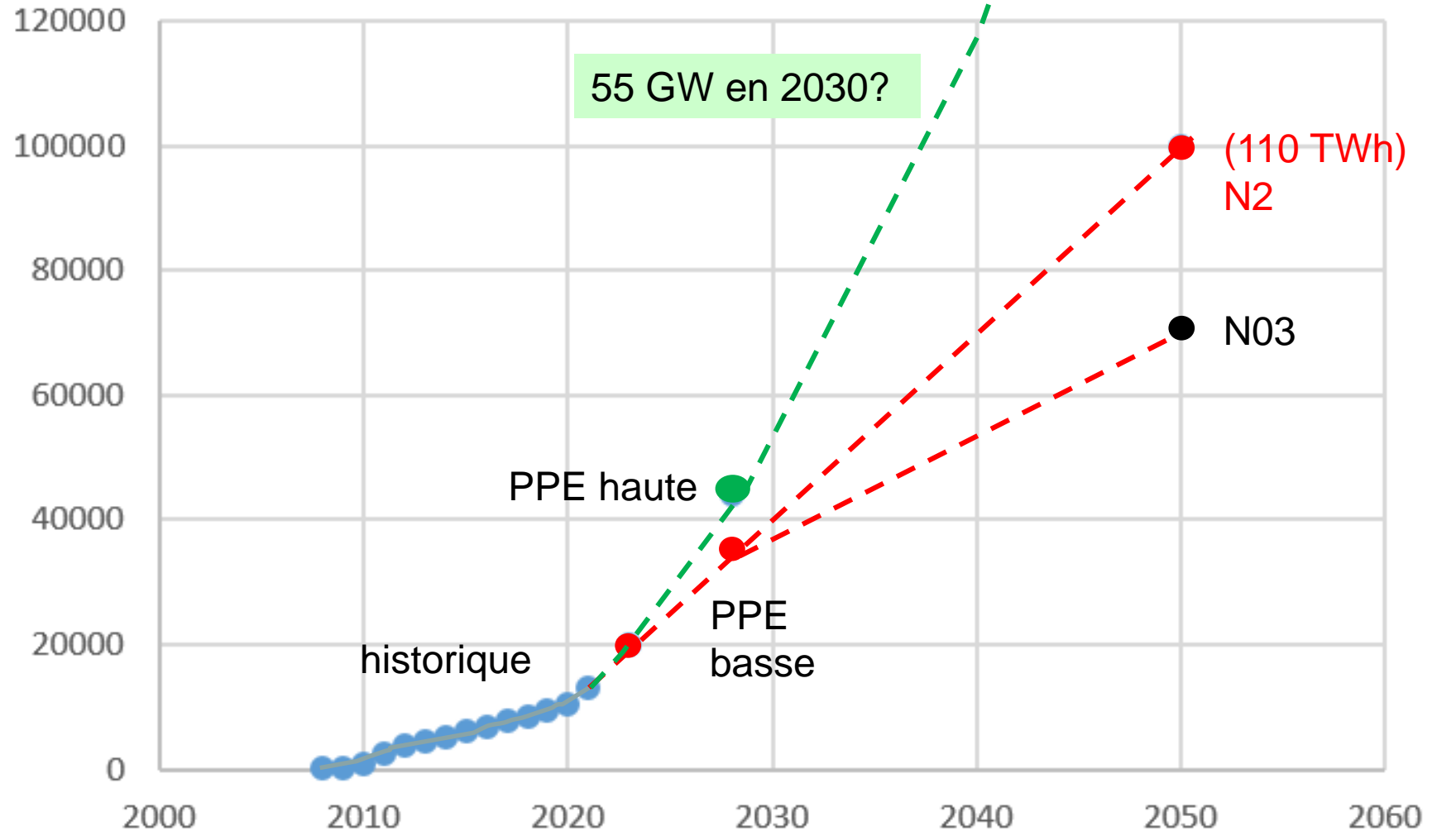
* Consommation finale d'électricité (hors pertes, hors consommation issue du secteur de l'énergie et hors consommation pour la production d'hydrogène)
Consommation finale d'électricité dans la trajectoire de référence de RTE = 645 TWh

<https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-12/Futurs-Energetiques-2050-principaux-resultats.pdf>

Emmanuel Macron,
le 2 février 2022
« D'ici 2050, nous
multiplierons par près
de dix la puissance
installée pour dépasser
100 gigawatts, en
veillant à un équilibre
entre les installations en
toiture et celles aux
sols »

Note :
+ 14 EPR (23 GW) en 2050
→ N2

Capacité installée (MW)



Futurs énergétiques 2050

Principaux résultats

Octobre 2021



LES SCÉNARIOS DE MIX DE PRODUCTION À L'HORIZON 2050

↑↑↑ Flexibilités de la demande (hors V2G)

🏭 Nouveau thermique décarboné

🔌 Véhicule-to-grid

🔋 Batteries

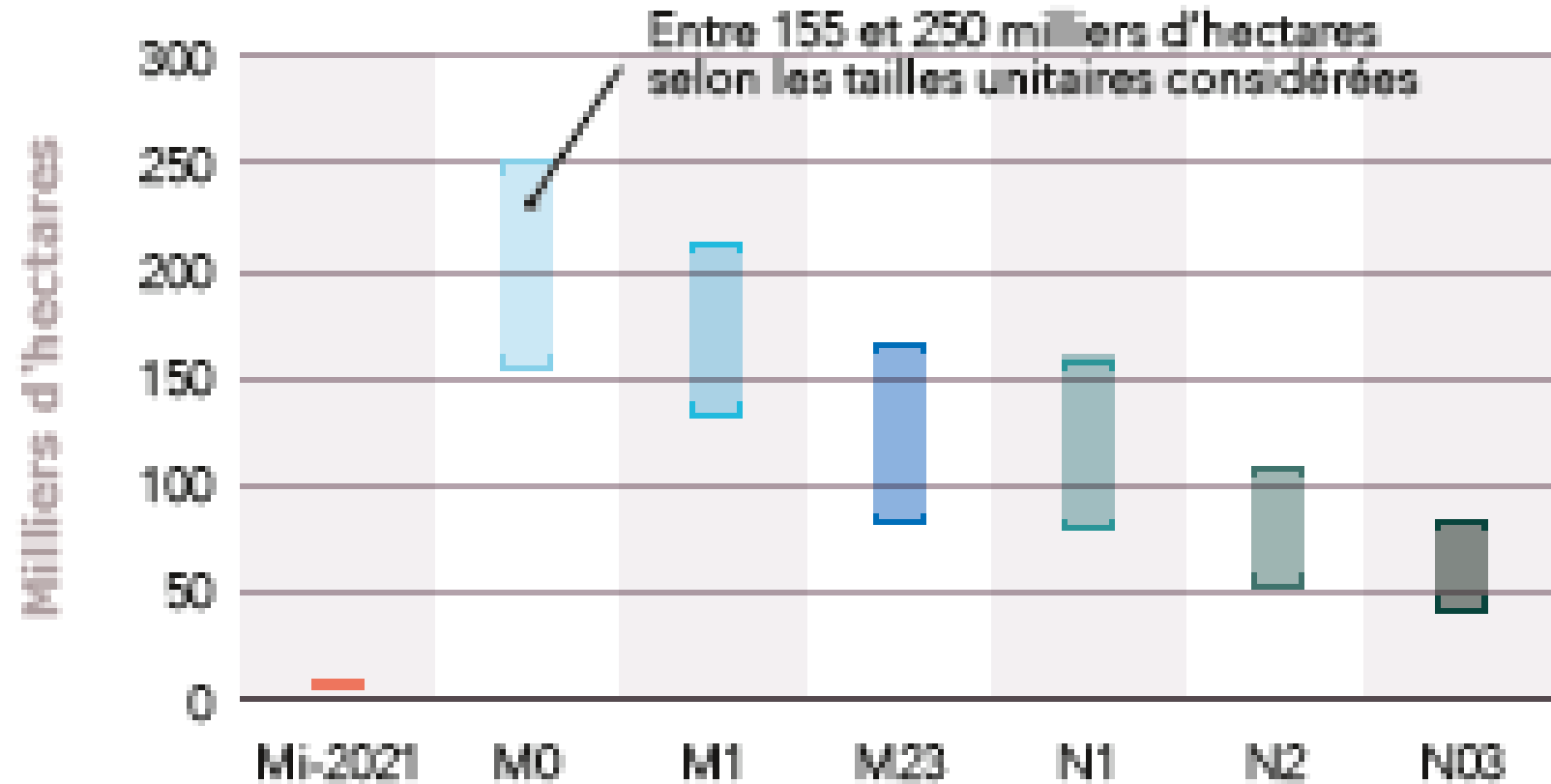
Filières :

	NARRATIF	RÉPARTITION DE LA PRODUCTION EN 2050	CAPACITÉS INSTALLÉES EN 2050 (EN GW)*					BOUQUET DE FLEXIBILITÉS EN 2050
			Solaire	Éolien terrestre	Éolien en mer	Nucléaire historique	Nouveau nucléaire	
M0 100% EnR en 2050	Sortie du nucléaire en 2050 : le déclassement des réacteurs nucléaires existants est accéléré, tandis que les rythmes de développement du photovoltaïque, de l'éolien et des énergies marines sont poussés à leur maximum.		~ 208 GW (soit x21)	~ 74 GW (soit x4)	~ 62 GW	/	/	↑↑↑ 15 GW 🔌 1,7 GW (1,1 MVE) 🏭 29 GW 🔋 26 GW
M1 Répartition diffuse	Développement très important des énergies renouvelables réparties de manière diffuse sur le territoire national et en grande partie porté par la filière photovoltaïque. Cet essor soutient une mobilisation forte des acteurs locaux participatifs et des collectivités locales.		~ 214 GW (soit x22)	~ 59 GW (soit x3,5)	~ 45 GW	16 GW	/	↑↑↑ 17 GW 🔌 1,7 GW (1,1 MVE) 🏭 20 GW 🔋 21 GW
M23 EnR grands parcs	Développement très important de toutes les filières renouvelables, porté notamment par l'installation de grands parcs éoliens sur terre et en mer. Logique d'optimisation économique et ciblage sur les technologies et les zones bénéficiant des meilleurs rendements et permettant des économies d'échelle.		~ 125 GW (soit x12)	~ 72 GW (soit x4)	~ 60 GW	16 GW	/	↑↑↑ 15 GW 🔌 1,7 GW (1,1 MVE) 🏭 20 GW 🔋 13 GW

N1 EnR + nouveau nucléaire 1	Lancement d'un programme de construction de nouveaux réacteurs, développés par paire sur des sites existants tous les 5 ans à partir de 2035. Développement des énergies renouvelables à un rythme soutenu afin de compenser le déclassement des réacteurs de deuxième génération.		~ 118 GW (soit x11)	~ 58 GW (soit x3,3)	~ 45 GW	16 GW	13 GW (soit 8 EPR)	↑↓ 15 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 11 GW 9 GW
N2 EnR + nouveau nucléaire 2	Lancement d'un programme plus rapide de construction de nouveaux réacteurs (une paire tous les 3 ans) à partir de 2035 avec montée en charge progressive. Le développement des énergies renouvelables se poursuit mais moins rapidement que dans les scénarios N1 et M.		~ 90 GW (soit x8,5)	~ 52 GW (soit x2,9)	~ 36 GW	16 GW	23 GW (soit 14 EPR)	↑↓ 15 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 5 GW 2 GW
N03 EnR + nouveau nucléaire 3	Le mix de production repose à part égale entre les énergies renouvelables et le nucléaire à l'horizon 2050. Cela implique d'exploiter le plus longtemps possible le parc nucléaire existant, et de développer de manière volontariste et diversifié le nouveau nucléaire (EPR 2 + SMR)		~ 70 GW (soit x7)	~ 43 GW (soit x2,5)	~ 22 GW	24 GW	~ 27 GW (soit ~14 EPR + quelques SMR)	↑↓ 13 GW 1,7 GW (1,1 MVE) 1 GW
Hypothèses communes			Hydraulique ~22 GW	Énergies marines Entre 0 et 3 GW	Bioénergies ~2 GW	Imports 39 GW STEP 8 GW		

Quelle empreinte au sol prévue ?

Projection du nombre d'hectares occupés par des panneaux photovoltaïques au sol à l'horizon 2050

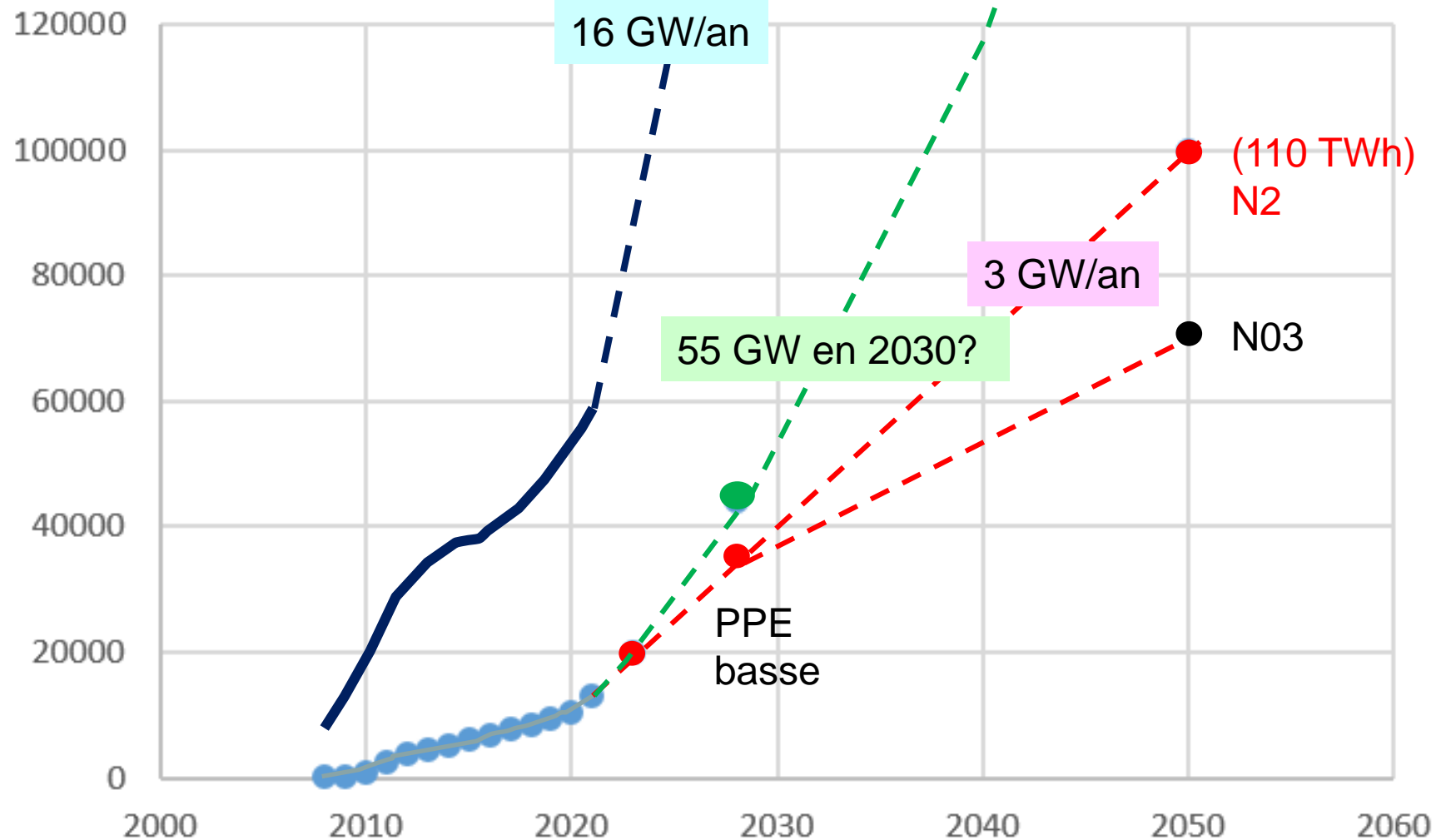


De 1500 à 2500 km²
Pour 208 GW

À comparer avec
50 000 km² de surfaces
artificialisées en France

Comparaison avec l'Allemagne

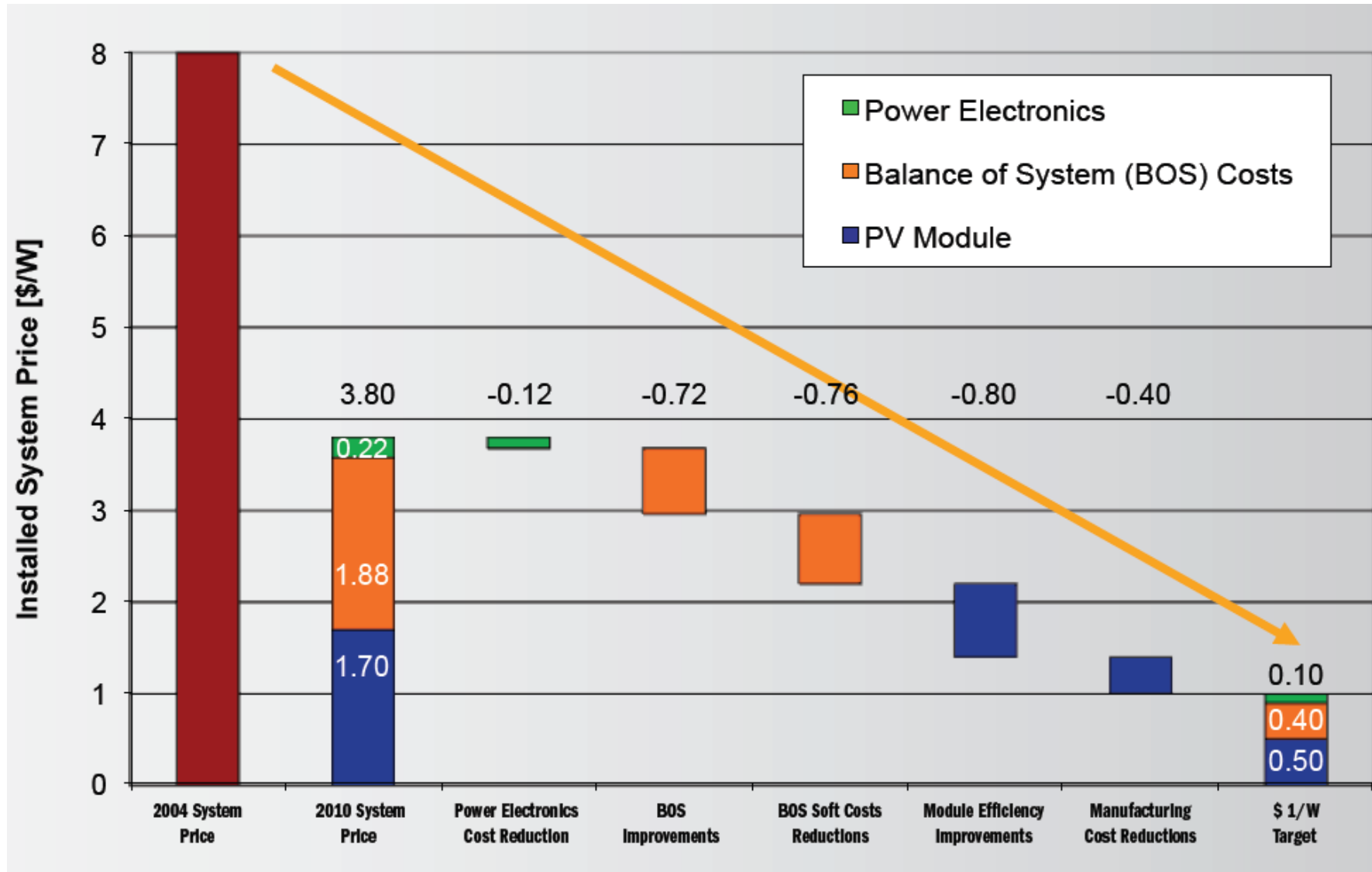
Capacité installée (MW)



Quelles prévisions au niveau mondial ?

Une prévision réalisée ! → programme SunShot (USA 2011) : 1 dollar/Watt en 2020 installé

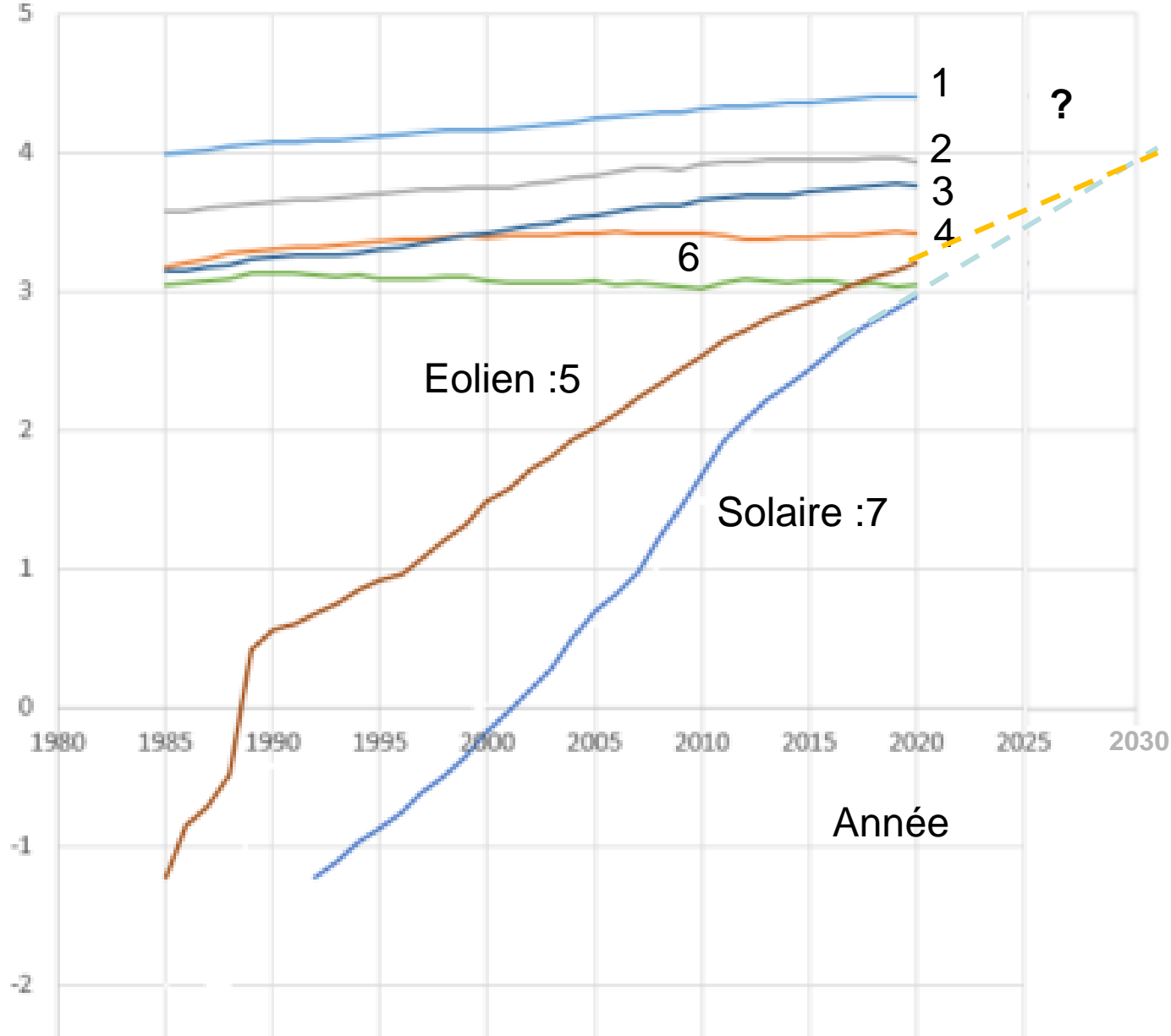
Présentation
Sénat
28/11/2011



1962 : Programme Moon Shot (J.F.K) 2011 : Sun Shot (B.O.) **Compétitivité d'ici 2020**

Evolution de la production électrique mondiale annuelle par source (en TWh)

Log (TWh)



1-Production totale

2-Charbon

3- Gaz

4-Nucléaire

5-Eolien

6-Pétrole

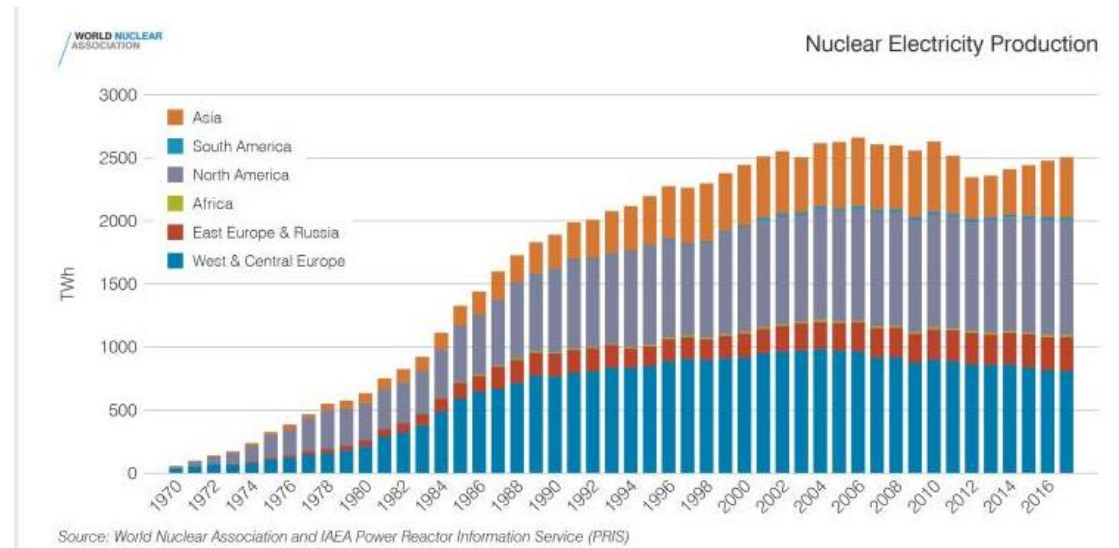
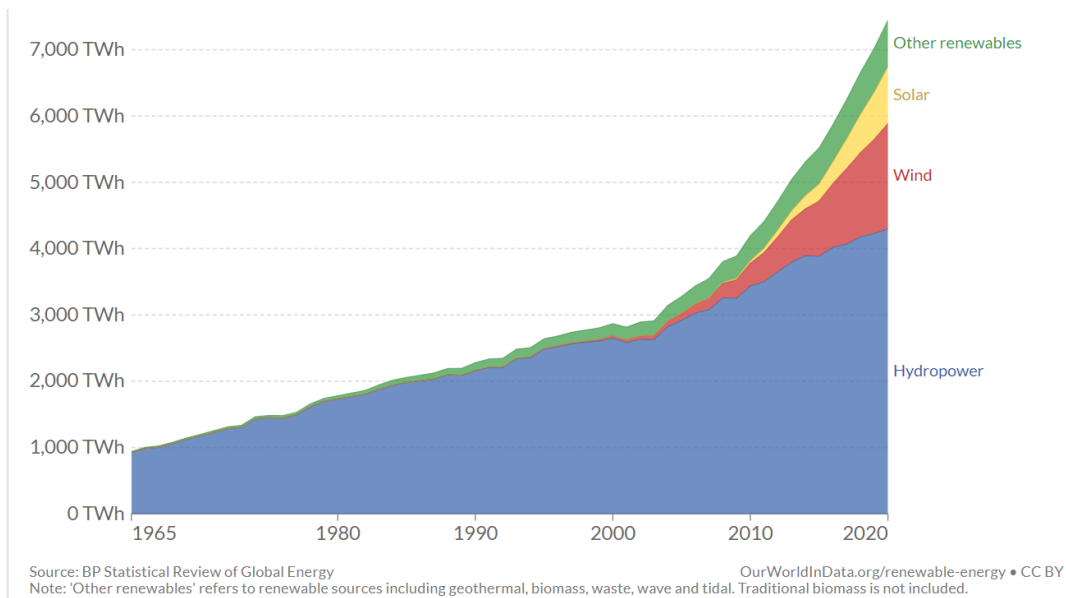
7-Solaire photovoltaïque

1-6 adapté de:

<https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked>

7: adapté de AIE PVPS avec 1 kW→1,2 MWh

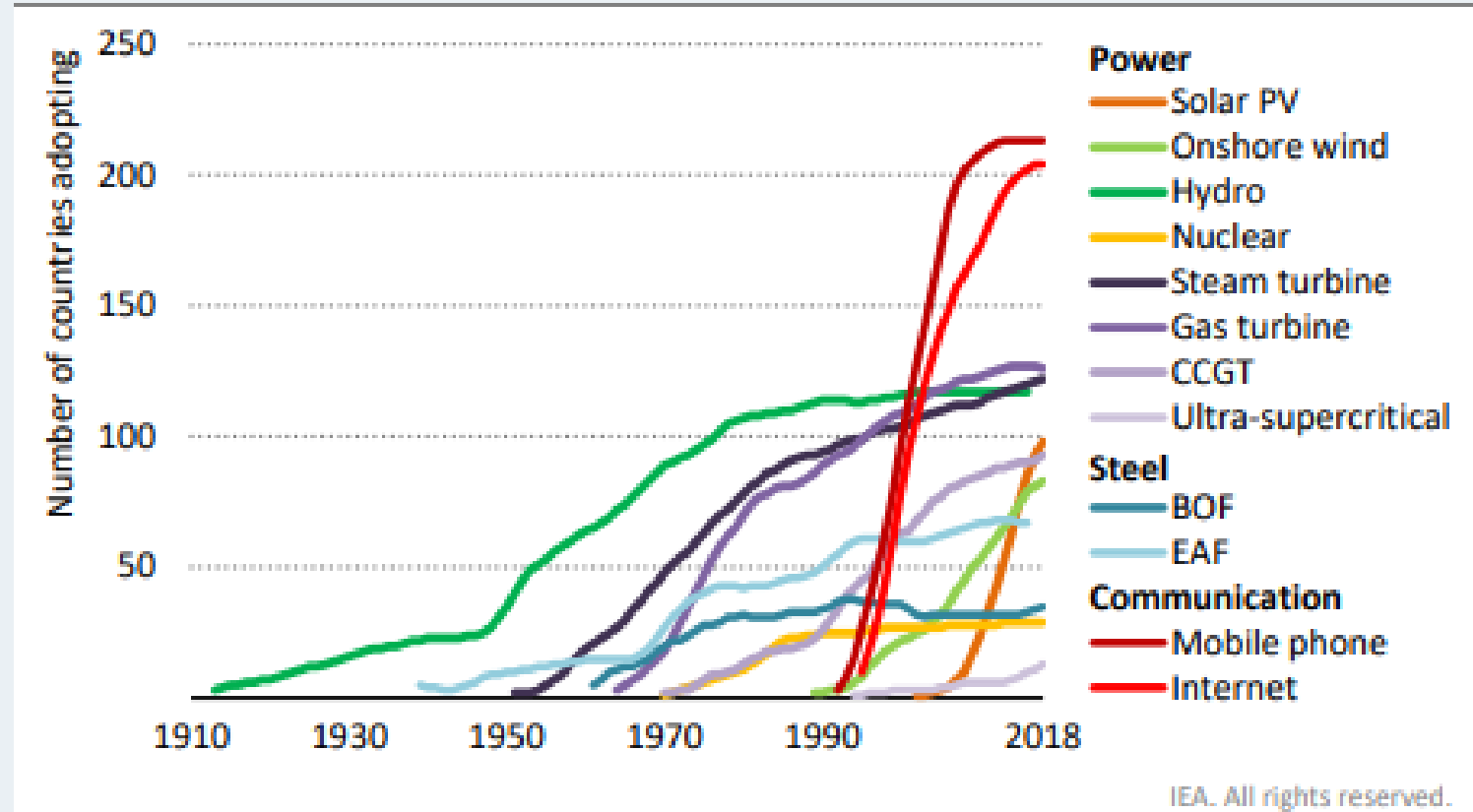
<https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2022/01/IEA-PVPS-Trends-report-2021-1.pdf>



<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Steady-growth-in-nuclear-generation-continues>

Fin 2019: 2586TWh

Figure 3.5 ▶ Number of countries that have adopted selected energy and non-energy technologies, 1910-2018

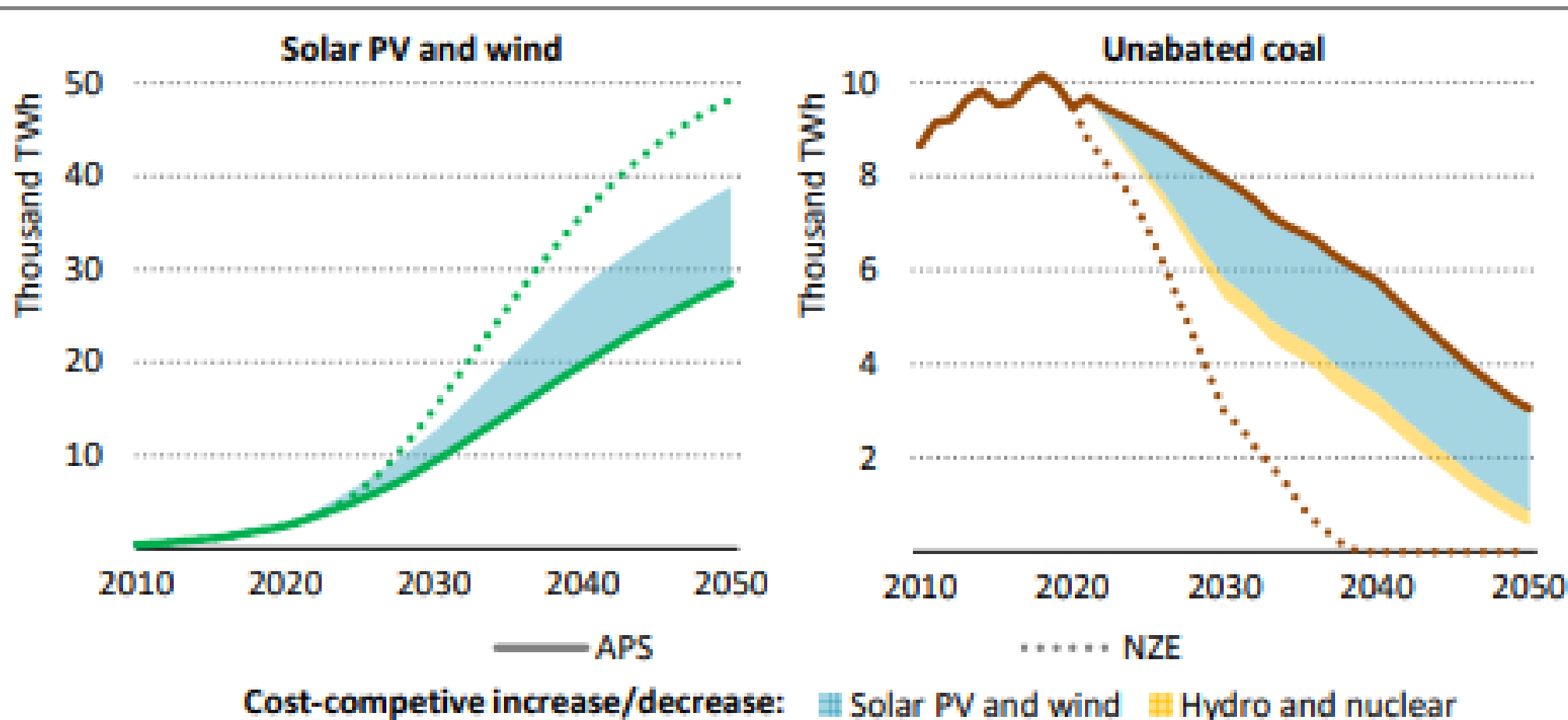


Compared with historical rates, a substantial acceleration in international diffusion of clean energy technologies is required on the path to net zero emissions

Notes: CCGT = combined-cycle gas turbine; BOF = basic oxygen furnace; EAF = electric arc furnace. Adoption is not defined here as the first observed exploitation of the technology, but rather exploitation at or above a threshold level, defined as 3% of the maximum ever observed per capita technology exploitation of the early adopters.

Sources: IEA calculations based on data from Comin and Hobijn, (2009); Maddison Project Database, (2020); S&P Global (March 2021); WSA, (various years); World Bank, (2021).

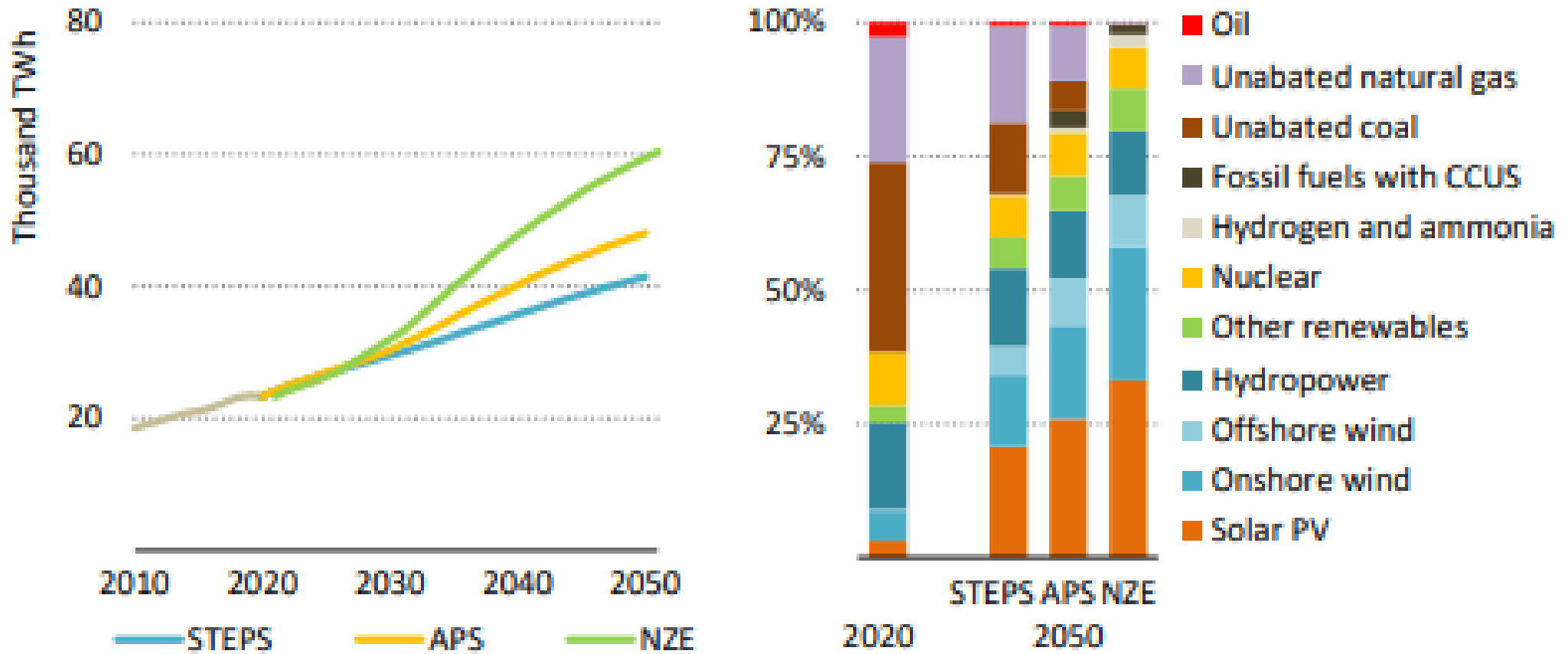
Figure 3.8 ▶ Global solar PV, wind and unabated coal-fired electricity generation in the Announced Pledges and Net Zero Emissions by 2050 scenarios



By 2030, 60% of the increase in solar and wind generation seen in the NZE could be achieved at no additional costs to consumers

Note: Cost-effective solar PV and wind are evaluated based on total system costs (Box 3.5).

Figure 4.20 ▶ Global electricity demand and generation mix by scenario




IEA. All rights reserved.

*More electrification and clean electricity transitions lie ahead,
and policy makers have the power to accelerate the pace of progress*

BROADER PERSPECTIVE

On the role of solar photovoltaics in global energy transition scenarios

Christian Breyer¹ * , Dmitrii Bogdanov¹, Ashish Gulagi¹, Arman Aghahosseini¹, Larissa S.N.S. Barbosa^{2,3}, Otto Koskinen¹, Maulidi Barasa¹, Upeksha Caldera¹, Svetlana Afanasyeva¹, Michael Child¹, Javier Farfan¹ and Pasi Vainikka²

¹ Lappeenranta University of Technology, Skinnarilankatu 34, 53850 Lappeenranta, Finland

² VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., P.O. Box 20, 53851 Lappeenranta, Finland

³ Luiz de Queiroz College of Agriculture, University of São Paulo, Av. Pádua Dias, 11, Caixa Postal 9, 13418-900 Piracicaba, Brazil

Benchmarking global energy transition scenarios and the respective role of solar PV. Abbreviations: total primary energy demand, TPED, and electricity, elec. The colour code indicates the role for solar PV as follows: little (red), moderate (orange) and substantial (green).

	[Ref]	PV capacity				share PV on TPED- elec			share solar total on TPED-all			
		2030 [GWp]	2040 [GWp]	2050 [GWp]	2100 [GWp]	2030 [%]	2040 [%]	2050 [%]	2030 [%]	2040 [%]	2050 [%]	2100 [%]
BNEF	[7]	1799	3687			7.7%	14.3%					
Greenpeace - ER	[18]	2839	4988	6745		11.4%	16.5%	19.9%	6.1%	14.1%	22.2%	
Greenpeace - Adv ER	[18]	3725	6678	9295		13.7%	18.2%	20.2%	7.7%	18.4%	29.1%	
IEA - NPS	[9]	949	1405			4.1%	5.5%		0.8%	1.2%		
IEA - 450	[9]	1278	2108			6.0%	9.4%		1.1%	2.5%		
IEA-PVPS	[19]	1570	3930	11010	133000				0.7%	1.4%	3.3%	25.3%
IRENA REmap - mix	[20]	1760				15.9%		16.7%	17.0%		22.0%	
IRENA REmap - doubling	[20]	2520						21.7%			29.0%	
WWF	[21]					7.6%	16.3%	29.0%	7.1%	17.8%	30.6%	
IIASA-GEA - Efficiency	[22]								6.9%		23.7%	
IIASA-GEA - Mix	[22]								7.7%		20.6%	
IIASA-GEA - Supply	[22]								9.0%		17.0%	
IPCC - 5th AR WGIII - MESSAGE	[23]								6.4%	12.9%	15.3%	42.8%
IPCC - 5th AR WGIII - REMIND	[23]								0.4%	2.3%	6.6%	40.3%
IPCC - 5th AR WGIII - GCAM	[23]								0.4%	1.1%	1.3%	2.7%
WBGU	[24]								4.0%	10.6%	27.7%	66.9%
Jacobson and Delucchi	[25]	32700	32700	32700	32700						40.0%	40.0%
Shell - Mountains	[26]								1.5%	2.4%	3.6%	37.7%
Shell - Oceans	[26]	1800		20000					3.2%	8.2%	13.6%	
min		950	1405	6750	32700	4.1%	5.5%	19.9%	0.8%	1.1%	1.3%	2.7%
max		3730	6680	32700	133000	15.9%	18.2%	29.0%	9.0%	18.4%	40.0%	66.9%
average		2027	3799	15950	82850	9.5%	13.4%	21.5%	5.0%	7.7%	19.1%	36.5%

Table II. Global solar photovoltaic (PV) demand subdivided by the nine major world regions of the world.

	Population 2030	Electricity demand 2030	Electricity demand 2030	PV prosumer	PV plants	PV total	PV electricity	PV share
Integrated		Electricity	Integrated					
	[mil]	[TWh]	[TWh]	[GW _p]	[GW _p]	[GW _p]	[TWh]	[%]
Northeast Asia	1546	9878	13 496	1509	2806	4315	6986	48
Southeast Asia	646	1630	2635	150	609	758	1425	51
India/SAARC	1922	2597	3376	145	815	960	1880	50
Eurasia	244	1450	2550	92	171	263	388	15
Europe	675	4183	5127	608	353	991	1384	27
MENA	529	1813	7917	85	1668	1755	4098	49
Sub-Saharan Africa	1384	866	1223	61	241	302	636	48
North America	558	6059	10 304	812	1038	1850	3452	32
South America	445	1813	2780	268	496	764	1419	48
World	7949	30 289	49 408	3730	8197	11 958	21 668	41
				31%	69%			

Data are based on [30,33,40–47] and visualised in more detail in Figures 3–7, with updated results for Northeast Asia based on latest assumptions for all major world regions.

31 MAY 2019 • VOL 364 ISSUE 6443

Science

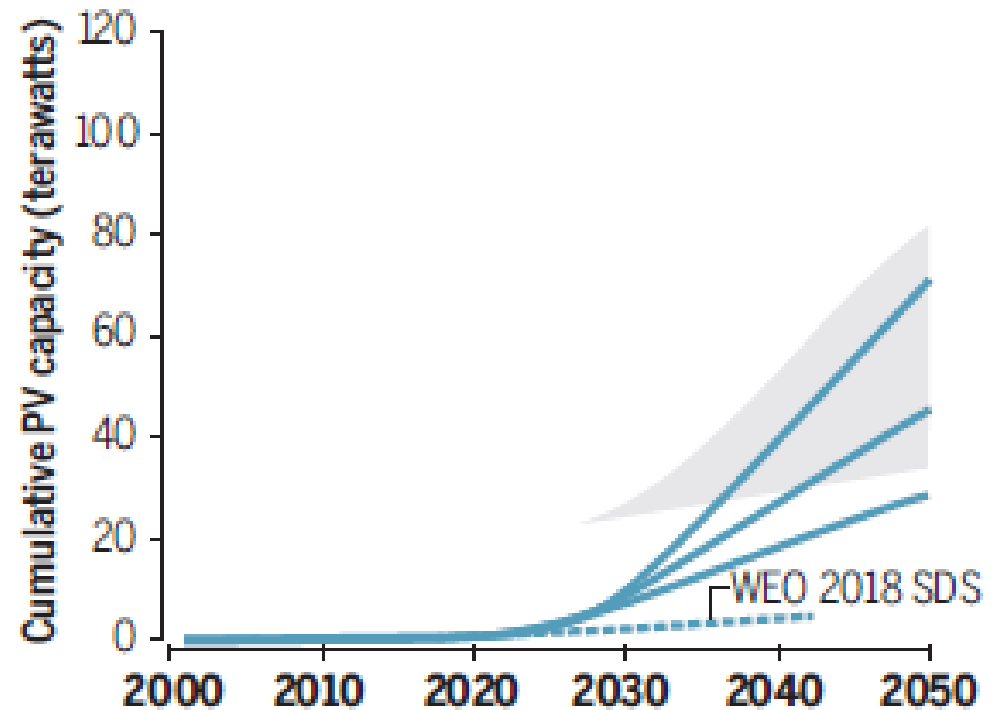
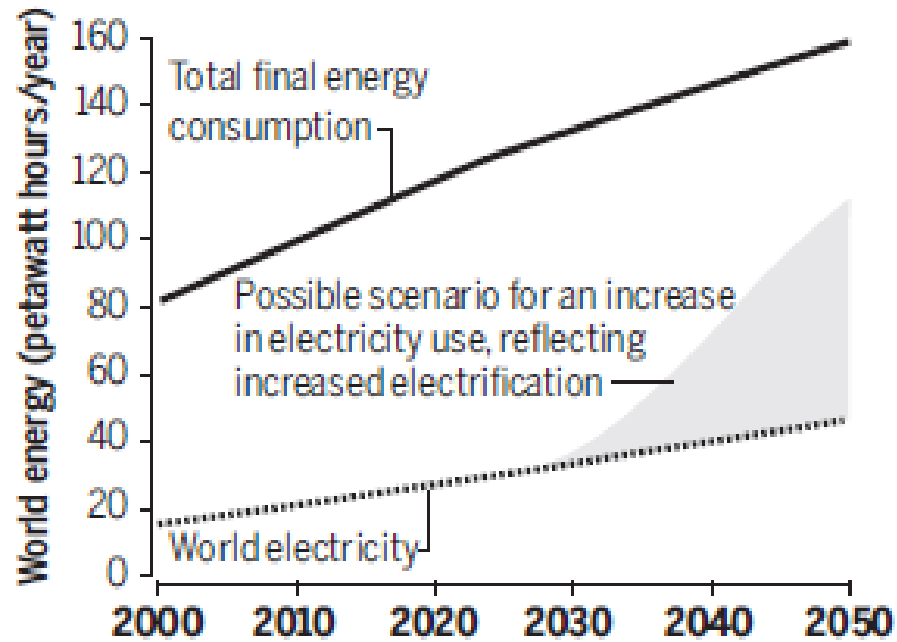
Terawatt-scale photovoltaics: Transform global energy

Nancy M. Haegel, Harry Atwater Jr., Teresa Barnes, Christian Breyer, Anthony Burrell, Yet-Ming Chiang, Stefaan De Wolf, Bernhard Dimmler, David Feldman, Stefan Glunz, Jan Christoph Goldschmidt, David Hochschild, Ruben Inzunza, Izumi Kaizuka, Ben Kroposki, Sarah Kurtz, Sylvère Leu, Robert Margolis, Koji Matsubara, Axel Metz, Wyatt K. Metzger, Mahesh Morjaria, Shigeru Niki, Stefan Nowak, Ian Marius Peters, Simon Philipps, Thomas Reindl, Andre Richter, Doug Rose, Keiichiro Sakurai, Rutger Schlatmann, Masahiro Shikano, Wim Sinke, Ron Sinton, B.J. Stanbery, Marko Topic, William Tumas, Yuzuru Ueda, Jao van de Lagemaat, Pierre Verlinden, Matthias Vetter, Emily Warren, Mary Werner, Masafumi Yamaguchi and Andreas W. Bett

Science **364** (6443), 836-838.
DOI: [10.1126/science.aaw1845](https://doi.org/10.1126/science.aaw1845)

Scenarios for growth of PV

Total final consumption and world electricity, according to the 2018 World Energy Outlook (WEO) New Policies Scenario. The three solid blue curves provide possible scenarios for growth of PV cumulative capacity and electricity generation. A global average energy yield of 1370 kWh/kWp was used to correlate the axes for the left and right figures. See supplementary materials for details.



Quels sont les moteurs de l'action pour établir et appliquer les scénarios ?

Les faits?

L'urgence?

Les solutions?

Les intérêts et idées reçues ?

Les débats et controverses ?

Les idéaux?

La volonté politique ou sociale?

Visions avant les modèles : l'éthique de la modélisation énergétique à l'ère de la transition

Energy Research & Social Science 88 (2022) 102497



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Energy Research & Social Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/erss



Visions before models: The ethos of energy modeling in an era of transition

Sgouris Sgouridis^{a,*}, Christian Kimmich^{b,c}, Jordi Solé^e, Martin Černý^c, Melf-Hinrich Ehlers^{f,g},
Christian Kerschner^{c,d}

^a Dubai Electricity and Water Authority, DEWA R&D Center, Dubai, United Arab Emirates

^b Regional Science and Environmental Research Group, Institute for Advanced Studies (IHS), Vienna

^c Department of Environmental Studies, Faculty of Social Studies, Masaryk University, Brno, Czech Republic

^d School of Sustainability, Governance, and Methods; Modul University Vienna, Vienna, Austria

^e Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain

^f Agricultural Economics and Policy Group, ETH Zürich, Zürich, Switzerland

^g Agroscope, Tänikon, Ettenhausen, Switzerland



La figure 1 illustre la tendance des modèles E3 classiques à sous-estimer la contribution potentielle des énergies renouvelables variables des énergies renouvelables variables. La contribution mondiale de l'électricité photovoltaïque et éolienne a atteint 9,5 % en 2020 (d'après les données de l'AIE, sur les 25 849,9 TWh produits, le photovoltaïque a produit 837,9 TWh et l'éolien 1 606,0 TWh.1 606,0 TWh), ce qui rend déjà 139 des 891 scénarios du GIEC pour 2050 obsolètes 30 ans à l'avance. Cela est dû à un retard persistant dans la modélisation de leurs coûts réels [7,25,26] et des contraintes structurelles de la méthode de modélisation [10] parmi plusieurs autres explications et origines.

Traduit avec www.DeepL.com/Translator (version gratuite)

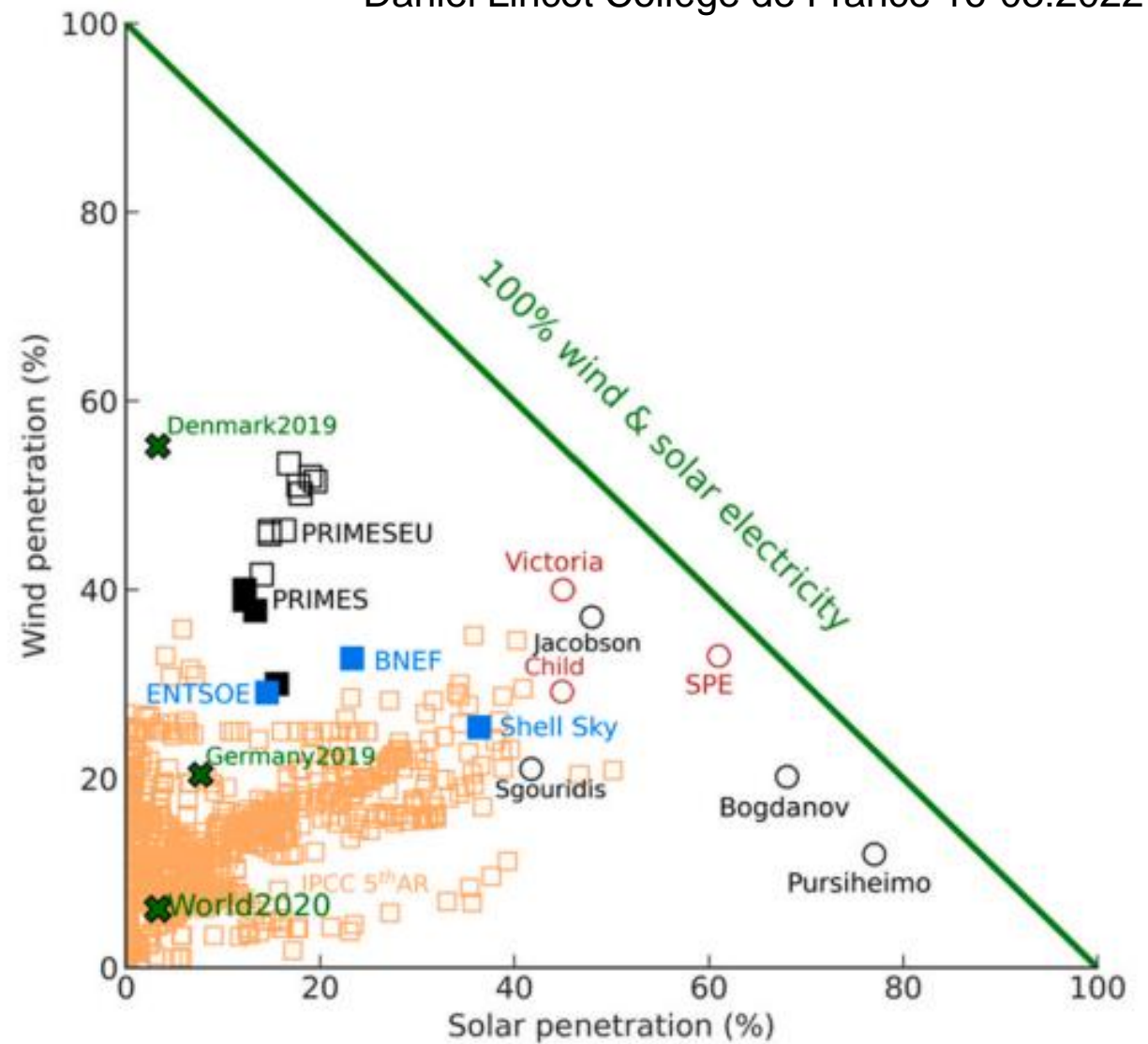


Fig. 1. Modeled Penetration of Wind and Solar in Electricity for 2050 showing IAM (IPCC AR5 and PRIMES as squares) vs. other Modeling Scenarios (as circles) and Current Ratios (as Xs) [recreated by the authors and modified from [9] with references in the original].

Traduction du résumé en français

Les modèles Énergie-Économie-Environnement (E3) occupent une place importante dans la politique énergétique et la planification de l'atténuation du changement climatique. Néanmoins, ces modèles ont un bilan mitigé lorsqu'ils sont évalués rétrospectivement et présentent des biais qui peuvent les rendre contre-productifs pour une politique prescriptive pendant la transition.

Nous soutenons qu'en période de transition énergétique Il est préférable de développer une vision du futur système énergétique souhaité plutôt que de s'appuyer sur des solutions technico-économiques basées sur des objectifs simples (par exemple, des émissions de carbone plus faibles).

Nous appuyons cet argument par le biais de inférence raisonnée étayée par des exemples historiques. Une évaluation critique des exercices de modélisation E3 met en évidence les biais, structurels ou implicites, favorisant les modalités existantes du système énergétique.

En conséquence, si les modèles E3 sont utilisés sans critique pour formuler une politique énergétique à long terme, il existe un risque de performativité involontaire ou délibérée empêchant une transition radicale.

Compte tenu des effets significatifs de l'apprentissage par la pratique en matière de réduction des coûts technologiques, l'évolution des systèmes énergétiques est dépendante du chemin parcouru et de l'expérience acquise. L'évolution des systèmes énergétiques dépend de la trajectoire suivie et est renforcée par les réactions de la politique technologique. **L'Energiewende de l'Allemagne en est la preuve.**

Par conséquent, il est préférable de donner la priorité à une articulation claire de la vision de l'avenir souhaité qui peut être partagé avec les parties prenantes (stake holders) a priori. Utiliser ensuite les modèles comme outils exploratoires pour évaluer les aspects économiques et dimensionner les interventions correspondantes. Celles-ci devraient inclure une stratégie technologie ciblée qui vise à banaliser les innovations techniques pertinentes grâce à l'apprentissage par la pratique et aux économies d'échelle. **Idéalement, ces modèles devraient être ouverts, exploratoires, réflexifs et intégrer la dynamique de l'innovation.**

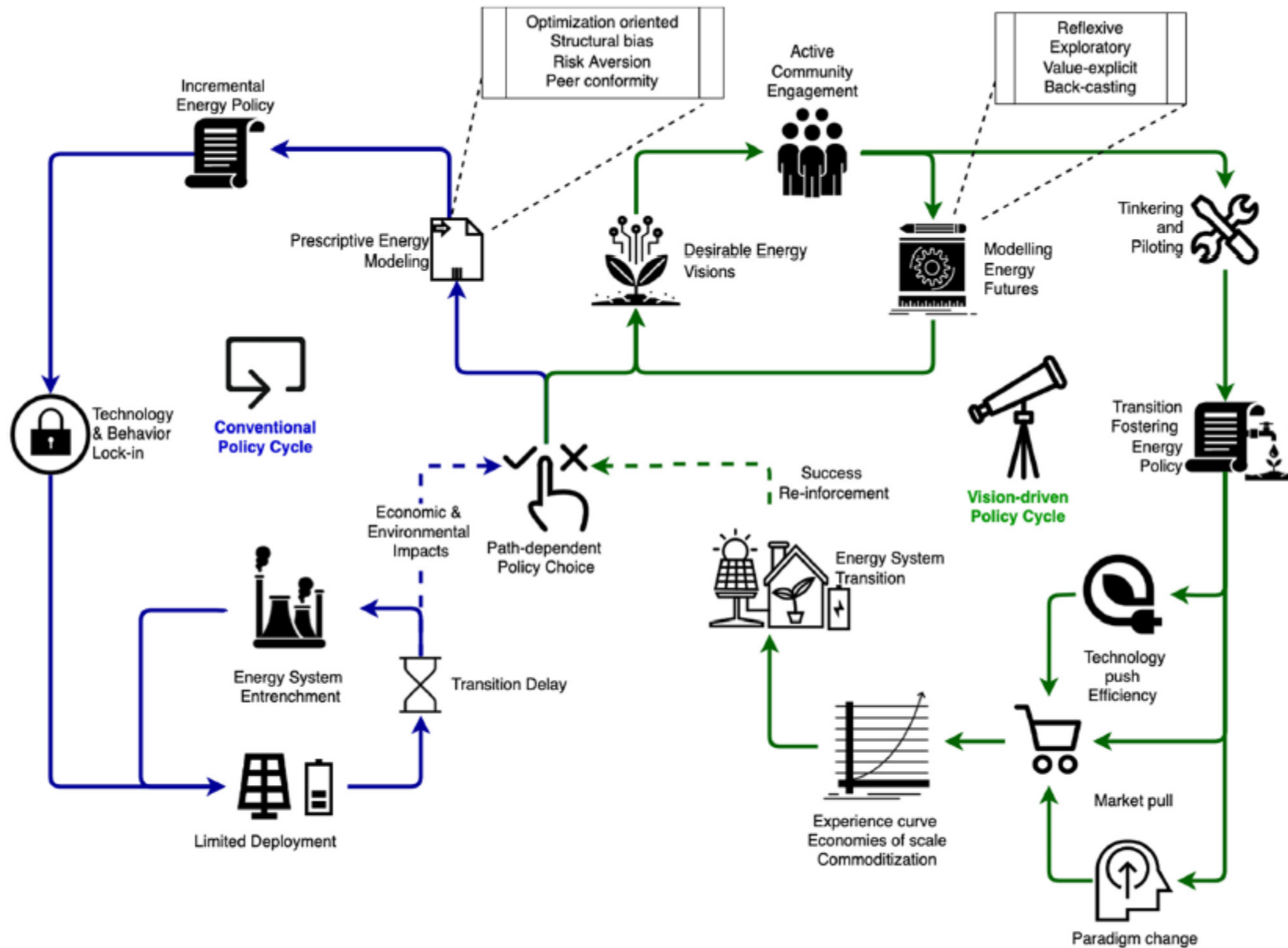


Fig. 3. Visualizing the conventional energy policy cycle (blue, left side) vs. the vision-driven energy policy cycle (green, right side).

Exemples typiques des scénarios visions

- Exemple phare → programme de transition énergétique « Energiewende » en Allemagne
 - Ni fossiles, ni nucléaire (1980) → 100% renouvelables (elec)
- Plan européen 20-20-20 de l'Europe pour 2020
 - 20% efficacité énergétique, 20% de réduction des émissions de CO₂, 20% de renouvelables
- Objectif 50% de renouvelables en 2050 (Europe)
- Objectif 30-30-30 pour le photovoltaïque en 2030 (IPVF-COP21 en 2015)

Les débats

4 Les options sur la table : un système électrique « renouvelable + nucléaire » ou « 100% renouvelable » à terme

Aujourd'hui, les réacteurs de troisième génération ont vu leur coût s'accroître tandis que celui des énergies renouvelables a diminué.

Pour autant, les caractéristiques mêmes de l'éolien et du solaire ne permettent pas de conclure en comparant leurs seuls coûts de production : la variabilité de la production doit être compensée par des moyens de flexibilité, leur intégration au système nécessite de renforcer les réseaux.

La discussion doit donc comparer le coût complet des différentes options (« coût système ») et non le coût individuel de chaque technologie.

Remise en cause de la notion de LCOE ?
Levelized costs of electricity

La nature du débat de société a également changé.
Si le nucléaire suscite toujours une opposition sous l'angle du risque d'accident et des enjeux éthiques associés aux déchets radioactifs, les énergies renouvelables soulèvent également des controverses mêlant considérations sociétales et environnementales : incidence de l'hydraulique sur la biodiversité, bilan carbone du photovoltaïque, emprise paysagère de l'éolien et conséquences de leur variabilité (« que se passe-t-il une nuit sans vent ? »).

Bilan carbone du photovoltaïque ?
Que se passe-t-il une nuit sans vent?

Conditions et prérequis en matière de faisabilité technique pour un système électrique avec une forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050

Le présent rapport porte sur les conditions et les exigences relatives à la faisabilité technique des scénarios comportant une part élevée d'EnR variables.

Les partisans d'une cible « 100 % EnR » affirment — avec raison — que beaucoup de prédictions alarmistes sur les limites techniques à l'intégration des EnR faites par le passé se sont révélées fausses.

Cependant, il n'existe aucune démonstration de la faisabilité d'une intégration très poussée d'EnR variables comme l'éolien et le photovoltaïque sur un grand système électrique...

Cette incertitude a suscité chez certains un scepticisme quant à la possibilité de faire reposer la lutte contre le changement climatique sur le développement des seules EnR variables, notamment en comparaison à d'autres solutions bas carbone.

**Pour avoir une autre vision, à charge, sur les énergies renouvelables :
Voir et analyser les présentations de Jean Marc Jancovici**



Exemple: Jean Marc Jancovici : Du business sans énergie et sans climat ? –
Conférence à l' Ecole Supérieure de Commerce de Paris (ESCP-Business School) - 06/09/2021
Séquence : 58 mn 47-1h01mn

Octobre 2021 : point d'actualité Plus encourageant !



https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/21189_Plan-actions_Photovoltaïque-1.pdf

Environnement

Plan d'actions du photovoltaïque : Barbara Pompili espère "mille projets" de panneaux solaires d'ici 2025

Mercredi 3 novembre 2021 à 9:41 - Par Laurine Benjebri, France Bleu



La ministre de la Transition écologique, Barbara Pompili, a annoncé ce mercredi 3 novembre le plan d'actions du gouvernement pour développer l'énergie solaire photovoltaïque. Parmi les dix mesures contenues dans ce plan, la simplification des procédures, la limitation de la consommation du foncier.



La ministre de la Transition écologique, Barbara Pompili a dévoilé ce mercredi les grandes lignes du plan d'actions du photovoltaïque.
© Radio France - Jean-Christophe Bourdillat

"On a besoin d'un grand plan" sur les énergies renouvelables, avoue ce mercredi 3 novembre sur franceinfo Barbara Pompili, la ministre de la Transition écologique. Pour accélérer le

Les mesures présentées

- **FACILITER LE DÉVELOPPEMENT DU PHOTOVOLTAÏQUE DANS LES ZONES PRÉSENTANT LE MOINS D'ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX**
 - *Mise en place de dispositifs de soutien spécifiques pour le photovoltaïque sur bâtiment et terrains dégradés*
 - *Solaire obligatoire sur les entrepôts, hangars et parkings (loi climat et résilience du 22 août 2021)*
- **MOBILISER DE NOUVELLES SURFACES POUR LE DÉVELOPPEMENT DU PHOTOVOLTAÏQUE, TOUT EN MINIMISANT LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX**
 - *Rythme régulier d'appels d'offre incluant des enveloppes dédiées aux projets sur toitures et favorisant les projets au sol sur terrains dégradés (3 GW entre 2021-2026)*
 - *1 000 projets photovoltaïques sur foncier public d'ici 2025 (agence de gestion)*
 - *Mieux documenter les impacts sur la biodiversité, les sols, les paysages et favoriser les bonnes pratiques*
- **SIMPLIFIER LES PROCÉDURES ADMINISTRATIVES POUR LES PROJETS PRÉSENTANT LE MOINS D'IMPACT EN TERMES D'OCCUPATION DES SOLS**
 - *Alléger les procédures administratives pour les petits projets*
- **ACCOMPAGNER LES ACTEURS DU PHOTOVOLTAÏQUE**
 - *Accompagner les développeurs de projets*
 - *Diminuer des coûts de raccordement pour les petits projets*
 - *Accompagner les collectivités*
 - *Un label Villes et départements solaires*

Ne pas oublier :

→ **Un plan de réindustrialisation**

→ **Fabrication de panneaux solaires en France**

Transparents de réserve

Figure 9 – Capacités et durées de stockage de l'électricité par différents moyens

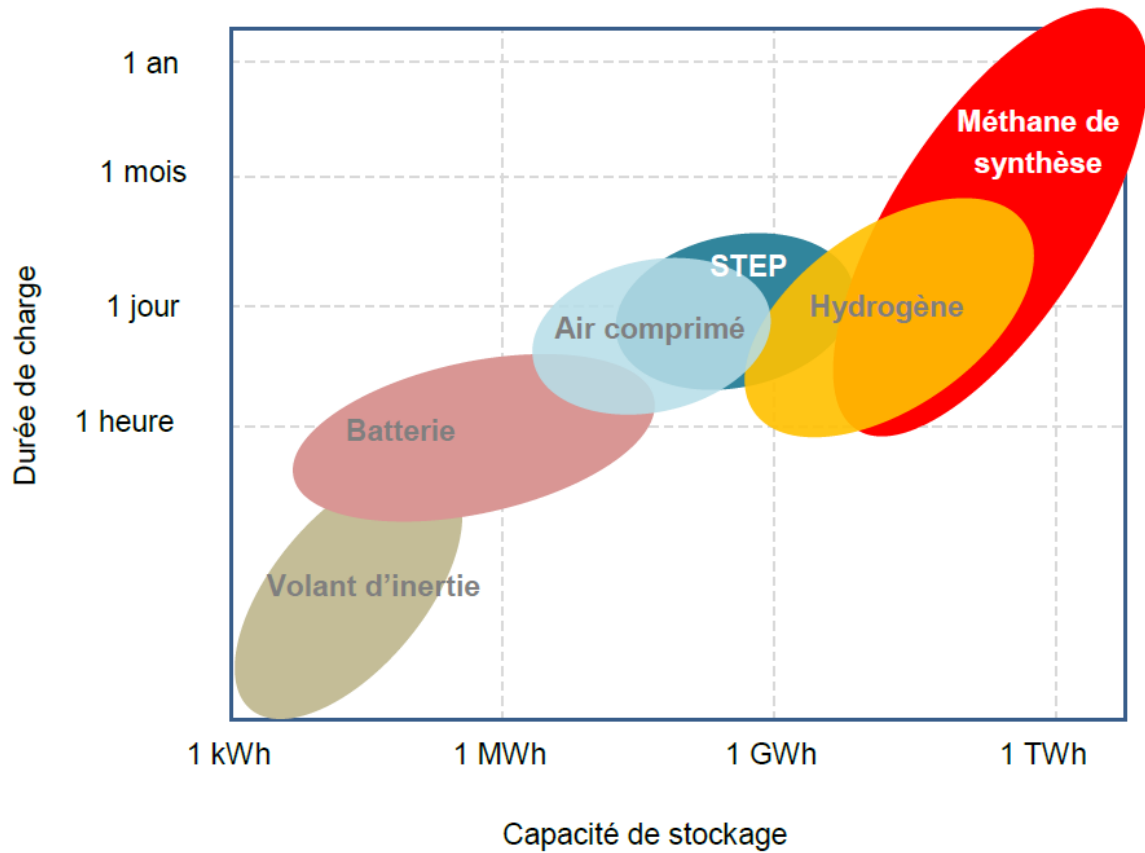
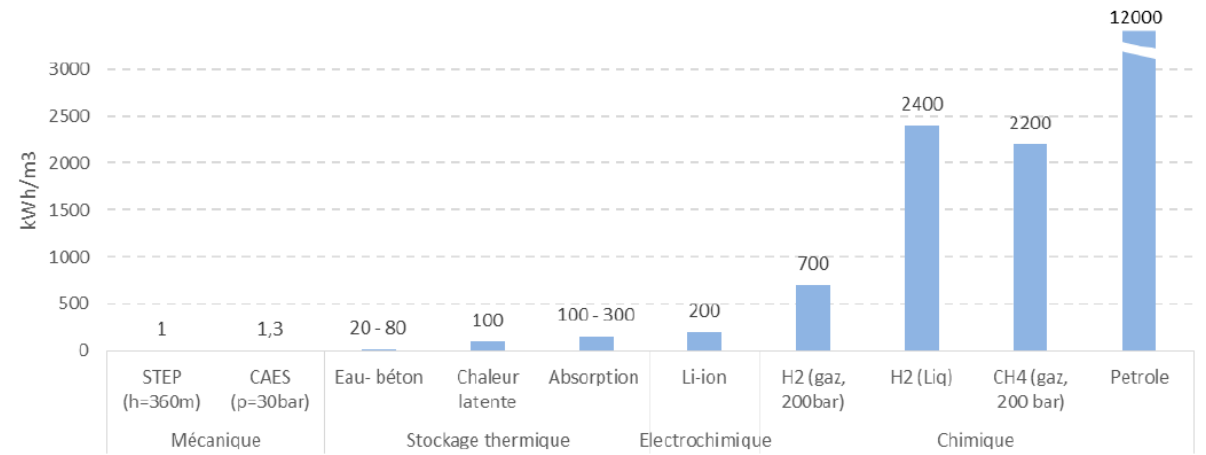
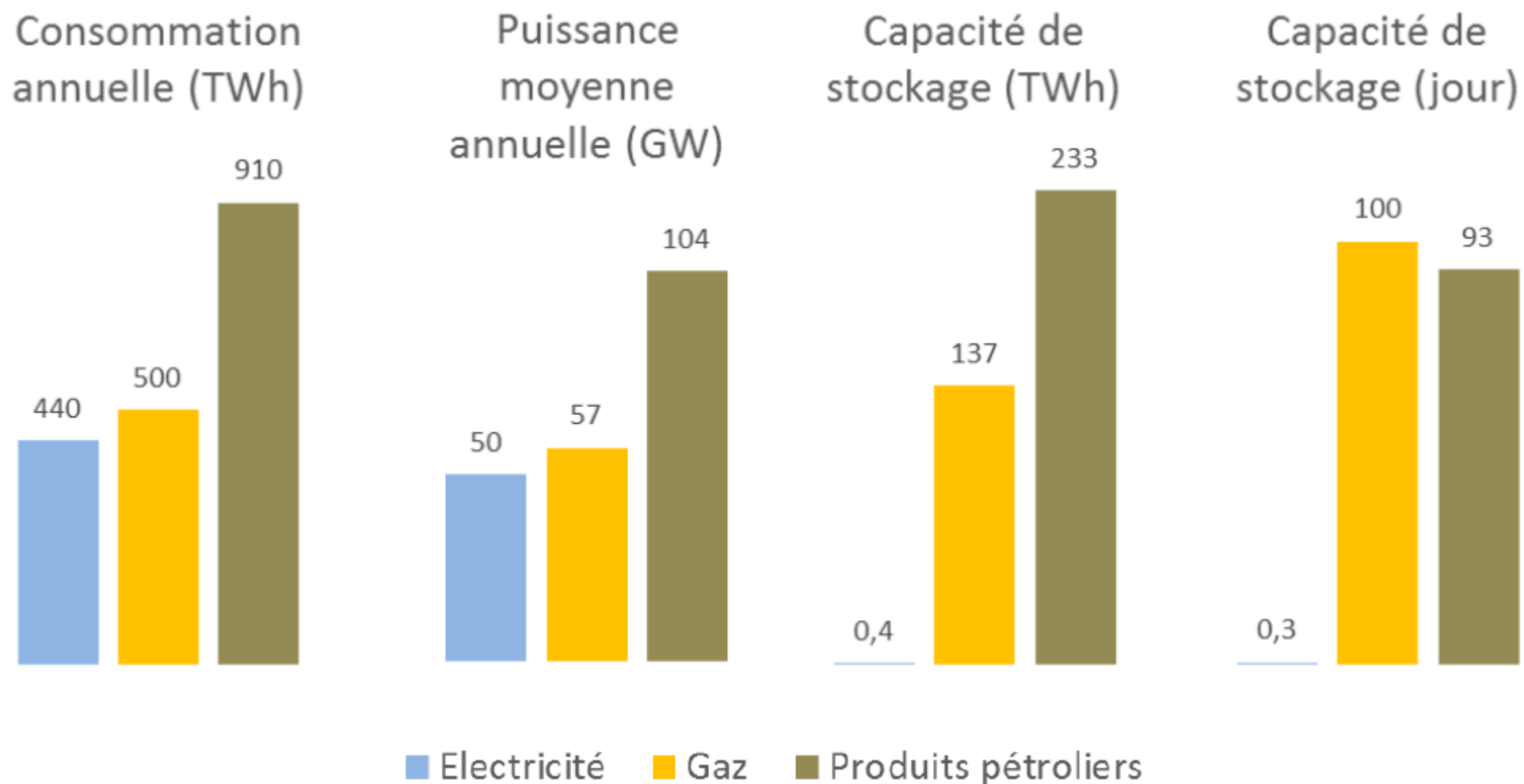


Figure 3 – Comparaison de différentes densités énergétiques volumiques



Source : Prof. Sauer, RWTH Aachen

Figure 2 - Consommation énergétique et capacité de stockage en France (2012)



NB : la capacité de stockage en jours est estimée à puissance moyenne annuelle

Source : E&E consultant d'après (SOES, 2013), (DGEC, 2008), (DGEC, 2009), (DGEC, 2011)