

# Projections quantifiées du nucléaire mondial

Le présent texte -évolutif- revient sur les projections quantifiées du nucléaire existant et des projets envisagés, dans le contexte de la transition climatique des prochaines décennies.

Les calculs sont donnés dans le tableur associé et dans les sources citées. Ce travail sera mis à jour pour tenir compte de la publication finale du GIEC AR6 wg » et de ses synthèses au cours de l'année 2023

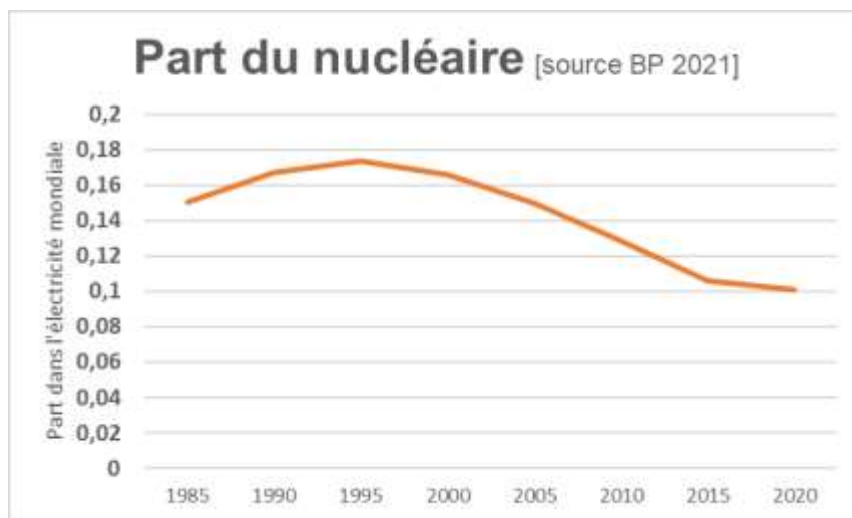
Il a été élaboré à l'initiative de Antoine Bonduelle. Pour contacter les auteurs contact@ee-consultant.fr

## Table des matières

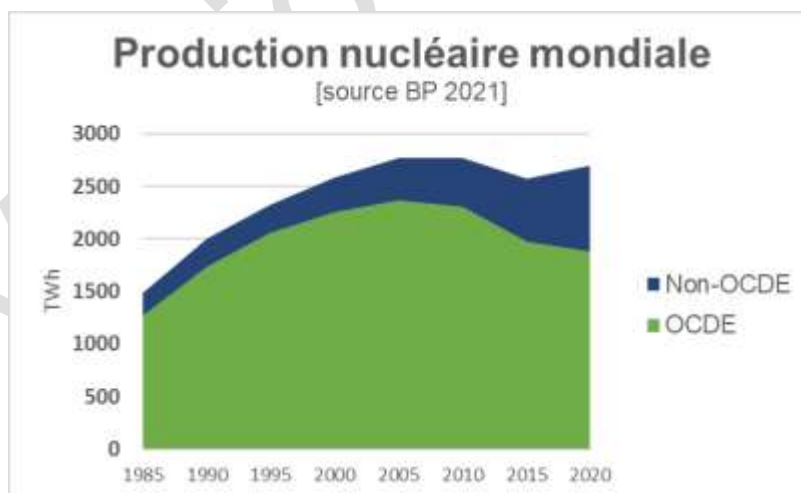
Les conditions d'un maintien mondial du parc nucléaire .....	2
Quantification du vieillissement .....	3
Chantiers lancés pour un maintien du parc .....	5
Constructions en cours .....	6
Les fermetures anticipées .....	6
Les scénarios du doublement (fourchette maxi GIEC, AIEA, AIE Zero...) .....	7
AIEA .....	8
Les projections de l'AIE .....	15
Des STEPs au Zéro Emissions .....	16
Des STEPs aux APC .....	19
Un scénario « classique » de croissance .....	24
Les messages du GIEC .....	25
Rapport 1,5°C de 2019 .....	26
Le cas des scénarios « forte croissance de la demande » .....	26
Les discussions en vue de l'AR6 .....	29
En conclusion sur les consensus .....	31
« Nucléaire Fade » ou « Remontada » : Les scénarios probables .....	31
Projections pour la Chine ; .....	34
Les constructions dans le reste du monde .....	36
Les « outliers », scénarios tout-nucléaire portés en France .....	37

## Les conditions d'un maintien mondial du parc nucléaire

Une première donnée à quantifier est la construction nécessaire pour maintenir un parc aux environs de 400 GWe de puissance nucléaire. Le parc nucléaire mondial est en effet en déclin relatif. Sa part de l'électricité mondiale passe de 17,5% en 1996 à 10% environ en 2020.



Mais ce déclin est lié à l'augmentation vertigineuse des consommations dans les pays émergents via le charbon, et dans une moindre mesure à la montée des énergies renouvelables ou du gaz, avec une production nucléaire assez similaire depuis l'an 2000 autour de 2500 TWh, avec cependant un déclin dans les pays OCDE<sup>1</sup> et une répartition croissante dans les pays émergent (dont la Chine).



<sup>1</sup> Annuaire BP sur <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>

Mais cette situation stable décrite notamment par Mycle Schneider et son équipe du WNISR<sup>2</sup> est trompeuse, car le parc nucléaire s'est maintenu bon an mal an depuis une vingtaine d'années à un niveau similaire de production en se basant en grande majorité sur un parc déjà existant au XXème siècle. Ce niveau de nucléaire ancien a commencé à décliner suivant les options des pays pour la durée de vie des réacteurs. De ce déclin dépend le nombre de réacteurs nécessaires pour maintenir le parc existant à son niveau actuel.

## Quantification du vieillissement

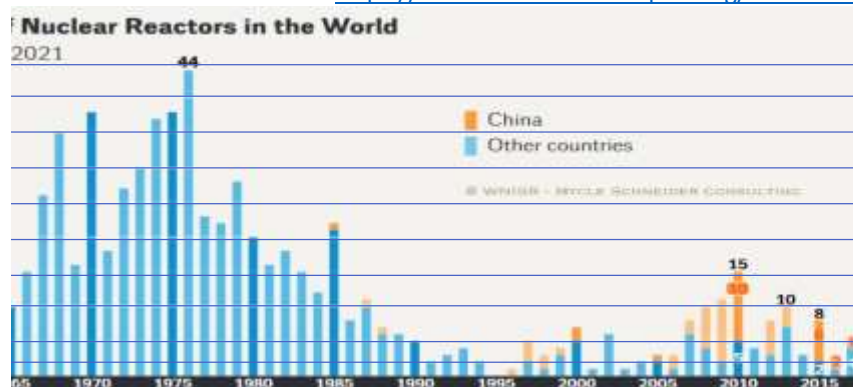
Pour cela une première façon d'évaluer la situation est de quantifier le « gap » des centrales en partant du parc existant. On prend pour cela trois hypothèses courantes de durée de vie (50, 55, 60 ans<sup>3</sup>), en considérant qu'un allongement plus important (70-80 ans) sont le fait d'une minorité de réacteurs et ne changent pas les résultats. Pour les trois durées de vie, l'évolution des productions est similaire.

On part des démographies de réacteurs publiées par l'AIEA, par exemple ici<sup>4</sup>

Une sortie plus rapide d'un grand nombre de réacteurs (cas notamment du Japon et de l'Allemagne (40 ans et moins) n'a rien d'improbable. Actuellement, les réacteurs les plus anciens ont 53 ans (AIEA base PRIS), le maintien en fonction au-delà de cette échéance pour un très grand nombre de réacteurs n'est donc pas acquis. Mais pour les besoins du présent exercice une moyenne de durée de vie de 45 ans voire moins ne modifie qu'à la marge le scénario. Les besoins de construction d'ici à 2050 bougent peu, et ces hypothèses accentuent le caractère conservateur du calcul.

Le graphe suivant présente ces trois hypothèses sur la durée de vie du parc existant de réacteurs. Il montre l'inflexion forte des fermetures, dans la décennie 2030-2040

<sup>2</sup> Source WNISR data viz 2021 <https://www.worldnuclearreport.org/reactors.html#tab=iso>;

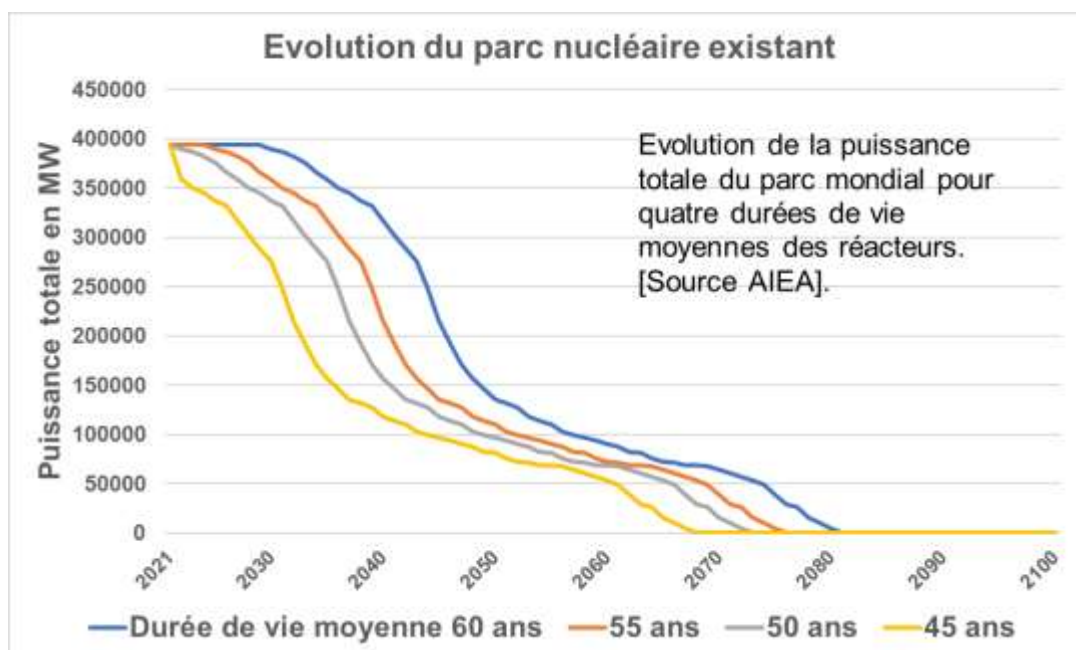


<sup>3</sup> Dans la plupart des pays considérés, une durée de 40 ans voire de 45 ans coïncide avec une sortie du nucléaire plus ou moins rapide, autre hypothèse considérée plus loin dans le texte. De plus, le raisonnement en durée de vie moyenne interdit sans doute les hypothèses qui bornent les scénarios (40 ans, 60 ans ou plus)

<sup>4</sup> [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-39\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-39_web.pdf)

liée à la fin de vie de la génération « baby-boomers » des réacteurs des années 70-80.5 Une minorité des centrales plus récentes se maintiennent au-delà de 2050.

[Graphe E&E Consultant 2022 sur base AIEA-PRIS]



Evolution de la population mondiale de réacteurs pour quatre hypothèses. E&E avec AIEA

Aux réacteurs inclus dans le graphe il faut ajouter les réacteurs actuellement en construction, les réacteurs abandonnés en cours de chantier et ceux dont la fermeture est anticipée par choix des politiques, des exploitants, ou des autorités de sûreté. [...]

Pour maintenir le parc à son niveau existant de production, les mises en service doivent alors s'échelonner sur le siècle de la façon suivante (en GW):

Mises en service de centrales pour le maintien du parc existant								
	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
60 ans	-47,9	72,0	182,2	45,0	26,2	59,4	-42,9	72,0
55 ans	-17,3	143,6	105,3	37,8	33,4	12,1	51,2	182,2
50 ans	5,1	180,2	60,1	27,4	53,5	20,9	180,2	60,1
45 ans	66,3	157,7	37,0	27,7	79,2	159,4	60,1	27,4

E&E Consultant d'après AIEA

Certaines valeurs sont négatives (augmentation nette du parc), en particulier la somme correspondant aux mises en services à court terme dans l'hypothèse où le parc mondial est prolongé à 60 ans en moyenne. Mais ces valeurs sont présentées ici pour mémoire, car une partie significative du parc (notamment au Royaume-Uni, en Suisse ou en Allemagne) sera fermée durant la décennie pour des raisons de vétusté (Royaume-Uni), de choix politique (Allemagne, Belgique) ou économique (Etats-Unis). En tout état de cause les besoins de mise en service sont alors reportés aux décennies suivantes.

Ces valeurs sont des ordres de grandeur, car par exemple, sur les réacteurs japonais fermés après l'accident de Fukushima, une partie significative sont dites en « fermeture de longue durée » avec des chances limitées d'être à nouveau autorisés.

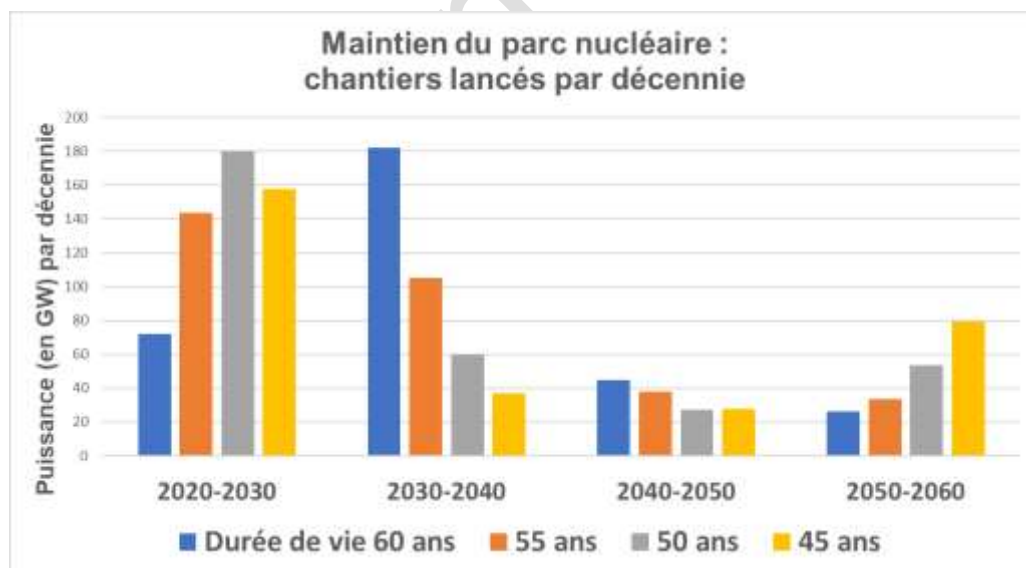
## Chantiers lancés pour un maintien du parc

Les mises en services estimées nécessaires pour le maintien du parc induisent des chantiers neufs avec un décalage dans le temps. Les commandes et démarrages de constructions annuelles nécessaires pour maintenir la puissance mondiale sur toute la période sont réparties par décennies. A droite du tableau, les constructions nécessaires, lissées en moyenne sur les dix, vingt et trente années d'ici à 2050 :

Durée de vie	Le gap de constructions (maintien à 394 GW)				Moyenne	Moyenne	Moyenne
	2020-2030	2030-2040	2040-2050	2050-2060	2020-2030	2020-2040	2020-2050
Durée de vie 60 ans	72	182	45	26	2	10	8
55 ans	144	105	38	33	10	10	8
50 ans	180	60	27	54	13	10	7
45 ans	158	37	28	79	11	7	6

E&E Consultant 2022 démarrages de chantiers pour le maintien du parc nucléaire mondial

Ce résultat est basé sur une durée de construction normative (10 ans). Il est assez robuste entre les hypothèses des durées de vie du nucléaire existant et au long de la période étudiée. Il correspond en gros à dix démarrages de chantier chaque année d'ici à 2040. Ensuite ce chiffre baisse puis remonte par la suite.



## Constructions en cours

La construction de nouveaux réacteurs s'élève actuellement à 63 unités pour une durée de chantier estimée à 10 ans (WNISR 2021) ou à 55 unités selon l'AIEA qui décompte 55 GW de puissance en cours de construction.

On peut aussi considérer la durée moyenne de construction sur la dernière période 2011-2020 observée par le WNISR qui aboutit à un chiffre très proche de 10 ans (9,9 années).

On remarque que les pays émergents comme l'Iran (36 ans), l'Argentine (33 ans), la Russie (18 ans) et même les USA (42,8 ans) ont des durées très différentes sur leurs chantiers notés « en cours ». Cela correspond au fait que les démarrages de réacteurs de cette période concernent souvent des chantiers très anciens ou problématiques<sup>6</sup>. A l'opposé, la Chine a plutôt tenu les délais sur le très grand nombre de centrales en construction, ce que l'on peut rapprocher de la construction en série en France dans les années 80. On a utilisé la séquence de mise en service publiée par le WNR<sup>7</sup> soit une puissance totale mise en service de 54047 MW qui recoupe bien les chiffres AIEA

## Les fermetures anticipées

La multiplication de ces fermetures anticipées et de l'arrêt de nouveaux chantiers dans plusieurs pays importants (Allemagne, Japon, Suisse, Belgique, Corée...) fait l'objet du scénario dit « *nuclear fade* » de l'Agence Internationale de l'Energie, traité plus loin. Du point de vue de la démographie de renouvellement du parc ancien, la différence est cependant faible puisque la fermeture de la plupart de ces centrales était programmée avant la fin de la période 2030-2050.

Enfin, il faudrait aussi tenir compte des abandons de chantier, qui ont été historiquement très hauts lors des périodes de forte construction nucléaire et ont représenté historiquement entre 10 à 15% des constructions entamées (soit 93 constructions abandonnées sur 787 réacteurs historiques selon le décompte du

Table 2 - Duration from Construction Start to Grid Connection 2011-2020

Country	Units	Construction Time (In Years)		
		Mean Time	Minimum	Maximum
China	37	6.1	4.1	11.2
Russia	10	18.7	6.1	30.1
South Korea	5	4.6	4.2	5.6
India	3	10.0	10.2	14.0
Pakistan	1	3.4	3.4	3.4
Argentina	1	33.0		33.0
Belarus	1	7.0		7.0
Iran	1	36.0		36.0
UAE	1	8.1		8.1
USA	1	42.8		42.8
World	63	9.9	4.1	42.8

6

Source: <https://www.worldnuclearreport.org/>

<sup>7</sup> [https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/\\_table\\_24\\_-\\_nuclearreactorsunderconstructiondetails.pdf](https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/_table_24_-_nuclearreactorsunderconstructiondetails.pdf)

WNISR<sup>8</sup>. Ceci n'est pas comptabilisé dans l'historique AIEA utilisé, qui présente « en net » les chantiers et les mises en service. Par simplification et pour le caractère conservateur du calcul, on ne tient pas compte de ces annulations de chantier. Un taux d'abandon, même inférieur au taux historique, devrait cependant être considéré pour une prospective plus réaliste.

Dans les paragraphes suivants on examine tout d'abord le doublement envisagé du parc par des acteurs tels que l'AIEA ou des scénarios de l'AIE, puis le déclin nucléaire dans les pays industrialisés décrit par la même Agence Internationale de l'Energie.

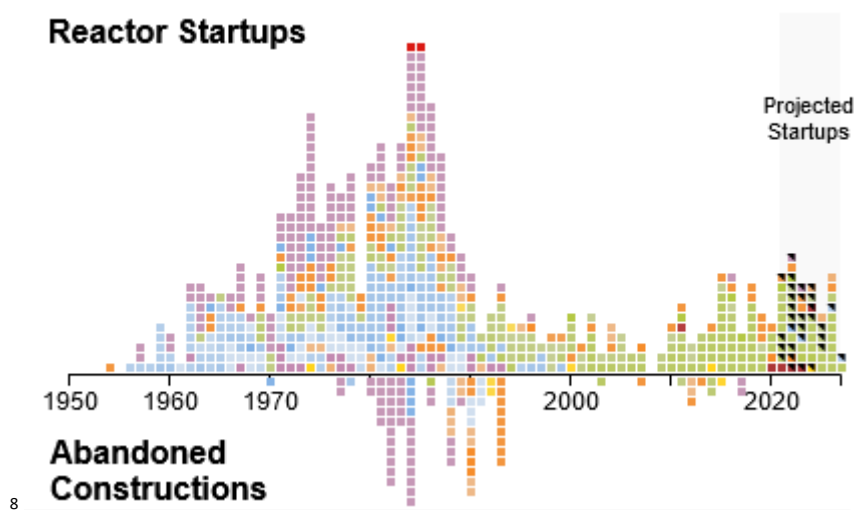
## Les scénarios du doublement (fourchette maxi GIEC, AIEA, AIE Zero...)

Pour étudier le *retour en grâce* du nucléaire, on dispose de l'état des chantiers et des commandes, des annonces des pays concernés notamment dans le cadre de l'Accord de Paris, et des analyses des agences spécialisées ou des think-tank.

La nouveauté de ces dernières années est surtout l'arrivée d'une génération de scénarios énergétiques et climatiques d'horizons différents. Se détachent notamment les travaux réalisés par des organisations inter-gouvernementales comme l'AIE (Agence Internationale de l'Energie) et par l'AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique) d'une part, et les scénarios publiés dans la littérature scientifique utilisés en particulier comme base pour le GIEC.

**AIEA-IAEA.** Cette Agence Inter-Gouvernementale sert au départ au contrôle des matières nucléaires proliférantes et des combustibles nucléaires, ainsi qu'à la promotion du nucléaire civil dans le cadre des traités internationaux.

**AIE-IEA.** L'Agence a pour origine le besoin d'approvisionnement en pétrole des pays riches, et se consacre plus récemment à décrire des scénarios et des technologies



Abandons de constructions sur la période historique de constructions. Source WNISR data viz 2021  
<https://www.worldnuclearreport.org/reactors.html#tab=iso>;

décarbonées pour ses états-membres. Ces scénarios sont de plus en plus tournés sur la question climatique au niveau mondial, et ont un caractère plus « think-tank multinational » qu'inter-gouvernemental à proprement parler.

**GIEC.** Le GIEC ne modélise pas lui-même mais cadre et inspire un grand nombre de travaux partout dans le monde, en les concentrant désormais sur les scénarios respectant peu ou prou l'Accord de Paris.

## AIEA

Une première projection « post-Fukushima » est celle de l'AIEA qui estime dans ses dernières publications (en 2021) qu'un doublement de la production nucléaire est possible à l'horizon 2040-2050 <sup>9</sup>. En relatif, cette vague de nouvelles constructions représente une augmentation de la part du nucléaire dans la production électrique vers les 11% à 12% en 2050, contre au minimum 6% qui correspond peu ou prou à un maintien du parc décrit plus haut.

Ainsi, selon l'AIEA dans sa projection haute, « la capacité mondiale de production d'énergie nucléaire double, passant de 393 gigawatts (de puissance électrique nette) l'an dernier à 792 GWe d'ici 2050 » soit 10% de plus que la projection précédente de 2020. A l'opposé, dans les projections basses, d'ici 2050, la capacité nucléaire mondiale « se maintiendrait plus ou moins au niveau actuel de 392 GWe ».

Ces projections de l'AIEA correspondent à une révision légèrement à la hausse des chiffres de 2020. Le nombre de chantiers aboutis sur la période se monte environ à 120 GW d'ici à 2030 et à 360 à l'horizon 2050 <sup>10</sup>. La majorité des constructions estimée se trouve en Asie.

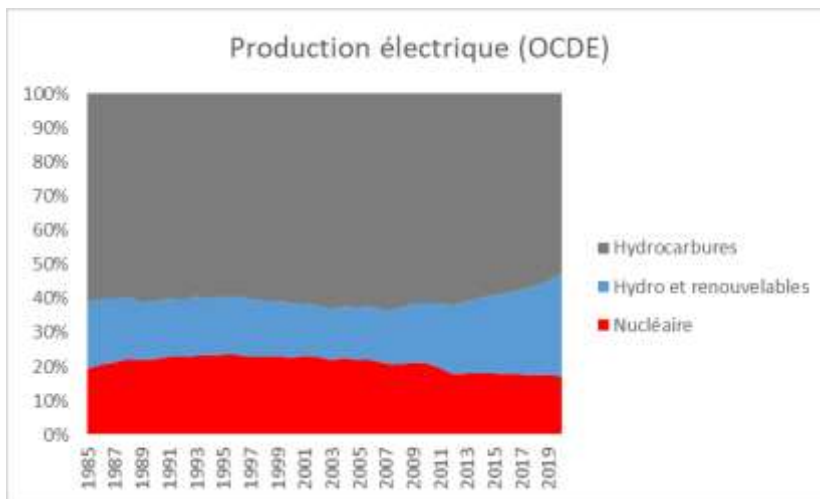
Pour réaliser cet objectif, la construction doit devenir bien plus importante dans les pays émergents que dans les pays déjà industrialisés. Ceci est lié à la stagnation générale du nucléaire dans les pays OCDE, actuellement dominants dans le bilan mondial, tandis que la part de nucléaire est encore faible dans le reste du monde. Les deux graphes suivants montrent cette évolution de la part du nucléaire, comparé aux hydrocarbures dominants et aux énergies renouvelables (y.c. hydraulique) dont la part augmente plus dans l'OCDE [E&E avec Annuaire BP 2021] :

---

<sup>9</sup> <https://www.iaea.org/fr/newscenter/pressreleases/laiea-revoit-a-la-hausse-ses-projections-concernant-lutilisation-de-lelectronucleaire-en-2050>

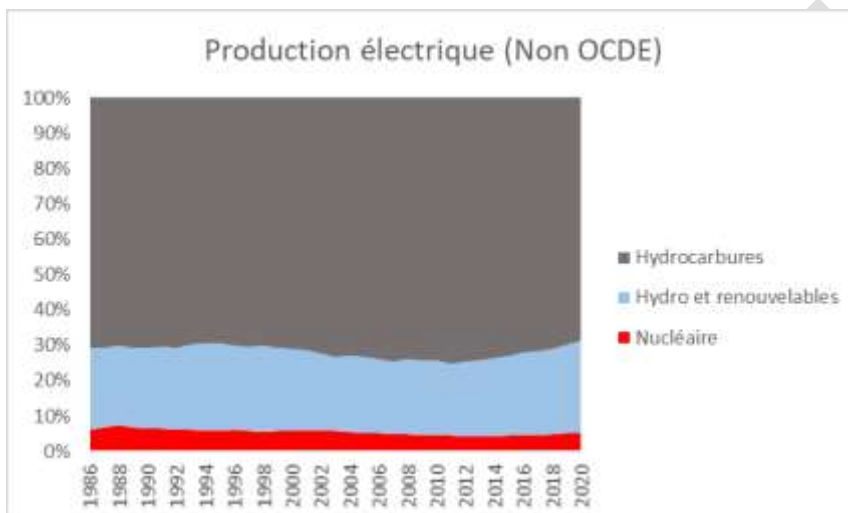
<sup>10</sup> <https://www.iaea.org/publications/15028/energy-electricity-and-nuclear-power-estimates-for-the-period-up-to-2050>





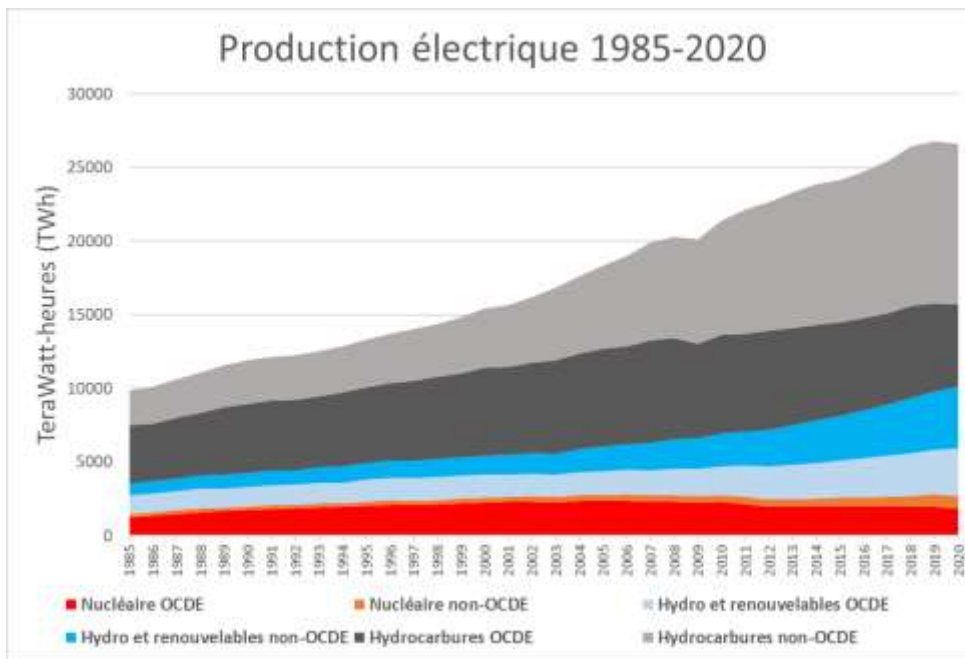
Production électrique dans les pays de l'OCDE [BP 2021]

Cette même tendance est à l'œuvre dans le reste du monde mais à moindre niveau, tant les hydrocarbures et le charbon ont connu une forte expansion dans les pays émergents :



Production électrique Hors OCDE (BP 2022)

Pour illustrer le défi de la relance du nucléaire à l'échelle, le graphe suivant présente la production électrique dans ces deux zones du monde, cette fois en valeur absolue [source annuelle BP 2021, traitement E&E Consultant] :



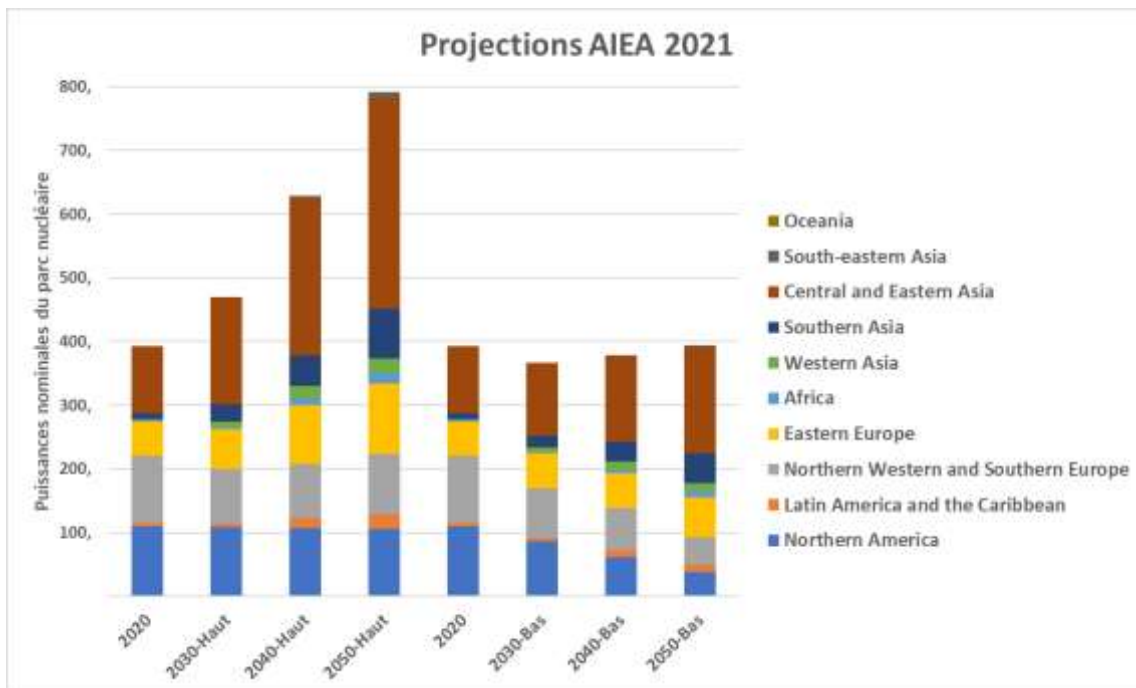
Production électrique dans et hors de l'OCDE [E&E Consultant avec BP 2021]

L'AIEA propose ainsi de doubler les quantités produites par le nucléaire en trente ans, ce qui préserve la part de marché de cette ressource dans la production d'électricité.

Dans ses projections, les quantités produites stagnent avant tout dans l'OCDE, et elles augmentent chez les émergents et en Europe de l'Est.

Pour l'essentiel, les arrêts définitifs de tranches se situent dans les régions d'Amérique et d'Europe, en plus du Japon, soit entre 46 et 97 GW de puissance du parc entre 2021 et 2030, et entre 115 et 174 GW entre 2030 et 2050. Ceci est dû à l'âge moyen des réacteurs en service, dont les deux tiers sont au-delà des 30 ans, explique l'AIEA. On peut faire remarquer que les fermetures suite à un accident (Fukushima) ou à une décision politique ne changent pas cette évolution.

Le graphe suivant présente les deux scénarios Haut et Bas pour les régions délimitées par l'AIEA. Dans les deux scénarios, le pari repose avant tout sur une construction massive en Asie de l'Est (Chine notamment). Le scénario bas est ainsi non pas un scénario de transition et de sortie mais avant tout un scénario de maintien de la puissance existante du parc.



Les scénarios AIEA 2021

Ce bilan net du scénario correspond à un nombre de chantiers aboutis imposants, qui doit tenir compte des arrêts prévus sur la période, soit un total de mises en service donné dans le tableau suivant par l'AIEA (en GW) :

<b>Bilans (en GW) du parc mondial</b>		
(GW)	<b>AIEA-Bas</b>	<b>AIEA-Haut</b>
Parc en 2020	392,6	392,6
Arrêts avant 2030	-97,3	-45,9
Mises en service	71,0	124,3
Parc en 2030	366,4	471,0
Arrêts 2030-2050	-174,3	-115,3
Mises en service	200,2	436,2
Parc en 2050	392,3	792,0
AIE 2021 – Traduction E&E		

Ces chiffres, détaillés par région, recoupent pour l'essentiel les calculs précédents. Cela signifie que d'ici à 2050, ce sont 271,4 GW (soit 71 + 200,2) qui doivent être mis en service dans le scénario « bas » et 560,5 GW (soit 124,3 + 436,2) dans le scénario « haut ».

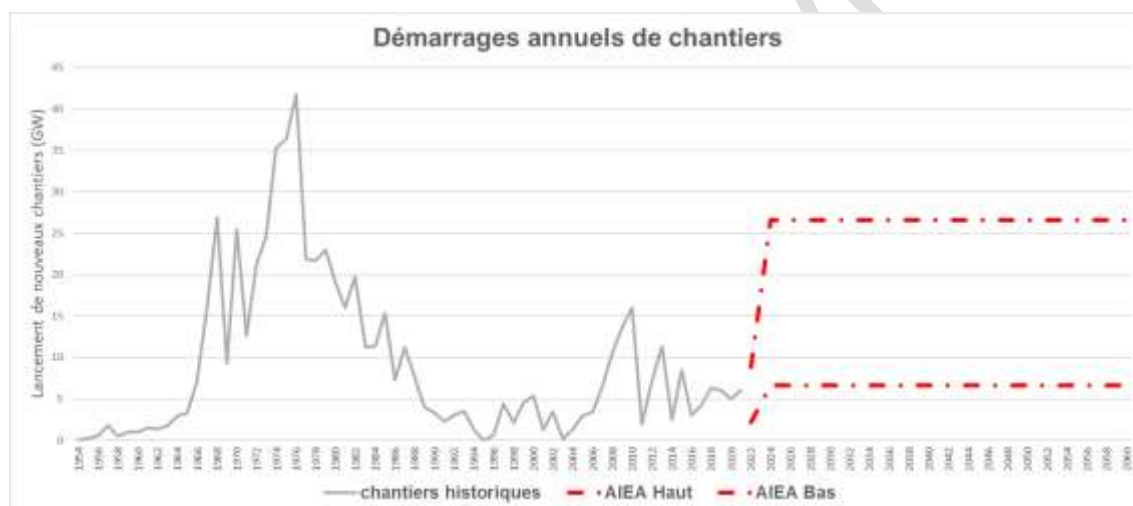
Le tableau montre que les mises en service indiquées dans les deux variantes -même dans le scénario bas- restent très importantes. Au total, en tenant compte des

chantiers de construction déjà lancés, considérés aboutis sur la période, soit 50 GW<sup>11</sup>, cela représente 220 nouvelles constructions dans le scénario « bas » et 510 réacteurs nouvellement commandés d'ici à 2040 (pour tenir compte de la durée des chantiers).

Si l'on ramène les nouveaux chantiers sur vingt ans (2022-2042) pour tenir compte du temps de construction estimé à 10 ans, le rythme des chantiers est de 28/an (haut) et 12 GW/an (bas), un peu moins pour une durée de construction de 8 ans. Cela représente deux à quatre fois plus de constructions que celles réalisées ces deux dernières décennies (environ 6 nouveaux chantiers par an depuis une vingtaine d'années).

Le graphe suivant montre ce rythme de construction mondial par rapport aux constructions historiques. Après 2040 la courbe a été prolongée.

Chantiers nucléaires lancés dans le passé et dans les scénarios AIE [source : E&E 2022 avec AIE]



Constructions historiques et projections de l'AIEA [E&E Consultant]

Il est intéressant de regarder plus en détail le lieu des nouvelles constructions d'abord en étudiant leur répartition géographique suivant la nomenclature de l'ONU<sup>12</sup>

Même dans le scénario haut (ci-dessous), le bilan des pays du « nucléaire existant » est au mieux stagnant, tandis que les augmentations sont concentrées en Asie (Sud et Est). De même, dans tous les cas, ni l'Afrique ni l'Océanie ou l'Amérique Latine n'apparaissent fortement sur la carte

:

<sup>11</sup> Chiffre estimé du nombre de chantiers qui aboutissent (sur les 55 recensés par l'AIEA début 2022).

<sup>12</sup> Note : l'AIEA utilise la nomenclature de l'ONU dans son annuaire économique et social 2021. L'Asie du Sud inclut en particulier l'Iran, l'Inde et le Pakistan ; l'Asie Orientale et Centrale inclut Chine, Japon, les deux Corée, et pour la partie Centrale les pays en « stan » dont le Kazakhstan. L'Asie Occidentale inclut l'Arabie Saoudite, l'Arménie, les EAU, la Palestine et Israël, la Syrie, la Turquie et aussi Chypre.

Pour l'Europe, l'Europe Orientale inclut l'ancienne Union Soviétique dont la Russie, l'Europe du Nord inclut le Royaume-Uni, la Suède, la Finlande et les pays Baltes, l'Europe Occidentale la « plaque » centre-européenne dont Allemagne, Suisse et France ; l'Europe méridionale inclut les Balkans, la péninsule Ibérique, l'Italie.

AIEA Haut 2021	2030	2040	2050
Northern America	-2,2	-1,0	-1,0
Latin America and the Caribb	0,9	10,0	6,0
Northern Western and Southe	-18,9	-1,5	11,0
Eastern Europe	7,7	30,6	18,0
Africa	1,1	8,0	5,0
Western Asia	7,6	9,2	5,0
Southern Asia	18,5	22,0	29,0
Central and Eastern Asia	62,5	78,5	83,4
South-eastern Asia	0,0	3,0	5,0
Oceania	0,0	0,0	2,0

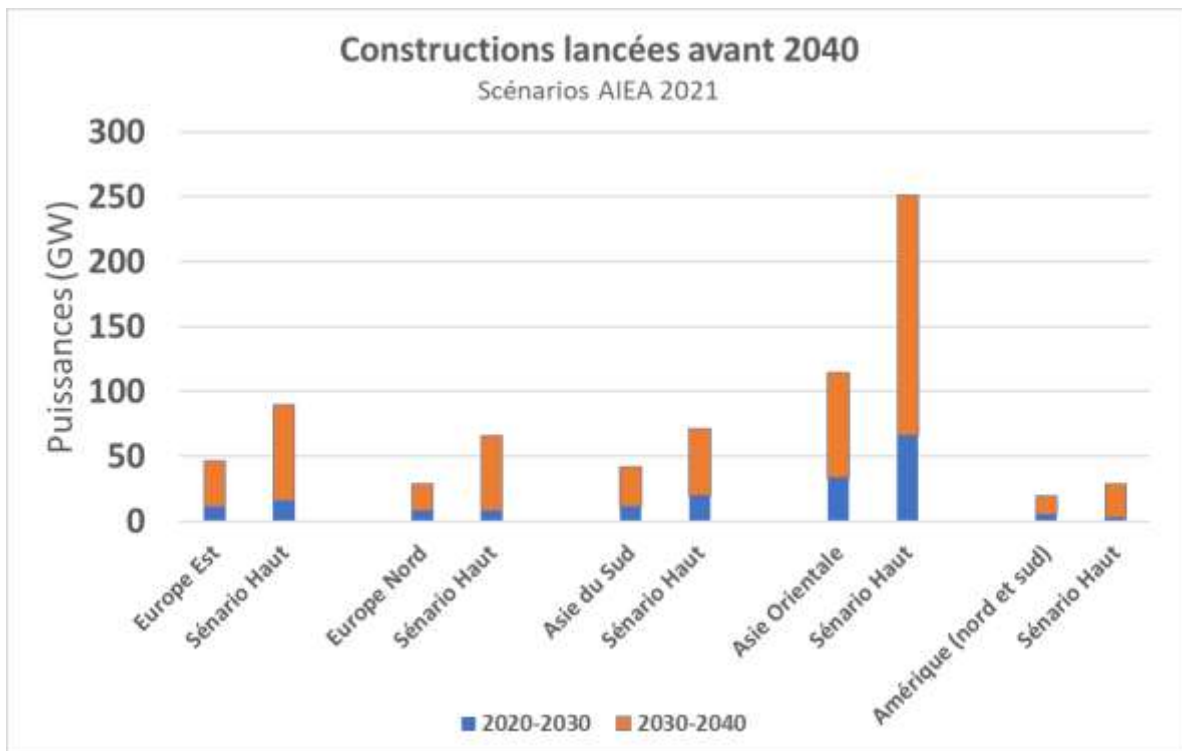
Scénario Haut AIAA 2021 par région [E&E Consultant avec AIEA]

Dans le scénario bas, la structure est la même mais encore accentuée :

AIEA Bas 2021	2030	2040	2050
Northern America	-24,2	-25,0	-23,0
Latin America and the Caribb	0,9	5,0	1,0
Northern Western and Southe	-27,3	-12,0	-23,0
Eastern Europe	0,2	1,0	7,0
Africa	0,0	4,1	3,0
Western Asia	6,2	4,0	2,0
Southern Asia	9,5	14,0	15,0
Central and Eastern Asia	8,3	19,5	32,0
South-eastern Asia	0,0	1,0	2,0
Oceania	0,0	0,0	0,0

Scénario Bas AIEA 2021 en GW par région [E&E Consultant avec AIEA]

Si l'on regarde maintenant les chantiers nouveaux décrits, la concentration vers l'Asie de l'Est (Chine et Japon) saute aux yeux, tandis que l'Amérique disparaît de l'équation, comme l'Afrique. Par contre, le parc existant en Europe de l'Ouest et du Nord est largement renouvelé dans le scénario haut :



Constructions dans les scénarios AIEA suivant les régions [E&E avec AIEA 2021]

Ces scénarios sont assez similaires à un travail réalisé en 2008 sur la construction nucléaire, élaboré conjointement par un économiste du CEA, Philippe Girard, avec le chercheur Benjamin Dessus (CNRS)<sup>13</sup>, pour imaginer la construction maximale technique. Ces scénarios de construction se veulent « compatible avec la taille des réseaux et la production d'uranium » et « sans contrainte économique ou politique ». Ils ont été imaginés de façon consensuelle entre un « pour » et un « contre » le nucléaire. Ce travail suggère que le marché maximal à l'horizon prévisible est de l'ordre du double du parc actuel, à condition de respecter devis et délais partout, et de s'abstraire de toute considération politique ou judiciaire. Le rythme de construction mondial estimé à l'époque (2008) était de 40 GW/an environ, en considérant que tout obstacle financier ou politique était levé.

Le point faible des scénarios se situe d'une part dans le maintien d'un soutien politique au nucléaire -qui n'a rien de démontré- dans les pays riches (Europe de l'Ouest, Japon), et dans l'ambition importante de la construction en Chine. A l'inverse, l'AIEA a renoncé à la construction nucléaire massive aux Etats-Unis et au Canada, voire pour l'essentiel en Amérique du Sud. Ce blocage est bien documenté, et mériterait un développement : absence de poids du gouvernement fédéral tant aux Etats-Unis qu'au Canada, organisation du marché, faiblesse voire absence de réseaux d'interconnexion. Sur ce continent, l'absence de perspectives, et même la menace sur les réacteurs existants devenus plus chers à exploiter que d'autres ressources, expliquent que les électriciens sont « passés à autre chose » malgré les soutiens publics.

<sup>13</sup> Le scénario Sunburn aboutit à l'époque à un gain carbone de 3% des émissions mondiales (pour 600 EPR construits) <http://www.global-chance.org/IMG/pdf/GC21p29-39.pdf>

Ces derniers sont aussi à relativiser. Par exemple le gigantesque plan fédéral de relance des infrastructures de Joe Biden ne comprend qu'environ un milliard de dollars pour le « nouveau nucléaire » ce qui est très peu par rapport aux besoins d'un seul prototype innovant.

## Les projections de l'AIE

Depuis plusieurs décennies, les projections de l'Agence Internationale de l'Energie ont pris de plus en plus d'importance et ont assis leur crédibilité. En préliminaire, il faut cependant revenir sur la nature de cette agence elle-même en tant que réseau destiné à contrer l'organisation des producteurs de pétrole (OPEP), ce qui influe sur les contenus et les méthodes.

Au départ il y a donc un objectif de substituer du pétrole suite aux chocs des années 70 : meilleure répartition géographique, substitution par le gaz ou le charbon, promotion du nucléaire, économies d'énergie. A l'origine, il s'agit donc d'une compilation inter-gouvernementale de connaissances ou de statistiques, au service des états-membres. Ceux-ci sont appelés à toute une série de mesures -souvent d'inspiration libérale- pour la transformation de leurs économies et de leur secteur énergétique. La quantification a suivi pour prévoir et prévenir les chocs pétroliers par l'investissement dans les alternatives, surtout hydrocarbures initialement.

Ces fonctions de conseil et de suivi des économies ont été complétées par des projections quantifiées de plus en plus sophistiquées, mais aussi par la création de groupes d'étude et d'action en faveur de telle ou telle solution. Ainsi, une agence commune entre l'AIE et l'OCDE pour le nucléaire (NEA/AEN) a une fonction technique et statistique, mais aussi agit comme un véritable lobby interne et envers les états-membres. Le plus caricatural en ce sens a été l'action des services spécialisés en faveur du charbon. Ce groupe « charbon » est ainsi représenté dans les discussions lors des premiers rapports du GIEC pour s'assurer que leur ressource favorite n'est pas trop maltraitée, au grand dam de certains auteurs<sup>14</sup> ! Toujours auprès du GIEC, les experts de l'AIE s'arrogent en effet un privilège un peu disproportionné : leurs publications n'ont pas à passer sous l'égide de comités de lecture de grandes revues scientifiques. Ceci est compréhensible pour la production et la synthèse de données statistiques ou descriptive, moins pour les analyses et les projections, surtout venant de ces groupes de pression internes. Cette cacophonie interne s'est un peu effacée avec la montée en puissance des énergies renouvelables, et surtout avec le caractère central pris par les économies d'énergie (« the First Fuel » dit l'Agence), une constante dans le travail de l'AIE, sous un angle d'économistes soucieux de l'efficacité du lien production-consommation et des bénéfices collectifs de l'action côté demande.

---

<sup>14</sup> L'AIE possède de facto un privilège d'être référencée dans les publications du GIEC sans passer par la case « grandes revues à comité de lecture ». Ceci est justifié pour les publications descriptives des pays voire leurs statistiques, mais a pu être critiquable pour certaines analyses notamment sur les hydrocarbures. Le caractère inter-gouvernemental de cette Agence a ainsi été un facteur plutôt conservateur sur les projections d'alternatives aux énergies fossiles. Sur cette sous-estimation régulière, voir par exemple <https://energypost.eu/the-standard-models-overestimate-the-cost-of-the-low-carbon-transition/> par Alexandra Poncia, Paul Drummond et Michael Grubb

Le caractère inter-gouvernemental d'une telle organisation a de nets avantages lorsqu'il s'agit d'influer les politiques « entre pairs ». L'exemple des travaux de l'OCDE sur la corruption et la mise en œuvre progressive de ses recommandations est spectaculaire, dans des sujets où ni l'ONU ni les états entre eux ne pouvaient progresser. Par contre, cette tutelle collective des gouvernements a posé plusieurs difficultés :

- L'AIE a avant tout représenté les pays riches. L'intégration du reste du monde et notamment des pays émergents a un peu tardé.
- La priorité à l'approvisionnement énergétique, et donc aux investissements en hydrocarbures, est restée longtemps l'objet central de l'organisation.
- La faiblesse de certains services à l'interne de l'AIE et le poids des poids lourds industriels des pays membres explique des distorsions dans les visions : retards réguliers des prévisions de croissance des énergies renouvelables, et surtout minimisation des potentiels d'économie d'énergie par rapport aux autres solutions.

Ce retard s'est en bonne partie comblé, notamment sous la pression de la question climatique, devenue la priorité de bon nombre de gouvernements-membres et donc de l'organisation elle-même. Ces dernières années, l'AIE est devenue un instrument essentiel pour définir les politiques publiques climatiques, grâce notamment à plusieurs outils :

- Les projections de référence compilent les politiques ou les intentions des gouvernements. Ces constats amènent un principe de réalité à des discussions de la négociation climatique faites d'intentions ou d'objectifs, nécessaires mais à vérifier dans leur mise en œuvre. Ces projections, notamment celles « sans politiques publiques », ont souvent été confondues avec des prédictions, tant par les médias que par des politiques. Ceux-ci relayaient de façon erronée par exemple que la consommation d'énergie « va » -voire « doit »- doubler, ou encore que l'investissement pétrolier doit encore être multiplié.
- Les feuilles de route technologique pour toute une série d'industries et de secteurs mettent scène les évolutions possibles des technologies et les ordres de grandeur des investissements et les programmes de recherche-développement à consentir. Ces feuilles de route ont été synthétisées de façon très remarquable dans une série de scénarios, les ETP (« Energy Technology Perspectives »), réceptacle et synthèse des consensus sur les technologies et les évolutions régionales.
- Enfin, les scénarios récents ne se contentent plus de juxtaposer des évolutions possibles sans jugement mais s'alignent sur les objectifs de l'Accord de Paris (2°C et 1,5°C) de façon beaucoup plus affirmée. De façon étonnante, les dirigeants de l'Agence professent désormais l'arrêt des investissements dans les hydrocarbures, à l'opposé des messages initiaux de l'AIE en faveur de ces mêmes pétrole, gaz et charbon.

## Des STEPs au Zéro Emissions

La dernière série de 2021 de scénarios de l'AIE est l'héritière de cette évolution, à la fois dans sa priorité climatique, mais aussi sur la méthode. Celle-ci imbrique plusieurs



projections de nature différente en explicitant leur progression. Cela permet de comprendre le cadre et la dynamique de la transition, bien mieux que des projections sans nuances, souvent trop optimistes ou pessimistes faute de décrire un chemin<sup>15</sup> :

D'abord une projection intégrant les politiques et les projets « certains », par exemple ceux inscrits dans la loi ou dans des investissements déjà concrétisés, les STEPS (**Stated Policies Scenarios**<sup>16</sup>). De façon explicite, les STEP n'incluent pas les nombreux engagements des pays type « zéro carbone » qui ne sont pas étayés par des engagements législatifs ou les calendriers précis de mesures engagées.

Ensuite, une projection des intentions qui passe en revue les objectifs ou les décisions, par exemple ceux inclus dans les affichages des états vis-à-vis de l'Accord de Paris (les « Contributions »). L'AIE nomme ce processus APC (**Announced Pledge Case**<sup>17</sup>), qui incluent par exemple les dates ou les secteurs que les états s'engagent à décarboner à date.

Enfin, une description des choix supplémentaires permettant d'atteindre les objectifs climatiques (« back-casting ») en partant des objectifs finaux de l'exercice. Ici il s'agit du scénario NZE (« **Net Zero Emissions** ») décrit plus loin.

Ces trois types de scénarios sont basés grossièrement sur la dérivée première pour le STEPs (soit le prolongement de l'extrémité de la courbe présente), la dérivée seconde pour le APC (c'est-à-dire les dynamiques en cours), et une trajectoire déterminée de façon exogène (en « back-casting ») pour le NZE. Les trajectoires « non policy » souvent présentées comme la « réalité projetée future » n'entrent pas en ligne de compte, ce que soulignent de façon détaillée Glen Peters et Zeke Hausfather de CICERO (graphe traduction E&E)<sup>18</sup>. Ces derniers ne sont pas moins pessimistes sur la difficulté politique des 1,5°C mais suggèrent de ne pas s'attarder sur des scénarios où la transition énergétique ne se produit pas ou peu tant celle-ci est déjà en route.

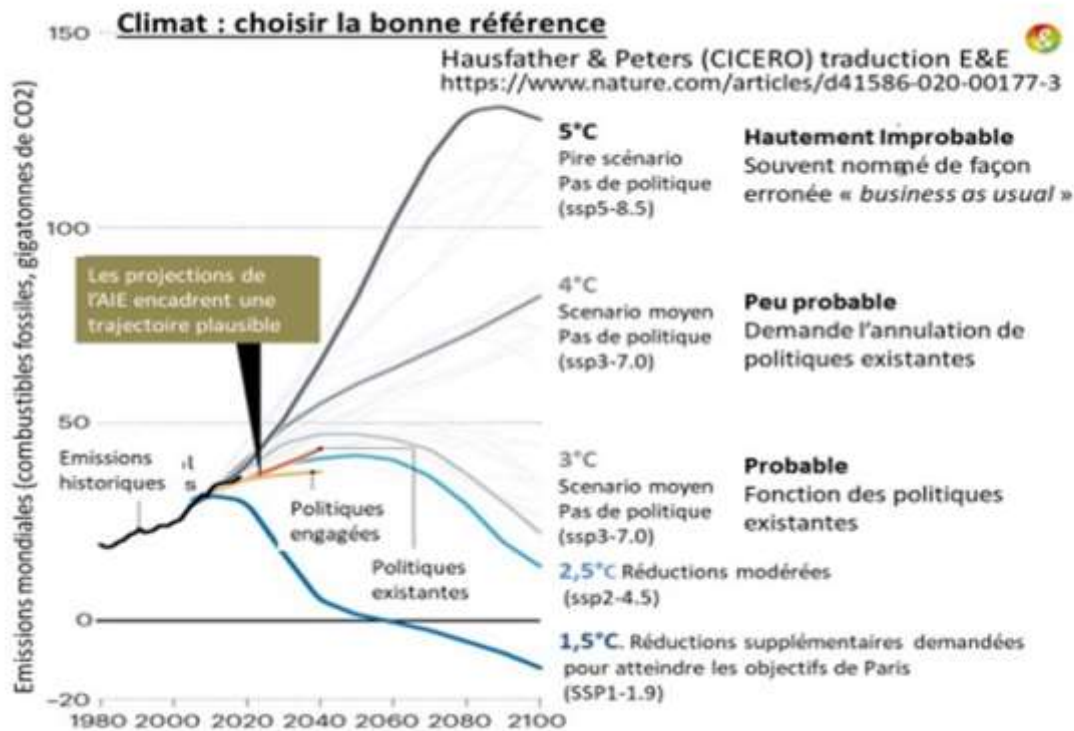
---

<sup>15</sup> Les travaux récents de la PPE (Programmation Pluri-Annuelle de l'Énergie) de la DGEC fait aussi de plus en plus ce travail prospectif d'aller-retour entre l'objectif final et les scénarios compilant l'impact des mesures.

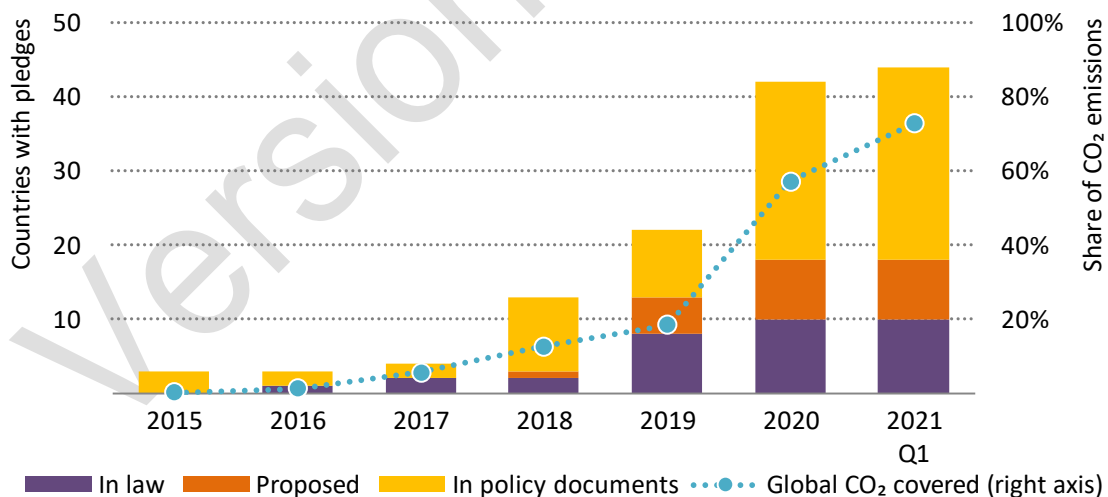
<sup>16</sup> "The IEA Stated Policies Scenario (STEPS) illustrates the consequences of existing and stated policies for the energy sector. It draws on the latest information regarding national energy and climate plans and the policies that underpin them. It takes account of all policies that are backed by robust implementing legislation or regulatory measures, including the NDCs that countries have put forward under the Paris Agreement up to September 2020 and the energy components of announced economic stimulus and recovery packages. So far, few net-zero emissions pledges have been backed up by detailed policies, implementation plans or interim targets: most net zero pledges therefore are not included in the STEPS"

<sup>17</sup> "The Announced Pledges Case (APC) assumes that all national net-zero emissions pledges are realised in full and on time. It therefore goes beyond the policy commitments incorporated in the STEPS."

<sup>18</sup> Peters et Hausfather, décembre 2020, Nature 577, 618-620 (2020) doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>



Les scénarios AIE sont donc bien enracinés dans la discussion de l'Accord de Paris, au service des états-membres et du suivi collectif des engagements. Le graphe suivant montre le nombre de pays aux différentes étapes de « sérieux » de leur transition avec pour indicateur les politiques allant de la loi (le plus fort, en violet) à des objectifs annoncés (le moins fort, en jaune).

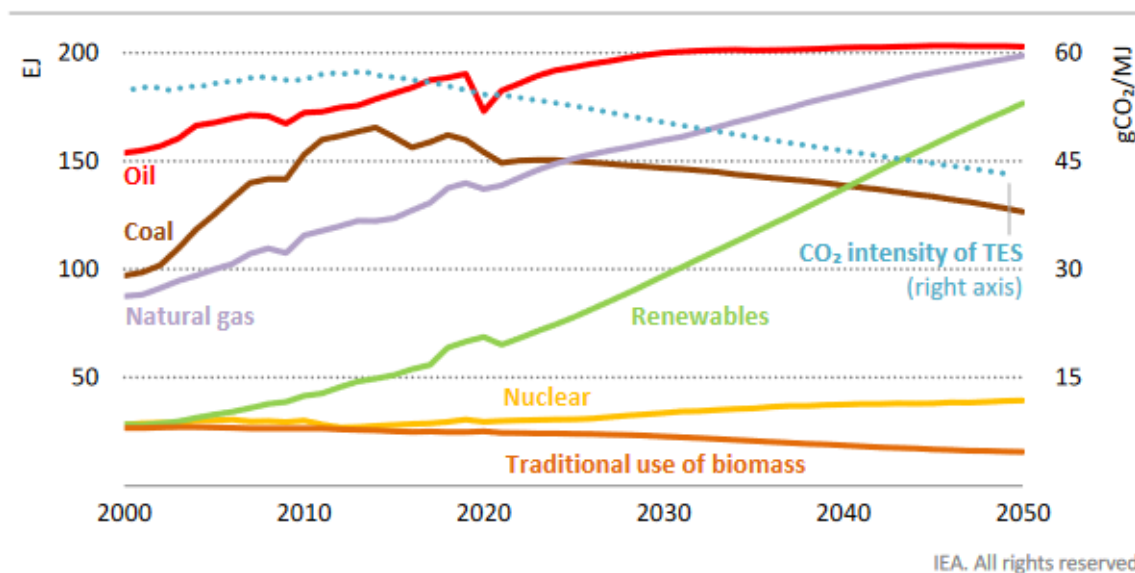


AIE NZE 2021

Les STEPS compilées dans l'exercice 2021 montrent d'une part que la décarbonation a commencé, que les énergies renouvelables montent nettement dans les bilans, mais que tout cela est bien lent et loin d'une « décarbonation ». Comme toujours, c'est la bouteille à moitié vide (« le pétrole et le gaz restent dominants ») ou à moitié pleine (« les énergies renouvelables décollent, la consommation mondiale cesse de

progresser et diminue »). Les caractéristiques principales de ce scénario « décrivant le réel de court-moyen terme » sont données par le graphe suivant<sup>19</sup> :

**Figure 1.6** ▶ Total energy supply and CO<sub>2</sub> emissions intensity in the STEPS



**Coal use declines, oil plateaus and renewables and natural gas grow substantially to 2050**

Note: EJ = exajoule; MJ = megajoule; TES = total energy supply.

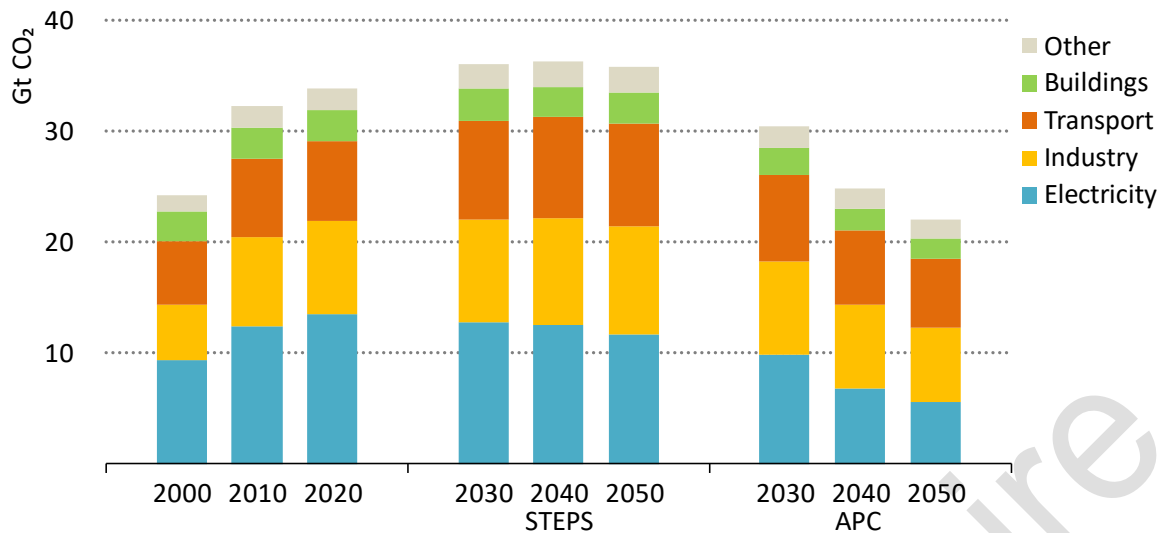
Au pessimiste, la baisse globale des intensités CO<sub>2</sub> est bien trop limitée pour tenir les engagements mondiaux. Côté optimiste, il s'agit pourtant d'une stabilisation mondiale très différente des visions portées encore récemment par les états et leurs institutions. Même le rapport spécial du GIEC SR1.5C de 2017 (traité plus loin) comprenait encore des variantes de croissance beaucoup plus importante des énergies primaires.

## Des STEPs aux APC

Les APC vont intégrer les engagements inclus dans les « contributions » des pays au titre de l'Accord de Paris. La réalité -supposée représentée dans les STEPs- sera donc tirée vers les APC, avec pour condition la réalisation des promesses des pays.

D'emblée, on peut noter que plusieurs pays (Japon, Chine...) ont annoncé des objectifs radicalisés durant l'année 2021 avant le COP26, ce qui fait qu'une version des APC qui serait remise à jour atteindrait désormais -sur le papier- les 2°C. C'est le fonctionnement de l'Accord de Paris par resserrement progressif des objectifs qui a ici montré sa force par rapport au Protocole de Kyoto qui restait figé sur ce plan.

<sup>19</sup> International Energy Agency (2021), Net Zero by 2050, IEA, Paris: Net Zero by 2050 Scenario - Data product - IEA. License: Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

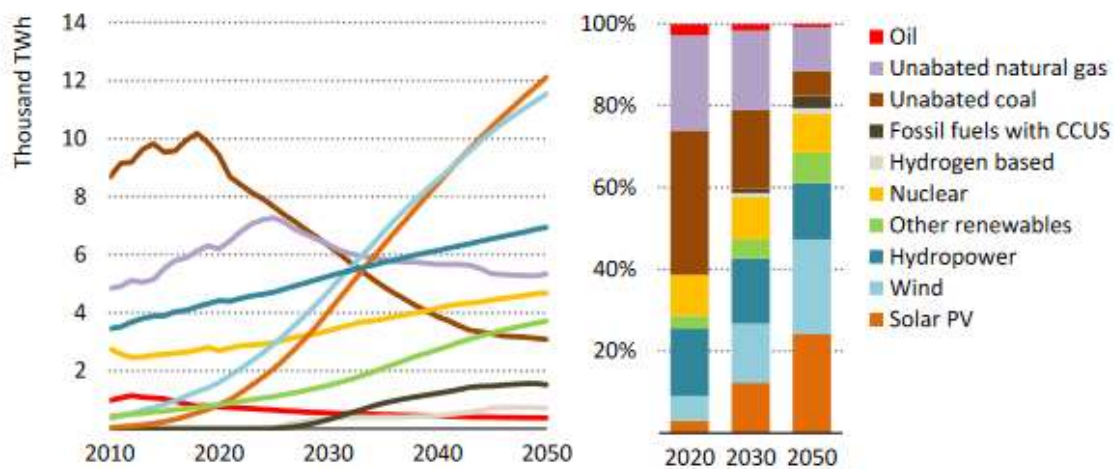


Source AIE NZE

Energy Agency (2021) Net Zero by 2050: Net Zero by 2050 Scenario - Data product - IEA; as modified by EE-Consultant.

Du point de vue des quantités consommées pour l'électricité, les APC donnent ceci

**Figure 1.14** ▶ Global electricity generation by source in the APC



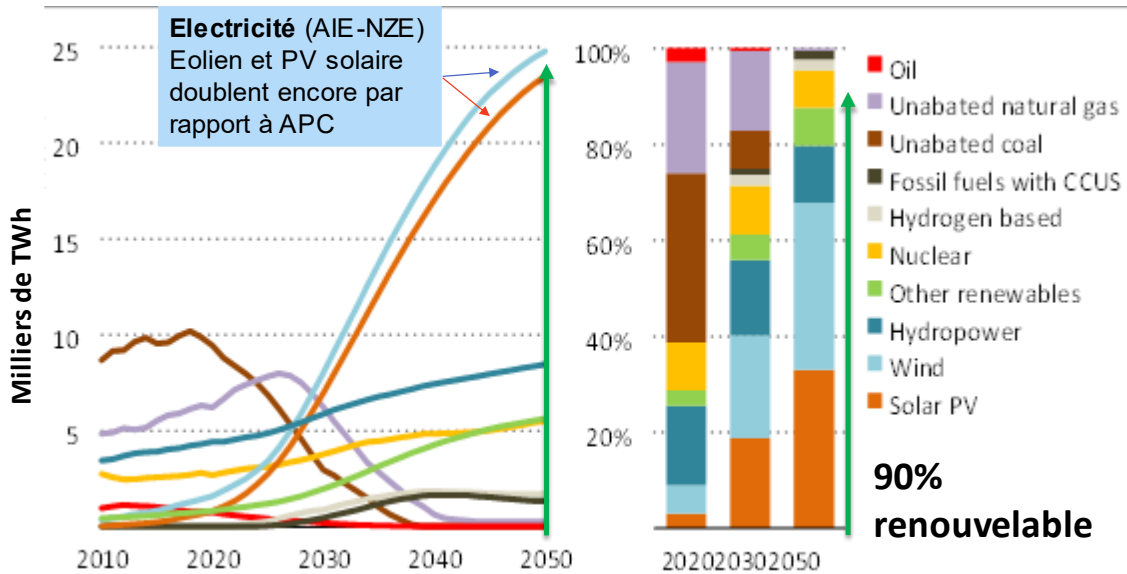
IEA. All rights reserved.

**Renewables reach new heights in the APC, rising from just under 30% of electricity supply in 2020 to nearly 70% in 2050, while coal-fired generation steadily declines**

Note: Other renewables = geothermal, solar thermal and marine.

Source AIE NZE scénario APC

Si nos passons au scénario NZE, le plus ambitieux, la quantité d'électricité renouvelable double :



Dans la partie électrique du scénario “zero carbone” le plus ambitieux de l’AIE (2021), le solaire, le vent et les autres renouvelables passent de 29% à presque 90% de l’approvisionnement électrique

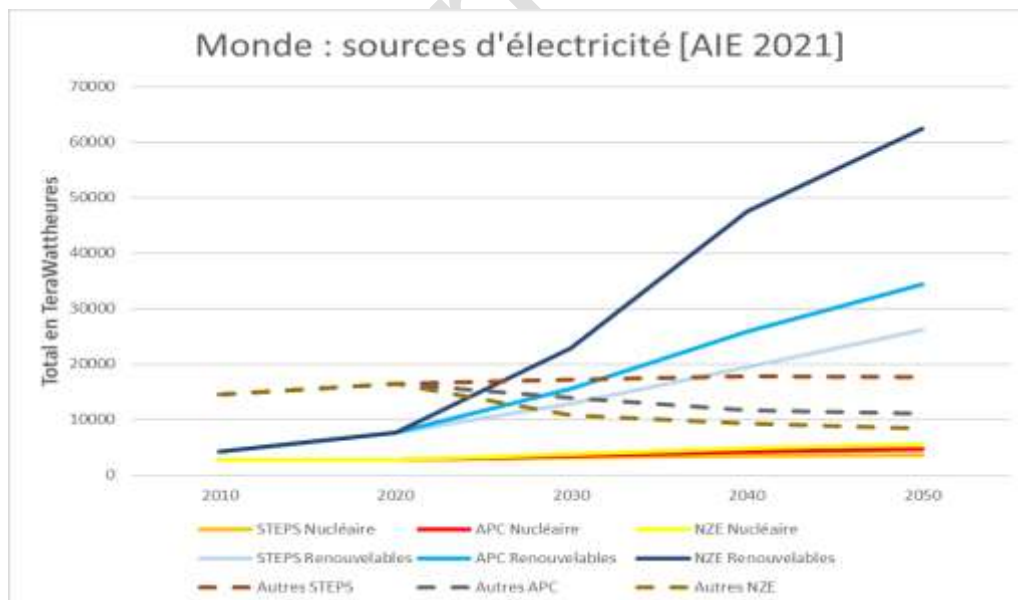


37

NZE Agence Internationale de l'Énergie, présentation E&E Consultant

Extrait du cours INT SudTelecom 2021 (traduction E&E)

Une autre façon de présenter le scénario électrique dans les trois scénarios AIE est de distinguer les catégories « Fossiles », « Renouvelables » et « Nucléaire » dans le graphe suivant [E&E 2022 avec AIE 2021] :

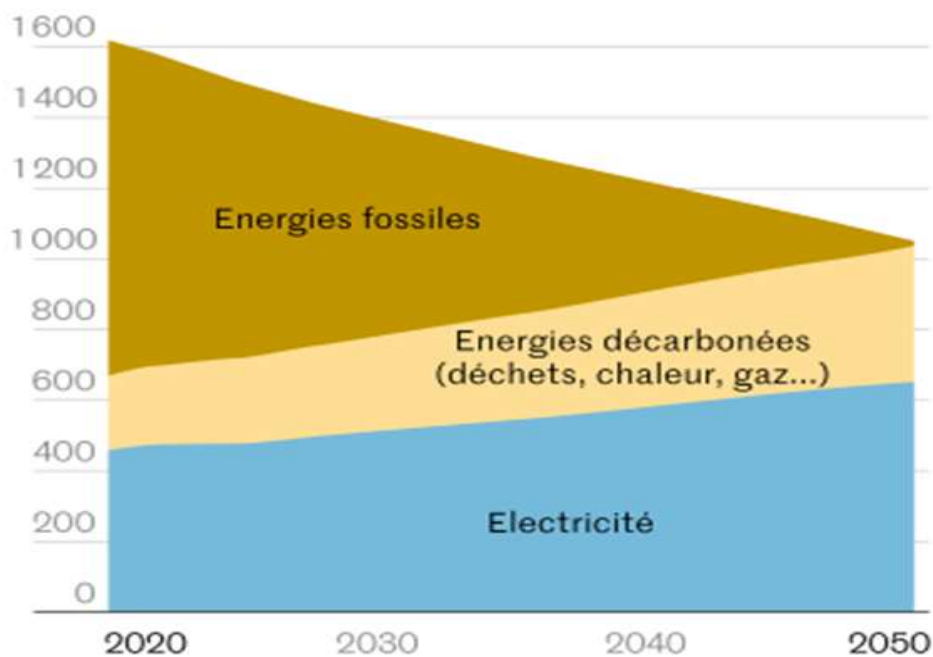


Il s’agit bien entendu de scénarios extrêmement ambitieux, comme le sont tous les scénarios respectant l’Accord de Paris. Le NZE combine une forte économie d’énergie voire sobriété, en particulier dans les pays industriels, avec une révolution technique

vers les énergies renouvelables, puisque dans le NZE, la part de l'électricité atteint plus de 50% de la consommation finale en 2050 ce qui est considérable à l'échelle globale (dont 90% d'électricité renouvelable). Le travail comprend également un bilan des matériaux employés, des financements nécessaires et d'autres conditions matérielles.

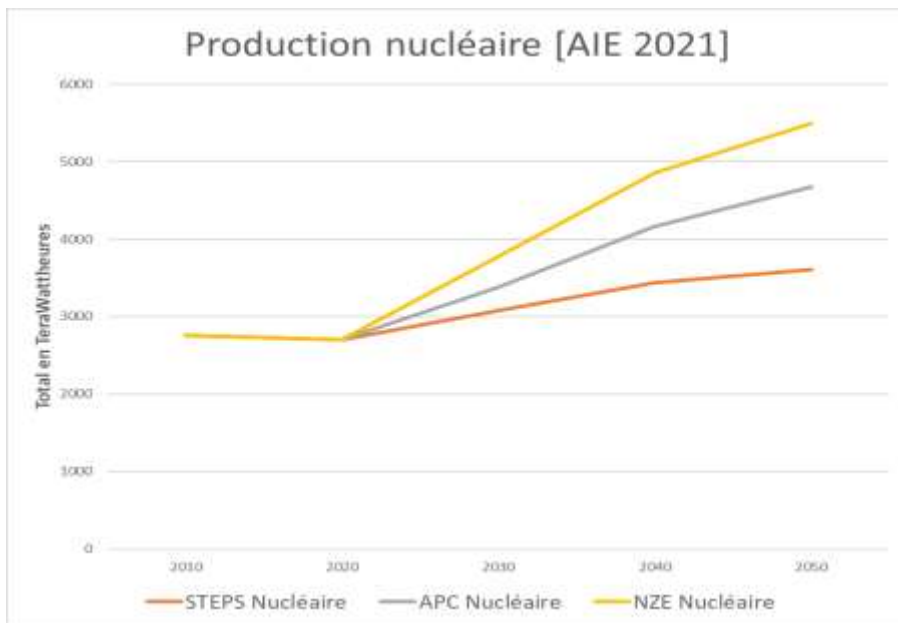
Les fossiles baissent considérablement (en haut du graphe) tandis que les ressources électriques sont multipliées, notamment les énergies renouvelables électriques, dans un contexte de diminution des demandes totales dans les pays développés. Cette part très importante de l'électricité est une caractéristique commune aux visions récentes depuis le rapport 5 du GIEC qui prévoyait cette hausse de l'électrification mais à plus long terme dans le siècle.

Sur ce point de l'électrification, les discussions du rapport 6 du GIEC suggèrent que cet enjeu central de la transition dessinée par exemple dans la stratégie climat de la France (graphe ci-dessous) est au moins aussi compliquée sinon plus, que le passage à un système électrique dominé par les énergies renouvelables, somme toute de mieux en mieux décrit et développé.



Présentation de la Stratégie Nationale Bas Carbone de la France (SNBC) [Infographie du Monde le 25/10/2021 d'après RTE].

Du point de vue du nucléaire, l'augmentation n'est pas aussi spectaculaire entre les constructions annoncées ou suggérées par les annonces des pays (le APC) et le scénario NZE visant la baisse des émissions, comme le montre le graphe suivant [E&E 2022 avec AIE], qui détaille la courbe présentée précédemment pour l'ensemble des énergies:



Du point de vue du nucléaire mondial, le doublement de la production d'énergie, observé en scénario NZE peut être vu comme soutenu sur trente ans. Mais il correspond à une stagnation nette de la part de marché mondiale du nucléaire. .

La construction nucléaire dans ce scénario est pourtant proche de celle du scénario haut de l'AIEA que l'on peut considérer comme très difficile. Il y a bien augmentation forte -en valeur absolue- par rapport au nucléaire existant, mais l'inertie de la construction nucléaire et le nombre de pays limités qui annoncent y avoir recours rendent très difficile un doublement à 2050.

Parts de marché du nucléaire dans la consommation mondiale d'électricité, pour les trois scénarios de l'AIE :

Electricité (TWh)	2010	2020	2030	2040	2050
STEPS Nucléaire	12,9%	10,1%	9,3%	8,5%	7,6%
APC Nucléaire	12,8%	10,1%	10,3%	10,0%	9,4%
NZE Nucléaire	12,8%	10,1%	10,1%	7,9%	7,2%
E&E 2021 d'après AIE					

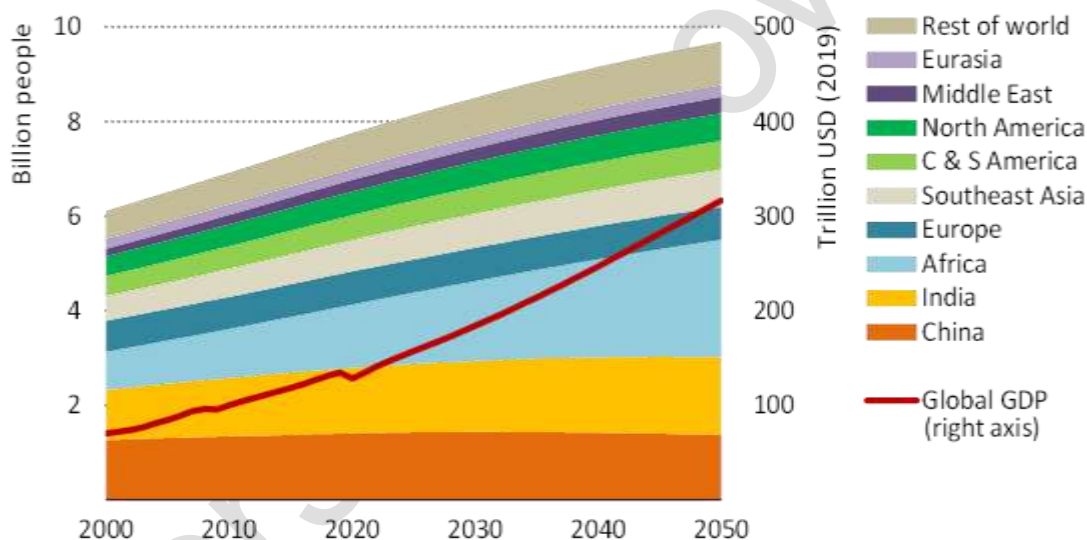
Le rapport de l'AIE lui-même accole un commentaire enthousiaste sur la croissance du nucléaire avec un paragraphe bien plus désillusionné d'un nucléaire qui reste minime voire marginal. La même publication comprend ainsi deux visions « la bouteille à moitié pleine » et « la bouteille à moitié vide »<sup>20</sup>.

<sup>20</sup> Comme pour l'AIEA, le message est double et peut-être interprété *suivant l'interlocuteur* ce qui correspond bien à la situation très diverse des états-membres : [favorable au nucléaire] "Nuclear power also makes a significant contribution in the NZE, its output rising steadily by 40% to 2030 and doubling by 2050, though its overall share of generation is below 10% in 2050. At its peak in the early 2030s, global nuclear capacity additions reach 30 GW per year, five-times the rate of the past decade. In advanced economies, lifetime extensions for existing reactors are pursued in many countries as they are one of the most cost-effective sources of low-carbon electricity (IEA, 2019), while new construction expands to about 4.5 GW per year on average from 2021 to 2035, with an increasing emphasis on small modular reactors" [défavorable] "Despite these efforts, the nuclear share of total generation in advanced economies falls from 18% in 2020 to 10% in 2050. Two-thirds of new nuclear power capacity in the NZE is built in emerging market

## Un scénario « classique » de croissance

Le scénario NZE est à la fois précis dans ses descriptions du devenir des industries hydrocarbures et du chemin parcouru, des ressources disponibles en termes de minéraux et matériaux. Il détaille la vision d'un investissement totalement tourné hors du pétrole et vers l'électrification et les réseaux électriques.

C'est aussi un scénario de stabilisation démographique et de croissance des continents en développement, avec une croissance dépassant en moyenne 3%, c'est-à-dire que l'économie mondiale a augmenté de 150% en 2050 par rapport à 2020. Il s'agit donc clairement de « croissance verte » telle qu'elle peut horripiler une partie des mouvements écologiques, ou à l'inverse d'une vision « réaliste » qui peut séduire une partie des gouvernements. De ce point de vue, la vision est aussi traditionnelle que les exercices précédents, mais recadrée sur les objectifs de Paris (au moins sur l'objectif des 2°C).



Populations régionales et croissance mondiale (en rouge sur l'axe à droite) dans le scénario NZE-AIE

Avec les réserves que l'on peut poser sur le travail de l'AIE et ses feuilles de route, un point intéressant ici pour la discussion, c'est que la transition énergétique est un défi majeur de l'industrie et de l'économie mondiale, qui se place aux limites de ce que le politique et le social peuvent donner. Mais il reste fondamentalement soluble, c'est aussi le message du GIEC. En cela, la crise climatique dans son volet énergétique (sans doute moins sur la transition alimentaire et sur la stabilité des états face au chaos climatique) est distincte des autres crises majeures comme celle de la biodiversité. Cette dernière est -en simplifiant- moins clairement décrite dans ses impacts et ses

*and developing economies mainly in the form of large-scale reactors, where the fleet of reactors quadruples to 2050. This raises the share of nuclear in electricity generation in those countries from 5% in 2020 to 7% in 2050 (as well as nuclear meeting 4% of commercial heat demand in 2050)."*



solutions, et ne peut être vue comme soluble. La crise climatique, à l'inverse, est désormais décrite de mieux en mieux à la fois dans le chemin à parcourir et prise en charge pour partie par la communauté internationale

## Les messages du GIEC

Le GIEC se refuse à « prescrire » des choix techniques aux états. Il développe des analyses à partir des modélisations et des scénarios réalisés par des équipes du monde entier. Le GIEC n'a donc pas de positions en propre, il ne fait que sélectionner des scénarios pour leur capacité à atteindre l'objectif de limitation du réchauffement planétaire.

En principe, cette position des scientifiques en surplomb de la politique n'interdit pas la présence d'équipes d'opinions très diverses et de méthodologies de prospective de nature différente. La force du message vient de cette diversité de disciplines et d'origines géographiques larges. Les travaux -tous publiés dans la littérature scientifique- vont de laboratoires publics ou de think-tanks très engagés dans la transition à des organismes intergouvernementaux ou industriels nettement plus modérés dans leurs injonctions.

Une partie du message du GIEC vient de l'évolution dans le temps des consensus. Ce mouvement du consensus est particulièrement net entre les trois derniers documents, le rapport 5 (« AR5 ») réalisé aux environs de la COP21, le rapport spécial 1,5°C (« SR1.5C ») et le rapport 6 en cours de finalisation (« AR6 »). Ici le changement est particulièrement net, avec pour les derniers textes une sortie des énergies fossiles de plus en plus accentuée, une stabilisation des demandes mondiales d'énergie, et une montée spectaculaire des énergies renouvelables électriques<sup>21</sup>. Dans le cas du GIEC AR6, le débat se porte autant sur la difficulté de passer à un taux très élevé d'électrification -une constante des derniers travaux- au moins autant que sur la capacité des systèmes à se baser de plus en plus sur les énergies renouvelables. Selon le GIEC, la recherche montre que ces systèmes électriques basées de façon prédominante sur les renouvelables seront « de plus en plus viables dans les prochaines décades » tandis que le défi viendra plutôt des secteurs plus compliqués comme l'aviation, l'industrie ou l'agriculture, où le 100% d'énergies renouvelables sera plus difficile à atteindre.

Sur le nucléaire, le GIEC se contente de formules plus consensuelles, formulant que cette ressource reste une option à l'échelle pour produire de l'énergie à bas carbone. Mais que le nucléaire reste « assailli » par les dépassements de coût, les besoins

---

<sup>21</sup> Il est intéressant aussi que les propositions de scénarios étudiées sont bien plus ambitieuses puisque la stabilisation de la température modélisée à 1,5°C est devenue l'aune de la « réussite » des scénarios, tandis que le 2°C apparaît quasi-moderé. Ceci contraste nettement avec les fourchettes précédentes qui décrivaient un spectre large de scénarios excluant les formules les plus radicales de diminution des émissions. Le GIEC se focalise désormais exclusivement sur des scénarios visant la fourchette de l'Accord de Paris (1,5-2°C).

d'investissement initiaux massifs, les défis des déchets nucléaires, et un soutien public et politique faible

Un point important du consensus constant est qu'il est peu probable que des pénuries de ressource en combustibles nucléaires sera un facteur bloquant<sup>22</sup>.

## Rapport 1,5°C de 2019

Dans le dernier rapport spécial sur les 1,5°C, l'énergie primaire fournie par la bioénergie se situe entre 40 et 310 EJ an<sup>-1</sup> en 2050 (plage minimum-maximum) et celle fournie par le nucléaire entre 3 et 66 EJ an<sup>-1</sup> (plage minimum-maximum). Sur long terme, la fourchette va de zéro à 95 ( !)

Ce rapport SR1.5C s'engage au final assez peu, et insiste sur les différences entre scénarios<sup>23</sup>.

D'ici à 2050, les sources renouvelables (bioénergie, hydroélectricité, énergie éolienne et solaire, évaluées selon la méthode d'équivalence directe) procurent de 52 à 67 % (intervalle interquartile) de l'énergie primaire dans les trajectoires axées sur l'objectif de 1,5 °C

Une autre façon de se projeter sur l'avenir est de regarder les engagements (« contributions ») des pays sur le climat. Dans la première génération de contributions après l'Accord de Paris, une grande majorité de pays ne s'engagent pas sur une augmentation du nucléaire, soit 5 sur 162 de ces documents<sup>24</sup> selon Amory Lovins<sup>25</sup> :

## Le cas des scénarios « forte croissance de la demande »

Le travail SR1.5C (rapport spécial 1,5°C du GIEC) a eu un impact très important sur les développements politiques de la négociation climat. En particulier, ce travail a

---

<sup>22</sup> Le GIEC cite notamment la NEA-OCDE et l'AIEA de 2010 et 2019, qui font monter les ressources conventionnelles en uranium à 130 ans d'équivalent en 2016 contre 100 ans en 2009. Cela rend l'idée d'exploitation du thorium ou de cycles au plutonium peu intéressante vu les quantités et les prix de l'uranium restant sur le globe.

<sup>23</sup> Citation "There are large differences in nuclear power between models and across pathways (Kim et al., 2014; Rogelj et al., 2018). One of the reasons for this variation is that the future deployment of nuclear can be constrained by societal preferences assumed in narratives underlying the pathways (O'Neill et al., 2017; van Vuuren et al., 2017b). Some 1.5°C pathways with no or limited overshoot no longer see a role for nuclear fission by the end of the century, while others project about 95 EJ yr<sup>-1</sup> of nuclear power in 2100 (Figure 2.15.)

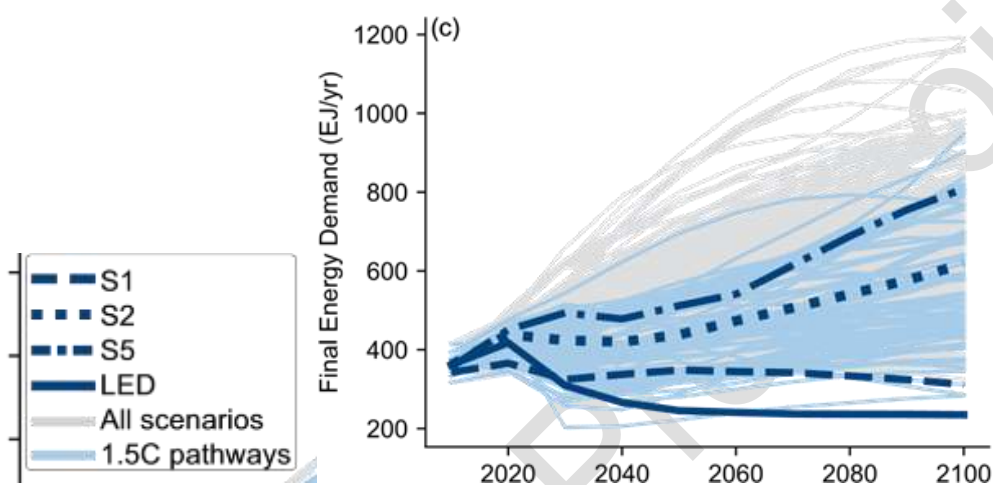
<sup>24</sup> UNFCCC, Intended Nationally Determined Contributions, United Nations Framework Convention on Climate Change, (2015) dont le résumé est ici [http://unfccc.int/focus/indc\\_portal/items/8766.php](http://unfccc.int/focus/indc_portal/items/8766.php).

<sup>25</sup> Lovins, A. B., T. Palazzi, R. Laemel, and E. Goldfield, 2018: Relative deployment rates of renewable and nuclear power: A cautionary tale of two metrics. *Energy Res. Soc. Sci.*, 38, 188–192, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.01.005>.

convaincu un grand nombre de décideurs que l'objectif climatique de 1,5°C mérite d'être poursuivi avec vigueur tant les impacts sont bien plus importants pour un réchauffement de +2°C.

Ce travail est aussi cité par le fait que plusieurs scénarios font appel massivement à l'absorption négative de carbone à l'échelle mondiale. Le graphe suivant présente quatre familles de scénarios (P1-P4 appelés ici également LED, S1, S2, S5) qui ont été développés à cette occasion.

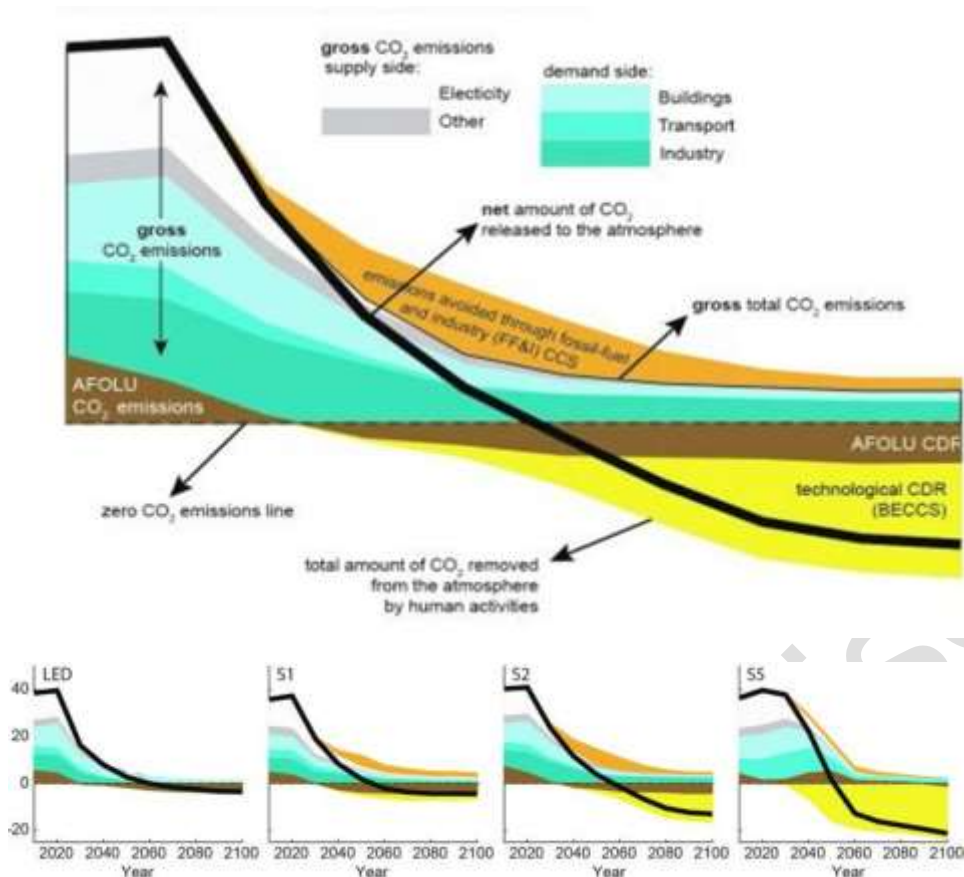
Ces quatre scénarios reposent sur des hypothèses assez distinctes de croissance de la demande d'énergie données dans le graphe suivant [chapitre 2, fig 2.4 (c) extrait du rapport final] :



Rapport du GIEC SR1.5C, la demande d'énergie des scénarios considérés

Il y a bien deux scénarios de limitation des croissances de la consommation et deux qui décrivent une expansion. Ces quatre types d'évolution de la demande du rapport spécial du GIEC sur le 1,5°C « IPCC SR1.5C » ont bien cadré les exigences et l'urgence d'un tel scénario.

Ils ont aussi montré par l'absurde que leur traitement ne passe pas par une absorption biologique massive se substituant à la sobriété ou à la transition énergétique vers les renouvelables, et aussi le caractère très risqué d'un « overshoot » de dépassement temporaire des limites. Dans les scénarios-type du GIEC SR1.5C les émissions négatives servent (1) à compenser les secteurs encore émetteurs (2) à compenser les retards accumulés dans l'action climatique. Les scénarios dont l'absorption est la plus accentuée sont aussi ceux qui ont le plus tardé dans l'action, ce qui les rend aussi bien plus consommateurs lors du pic de consommation.



Les quatre types de scénarios du GIEC SR1.5C

En réalité et au vu des travaux ultérieurs du GIEC [AR6 en cours] les scénarios présentés à droite (c'est-à-dire ceux de l'expansion des demandes finales) n'ont plus de sens : augmentation forte des besoins primaires dans les pays développés, expansion gigantesque des consommations de fossile avec CCS. En particulier, l'absorption de carbone organique BECCS, seule façon de créer une production d'énergie « négative » (en jaune sur le graphe) à ce stade des modèles, a créé une « bulle » chez les modélisateurs, qui existe moins dans les travaux suivants. Le captage du carbone n'est plus utilisé par exemple pour compenser des centrales thermiques fossiles mais exclusivement pour des procédés chimiques ou d'élaboration de matériaux, soit dix fois moins dans la projection. Les centrales charbon ou gaz fossile ont alors en grande partie disparu avant 2050, car elles sont bien plus chères que leurs homologues renouvelables.

De même, les limites flagrantes sur l'utilisation des terres arables et forestières font que le BECCS n'est plus le « deus ex-machina » des modélisateurs (ce qui ne veut pas dire que la question de la biomasse soit réglée dans la discussion).

Les travaux ultérieurs montrent d'une part que la montée des énergies renouvelables et des technologies d'efficacité n'est pas le facteur limitant (contrairement à l'absorption du carbone sous forme CCS ou BE-CCS). Ce dernier débat ne fait que commencer, mais les derniers travaux diversifient nettement les ressources et les filières d'absorption.

Comment évolue le nucléaire dans le SR1.5C ? Dans une bonne partie des scénarios, le nucléaire augmente mais dans certains il diminue très fort. La production varie donc -pour les scénarios qui limitent le réchauffement- entre 0 et 95 EJ à la fin du siècle. Mais dans le détail, pour le scénario P1 à P4, on peut remarquer que les scénarios d'expansion forte (P3 et P4) reçoivent bien plus de nucléaire que le P1 ou le P2. Ces derniers font varier la production d'environ 2,5 fois (soit le même chiffre que l'AIE ou le AIEA haut déjà décrits) tandis que les scénarios 3 et 4 atteignent 500% de croissance du nucléaire en 2050. Les énergies renouvelables dans ces scénarios suivent le même mouvement et atteignent un multiple 13 vis-à-vis de leur niveau actuel. Ces chiffres très importants de croissance des demandes d'énergie (+ 20% et même +40% pour la demande finale en 2050) ne sont plus de mise dans les scénarios AR6 en cours, qui limitent tous le total consommé. La vision « économe-sobre » a gagné son consensus, d'autant plus pour les pays développés.

## Les discussions en vue de l'AR6

Depuis deux ans de nombreux travaux ont été publiés et utilisés comme base des travaux du sixième rapport du GIEC. Ils convergent beaucoup plus que les travaux du rapport spécial pour plusieurs raisons à l'horizon 2050 : Les modélisations prennent un point de départ plus tardif (2019-2020 par exemple) alors que les modélisations précédentes pouvaient dater d'il y a dix ans et plus ; les états se sont prononcés de façon plus complète ; de même le rapport spécial sur le 1,5°C a produit ses effets sur les amplitudes possibles des développements et le caractère urgent de l'action.

Dans l'AR6, les scénarios envisagés pour le nucléaire pour 2050 vont de 4 à 17 EJ/an contre 9,77 en 2020<sup>26</sup> (pour les scénarios inclus dans la fourchette 25%-75%, avec un point moyen de 11 EJ/an (soit 1,3% de l'énergie primaire en 2050 avec une fourchette de 0,5% à 2%<sup>27</sup>). Il s'agit de la très grande majorité des scénarios envisagés, nous verrons qu'il existe en plus petit nombre des scénarios de « sortie intégrale » et des scénarios de « nucléaire haut » plus controversés.

[Note : cette partie fait encore l'objet de débats dans les instances du GIEC, elle n'est donnée ici que pour le débat et non pour citation]

---

<sup>26</sup> Valeur AIE prise en référence par le GIEC pour sélectionner les scénarios. Certains scénarios, notamment les plus anciens, avaient des valeurs de passage en 2020 trop importantes et ont n'ont pas été pris en considération.

<sup>27</sup> Publications en discussion à partir de Rogelj et al qui a alimenté le draft 2 AR6 [en cours]

*"In these scenarios, fossil fuel consumption decreases after 2020, declining from 477 EJ yr-1 (462 to 497) in 2020, to 259 EJ yr-1 (194 to 348) in 2050 in 2°C scenarios, and 204 EJ yr-1 (145 to 280) in 1.5°C scenarios. Coal demand declines much faster than total fossil fuels, declining to 15 EJ yr-1 (4 to 43) in 2050 in 1.5°C scenarios, from 151 EJ yr-1 (143 to 163) in 2020 (see Figure 3.16). Natural gas demand varies across scenarios, with some scenarios showing a rapid decrease after 2020 and others showing continued increases up to 2050. Oil demand decreases from 193 EJ yr-1 (187 to 201) in 2020 to 129 EJ yr-1 (97 to 164) in 2050 in 2°C scenarios and 108 EJ yr-1 (64 to 141) in 1.5°C scenarios. Scenarios limiting warming to 2 °C and 1.5 °C show a more rapid increase in renewable energy, with an increase in non-biomass energy from 18 EJ yr-1 in 2015 to 189 EJ yr-1 (125 to 255) in 2050 in 2°C scenarios and 178 EJ yr-1 (104 to 260) in 1.5°C scenarios. "*

Il est donc erroné de prétendre que le GIEC veut une multiplication par deux voire par six du nucléaire.<sup>28</sup>

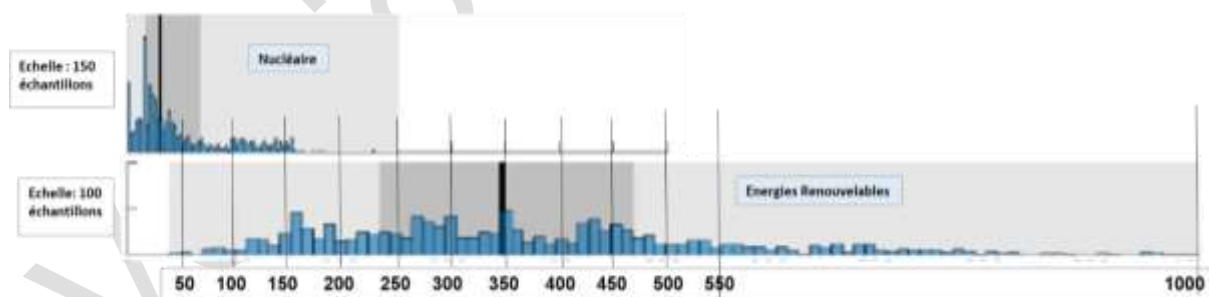
Le cas central est plutôt celui d'une stagnation de la production (3055 TWh contre 2796 actuellement), entre des quartiles de diminution de 60% (à 1111 TWh) et d'augmentation de 70% à 4722 TWh. Le doublement du parc nucléaire est donc renvoyé dans la minorité de scénarios pris en compte.

On peut signaler que cette fourchette très large, liée aux analyses de très nombreuses équipes prises en compte, est similaire pour les scénarios aboutissant à 2°C ou à 1,5°C de réchauffement.

Une évolution mécanique vient de ce que l'échantillon des scénarios pris en compte se rétrécit vis-à-vis des scénarios ne respectant pas ou peu l'Accord de Paris. Ceci provient de la mise à jour des années récentes d'une part.

Il se diversifie aussi sur la demande d'énergie et la consommation (c'est même un chapitre entier du nouveau rapport). Il est difficile de complètement juger de l'échantillonnage des scénarios utilisés, car leur réalisme ou leur capacité à atteindre l'objectif ne sont pas pondérés. La répartition est tout de même un paramètre important qui confirme nettement la marginalisation du nucléaire par rapport aux renouvelables électriques (hors biomasse traitée séparément dans le rapport).

[Le graphe provisoire ci-dessous indique la consommation (Energie Finale en EJ) en 2100 pour le nucléaire et pour les énergies renouvelables hors biomasse (hydro, PV, éolien, géothermie...)]



Graphique provisoire (EJ) comparant en 2100 la consommation totale finale du nucléaire et des énergies renouvelables

Ce graphe encore provisoire a été ramené à l'échelle (en Exa Joule EJ). Il recense les scénarios considérés dans le GIEC AR6 à l'horizon 2100. Le grisé est l'amplitude des

<sup>28</sup> Selon *Tripho*, Arte le 10/2/2022 in 28 minutes36'.22". "Il y a six pays dans le monde où ils ont décarboné intégralement leur système électrique c'est des pays, tous, à base de nucléaire et d'hydraulique. Et les pays renouvelables qui l'on fait c'est des pays à base de l'hydraulique et de la géothermie, qui sont donc des ERC ( ? ) pilotables. Et pour ce qui est des scénarios du GIEC c'est 96% des scénarios du GIEC qui intègrent du nucléaire dont les quatre principaux, qui sont considérés comme les plus représentatifs de ce qu'il est possible pour atteindre les 1,5°C, qui tous appellent entre fois deux et fois six le parc nucléaire mondial. Moi je pense que c'est des proportions qu'il est important de rappeler ». [aussi : « on a un parc extrêmement performant / EDF est super / l'ASN c'est les meilleurs et ça justifie qu'on ait des pannes génériques comme ça on prouve qu'on a une autorité de sûreté supérieure même à celle des Allemands »...]

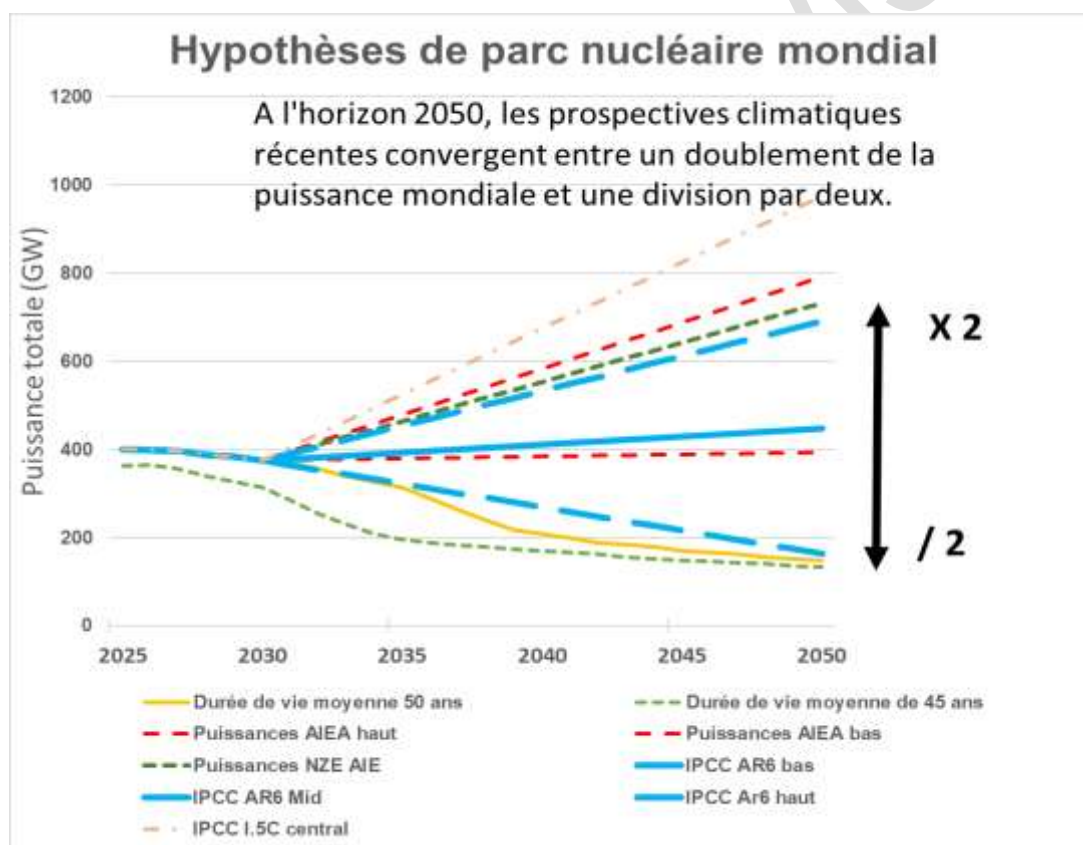
scénarios considérés, avec en gris foncé le centre de l'échantillon (25%-75%) et la barre noire la médiane de l'échantillon. En tout état de cause, le développement des énergies renouvelables y est spectaculaire. Dans ses dernières versions, le rapport détaille moins les projections de court terme (2050), sans doute pour limiter le potentiel de controverse.

## En conclusion sur les consensus

Trois exercices récents des institutions majeures du climat ou du nucléaire convergent dans les prochaines années entre une remontée du nucléaire proche du double de la production actuelle, avec des hypothèses basses plus proches d'une division par deux.

Il y a en gros un groupe aligné sur la prévision optimiste de l'AIEA d'un doublement à trente ans du parc, de l'autre une stagnation voire une sortie larvée du nucléaire (représentée en bas sur le graphe).

Le graphe suivant présente l'augmentation de la capacité des différents scénarios décrits précédemment d'ici à 2050 :



« Nucléaire Fade » ou « Remontada » : Les scénarios probables

L'industrie nucléaire et l'AIEA ont récemment affiché leur optimisme avec la perspective du doublement du parc nucléaire mondial, décrits dans les paragraphes précédents. En réalité, les signaux restent contradictoires.

La vision à court-moyen terme est en effet obscurcie par l'allongement constaté des durées de vie d'une partie des parcs, qui compense la stagnation des constructions des dernières décennies.

Au final, les projections planifiées ne sont pas du tout aussi optimistes, comme le montre le « Tracking Power 2021<sup>29</sup> » basé sur un prolongement général des réacteurs à 60 ans, avec les constructions en cours de lancement. L'Agence voit d'ici à 2040 un parc nucléaire mondial somme tout assez proche de l'actuel, situé entre 350 et 600 GW contre l'actuel 400.:

C'est en particulier le cas dans les pays développés où le maintien de la capacité nucléaire est désormais en cause, suite au vieillissement des parcs existants.

Selon l'AIEA, le retrait se monte pour l'Amérique du Nord et l'Europe entre 95 et 168 GW sur l'ensemble de la période. L'agence prend en particulier acte de l'absence de relance aux Etats-Unis (à quelques remplacements de réacteurs près) durant les prochaines décennies. En Europe de l'Ouest,

	Retraits		Ajouts	
	Bas	Haut	Bas	Haut
Amérique du Nord	-76,6	-19,1	4,0	15,3
Europe de l'Ouest	-91,4	-75,7	28,8	66,3
Total	-168,0	-94,8	32,8	81,7

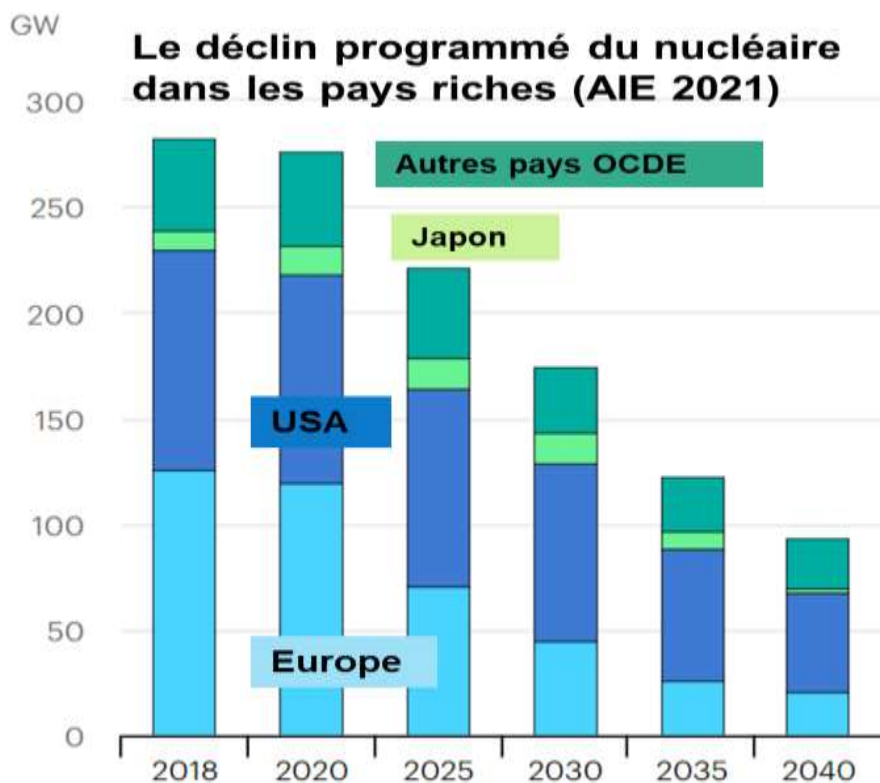
[Scénario 2021 AIEA].

Dans la même veine, l'AIEA publie en 2021 le scénario « Fade » qui souhaite alerter sur le risque de déclin fort du nucléaire, d'abord aux Etats-Unis où une partie du parc même amortie n'est plus rentable face aux constructions neuves des renouvelables [par exemple Bloomberg 2001] sans soutien public.

*[une note distincte présente la situation de la France, dont la part de nucléaire baisse de façon notable même en cas de construction de 14 EPR2 telle que proposée par Emmanuel Macron]*

<sup>29</sup> Tracking Nuclear Power sur <https://www.iea.org/reports/nuclear-power>





Scénario "Fade" de l'AIE, légendes E&E Consultant

L'AIE nomme cette situation de sortie larvée du nucléaire dans les pays riches le « **nuclear fade** »<sup>30</sup> cette situation de sortie larvée du nucléaire dans les économies les plus riches, si l'on projette la situation actuelle des constructions et des projets [graphe de l'AIE 2021] La projection « de laisser faire » dans le nucléaire correspond à une diminution importante dans les pays de nucléaire ancien et les économies avancées.

L'Agence Nucléaire de l'OCDE, liée à l'AIE, qui a fourni cette étude, la publie pour la repousser. Selon elle, dans ce scénario la puissance descend dans ces pays à 100 GW en 2040 (contre 280 aujourd'hui). Dans une grande partie des pays nucléaires concernés il s'agit d'une vision partagée de sortie lente ou accélérée du nucléaire (Allemagne, Belgique, Belgique, Taiwan, etc.) Pour les Etats-Unis, qui représentent le premier parc existant, la réalité des constructions ou des décisions reste limitée, quel que soit le discours du gouvernement fédéral qui n'a pas beaucoup son mot à dire et assiste depuis trente ans au déclin marqué de cette industrie.

La puissance nucléaire descend ainsi pour les Etats-Unis de 104 à 47 GW et de 125 à 21 pour l'Union Européenne soit une baisse de 140 GW en 2040.

<sup>30</sup> IEA, *Nuclear capacity operating in selected advanced economies in the Nuclear Fade Case, 2018-2040*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/nuclear-capacity-operating-in-selected-advanced-economies-in-the-nuclear-fade-case-2018-2040>

## Projections pour la Chine ;

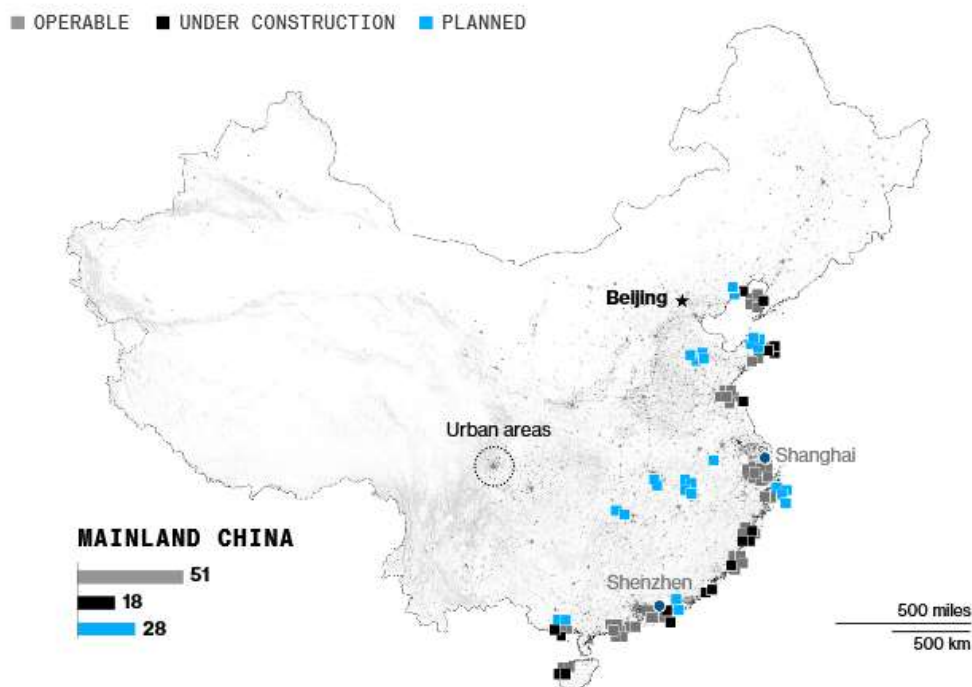
La Chine est à la fois un lieu où la construction nucléaire s'est poursuivie ces dernières années (désormais 52 réacteurs), mais aussi le signe des limites mondiales de l'industrie. Les constructions envisagées ne dépassent pas pour l'instant un total de parc 70 GW en 2025 (16 réacteurs en cours de chantier actuellement).

La suggestion d'un objectif voire d'une commande de 150 réacteurs n'est pour l'instant qu'une suggestion lancée par un responsable de la société nucléaire CGN (China General Nuclear Power Corp.). Le statut réel de cet engagement n'est pas très précis, mais ces réacteurs représenteraient une partie significative des constructions affichées dans le scénario de l'AIEA.

Cinq réacteurs ont été construits par la Chine au Pakistan dans le cadre des « nouvelles routes de la soie ».

Ici aussi, il faut distinguer l'horizon de long terme, très libre pour les perspectives, avec les objectifs de moyen terme. En effet, la Chine a beaucoup de mal à planifier des constructions sur sa zone côtière particulièrement dense ou vers l'intérieur dont l'approvisionnement en eau est problématique à l'échelle d'un parc nucléaire.

Carte Bloomberg d'après WANO.



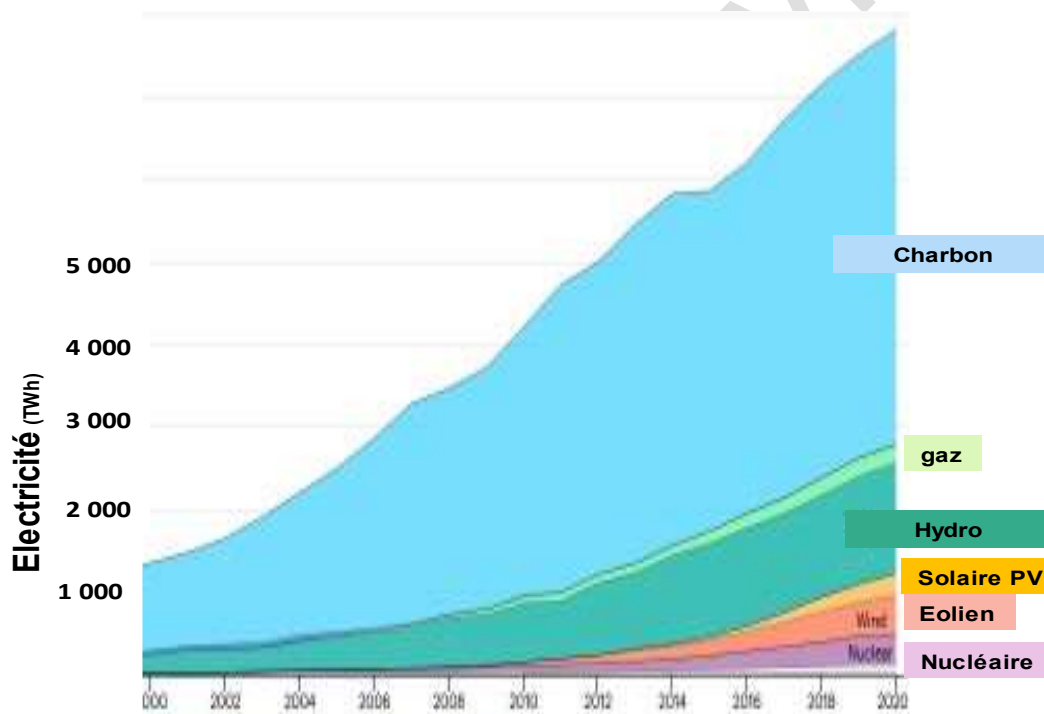
Sous un angle plus politique, selon le rapport WNISR 2021, douze responsables nucléaires de premier plan ont été purgés pour corruption en 8 ans, signe à la fois des difficultés industrielles (malfaçons) mais aussi de l'échec du secteur à l'intérieur du pouvoir chinois.

Et surtout, En Chine, l'électricité solaire et éolien représente déjà deux fois la production nucléaire, survolés par l'hydro. En face, un objectif de 10% du mix

électrique semble hors d'atteinte pour le nucléaire, rattrapé par la concurrence. Pendant ce temps, la Chine compte désormais une puissance éolienne installée supérieure à ...300 GW! Selon WindPower, la Chine devrait atteindre son objectif 2030 de 1 200 GW de capacité éolienne + solaire avec ...quatre ans d'avance sur ses objectifs<sup>31</sup>.

Comme pour l'industrie prise globalement, en Chine la perspective nucléaire est non négligeable en termes de développement industriel. La Chine dépasse cette année le productible nucléaire français (sans même tenir compte des pannes génériques qui frappent ce dernier...) mais la part du nucléaire y reste très limitée par rapport aux ressources concurrentes.

Le graphe suivant (AIE 2021) montre que le charbon domine toujours le secteur électrique chinois. Ses poursuivant ne sont plus ni le gaz ni le nucléaire, mais d'abord l'électricité hydraulique, puis l'éolien. La PV devrait dépasser prochainement le nucléaire.<sup>32</sup>



Production électrique en Chine (2020, source AIE traitement E&E)

En termes quantifiés maintenant, les chiffres sont donnés par le tableau suivant :

<sup>31</sup> <https://www.windpowermonthly.com/article/1734854/offshore-wind-surge-drives-china-past-300gw-installed-capacity>

<sup>32</sup>

<b>Chine 2020 (source AIE 2021)</b>		
<b>Electricité</b>	TWh	%
Charbon	5001	69,9%
Hydro	1334	18,6%
Eolien	471	6,6%
Nucléaire	366	5,1%
Solaire PV	269	3,8%
Gaz	218	3,0%
Total	7154	100%

Sur une année, l'éolien a augmenté sa part de marché de manière significative et atteint déjà les 10%. Pour le nucléaire, le lancement de 150 GW -très hypothétiques- d'ici à 2035 représenterait environ 1000 TWh en 2050 soit environ 10% de la production. Cette part de marché serait donc -comme pour le reste du monde- un plafond haut dans les prochaines décennies.

## Les constructions dans le reste du monde.

La suite de l'étude<sup>33</sup> distingue -comme le font les organisations spécialisées- les régions et en particulier les pays OCDE et non-OCDE. Chaque groupe a deux logiques propres : d'une part dans les pays développés ces choix font face à l'aspiration ou la décision de sortie du nucléaire (Allemagne, Suisse, Belgique, Corée, Taiwan...); d'autre part, dans les pays émergents les questions purement économiques laissent la place à des logiques de puissance ou de développements militaires ultérieurs (Emirats, Iran...). Ceci est encore plus le cas pour les pays de la zone Russe, souvent placés comme « en transition » car elle n'est pas adhérente de l'OCDE<sup>34</sup>.

Si on exclut les pays qui refusent le nucléaire ou qui se trouvent en moratoire prolongé ou en voie de sortie, (Allemagne, Suisse, Italie, Belgique, Espagne, Danemark, Nouvelle-Zélande, Australie...), les nouveaux marchés sont donc concentrés dans quelques pays émergents et quelques pays développés.

L'étude AIE sur le scénario « nuclear fade » [similaire aux projections de l'AIEA] montre ainsi que le maintien de la puissance installée dans les pays développés suppose de construire un nouveau parc de 190 GW dans les seuls pays du Nord qui acceptent cette énergie. A ce stade, on peut faire remarquer qu'une partie importante de cette puissance n'est pas liée à des « fermetures politiques », puisque même dans des pays de sortie du nucléaire comme la Belgique ou l'Allemagne, les centrales -prolongées ou non- auraient dépassé leur péremption.

Il faut dans ce cas que le « reste du monde » construise 190 à 200 GW de plus à l'échéance, soit une construction de 600 GW sur vingt ans dans les seuls pays non-OCDE. Le challenge est alors encore multiplié.

<sup>33</sup> En cours

<sup>34</sup> Et a été exclue du processus d'adhésion suite à la guerre en Ukraine

Dans cet ensemble disparate « non-OCDE » se trouvent d'une part la Chine et l'Inde, d'autre part les autres pays de l'accès au nucléaire<sup>35</sup>. Hors de ces deux pays aux réseaux électriques immenses, l'essentiel de ce groupe est constitué de pays trop pauvres et disposant de compagnies et de réseaux électriques encore trop faibles pour s'équiper, même pour les plus riches d'entre eux.

## Les « outliers », scénarios tout-nucléaire portés en France

Ces discussions sur le marché du nucléaire dans le monde interfèrent avec le débat en France, puisque l'optique du nucléaire en tant que « gagnant » ou « indispensable » dans la transition énergétique va avoir un impact sur l'image portée, en positif ou en négatif, par la vision mondiale de la ressource.

Il a semblé intéressant de s'intéresser aux projections diffusées en France par les groupes de défenseurs du nucléaire. Par exemple, les principaux animateurs de l'association « Sauvons le Climat » ont co-signé une publication citée par le GIEC SR1.5C. Elles sont classées comme « haut nucléaire », et se situent très au-dessus de la fourchette des scénarios utilisés pour les consensus du groupe au point de ne pas avoir été prise en compte dans les synthèses des modélisations.<sup>36 37</sup>

Des chiffres de nature similaires ont été portés par l'ingénieur Jean-Marc Jancovici dans ses exposés à l'Ecole des Mines et retranscrits.<sup>38</sup>

Il est intéressant de repérer à quel point ces projections sont éloignées des études des organismes cités précédemment (AIE, AIEA). Ces dernières devraient pourtant par construction défendre une part de nucléaire importante, car elles sont portées par un processus inter-gouvernemental où le nucléaire est très important : statut de promotion du nucléaire civil pour l'AIEA, forte présence du nucléaire (agence commune sur le nucléaire OCDE/AIE pour les seconds).

On a présenté ces scénarios par comparaison, d'une part en tant que production mondiale d'électricité par le nucléaire, d'autre part sur une chronologie de lancement de chantiers. Dans les deux cas il y a un écart très important avec les consensus. Il n'est pas dans l'objet du présent article de commenter les motivations de ces publications très décalées par rapport aux visions projetées dans les institutions internationales et dans le reste du monde, qui feront l'objet d'un autre article.

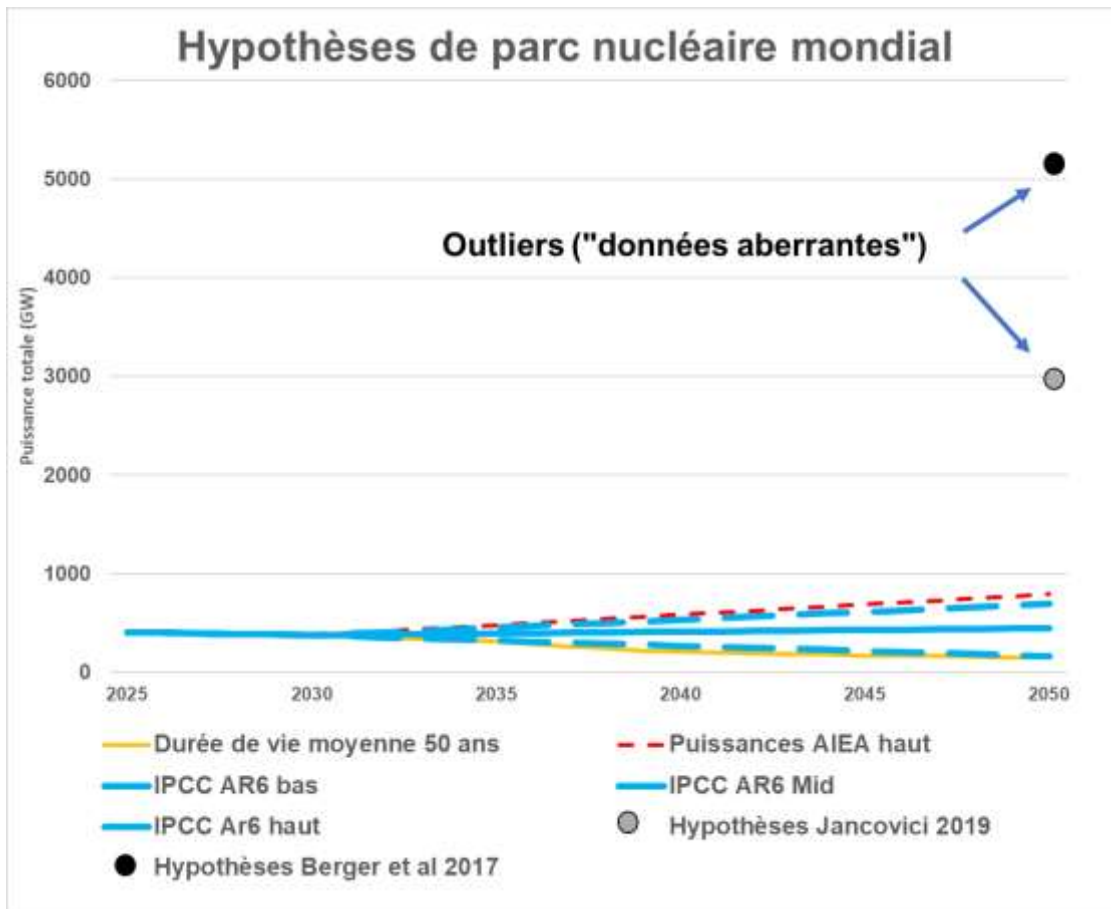
---

<sup>35</sup> Voir p.71 pour la Chine et p.95 pour l'Inde sur <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2021-Ir.pdf>

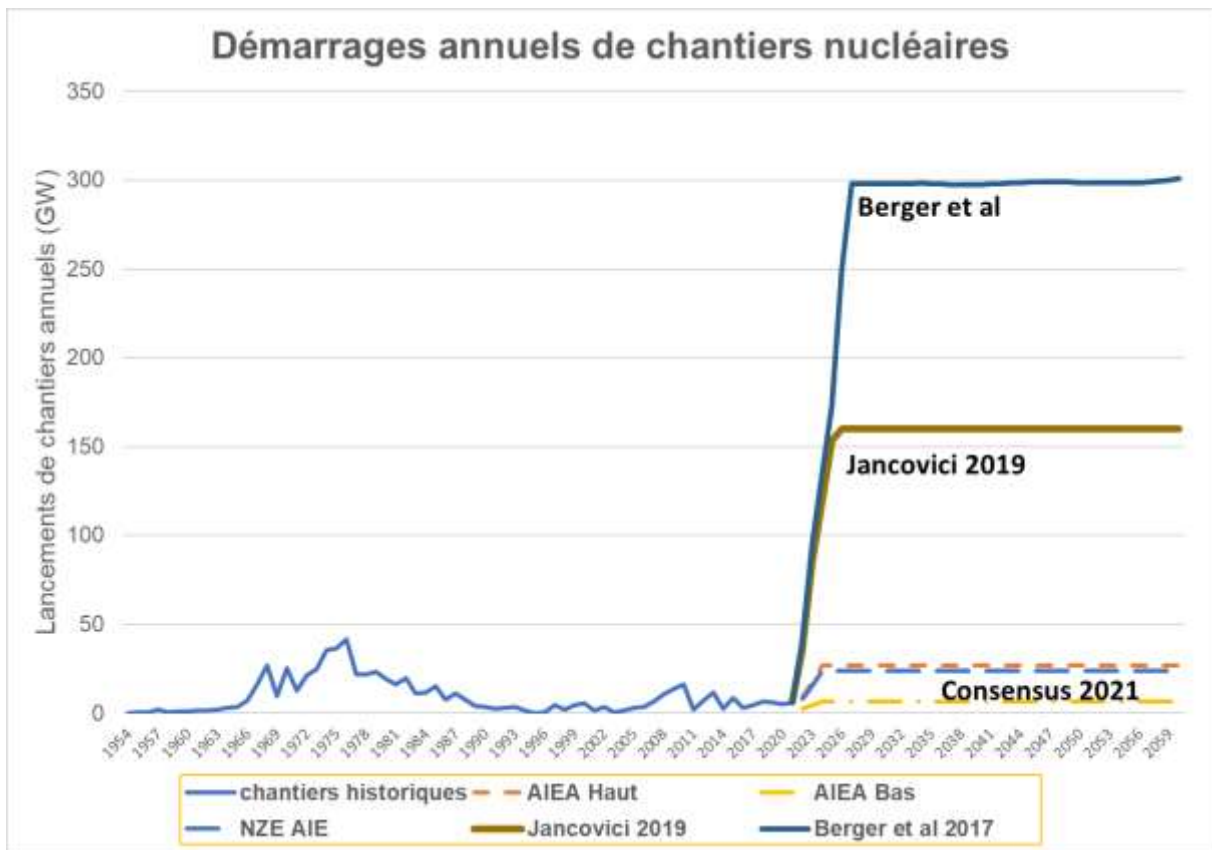
<sup>36</sup> [chapitre 2 SR1.5C p. 138] Berger, A. et al., 2017b: How much can nuclear energy do about global warming? International Journal of Global Energy Issues, 40(1/2), 43–78, doi:10.1504/ijgei.2017.080766.

<sup>37</sup> Berger, A. et al., 2017a: Nuclear energy and bio energy carbon capture and storage, keys for obtaining 1.5°C mean surface temperature limit. International Journal of Global Energy Issues, 40(3/4), 240–254, doi:10.1504/ijgei.2017.086622

<sup>38</sup> [https://jancovici.com/wp-content/uploads/2020/07/Jancovici\\_Mines\\_ParisTech\\_cours\\_6.pdf](https://jancovici.com/wp-content/uploads/2020/07/Jancovici_Mines_ParisTech_cours_6.pdf)



Présentation des hypothèses en puissance totale des parcs nucléaires (Graphe E&E Consultant 2022)



Lancements de chantiers nucléaire (E&E Consultant 2022)