

Cours: Nouvelles technologies des énergies renouvelables

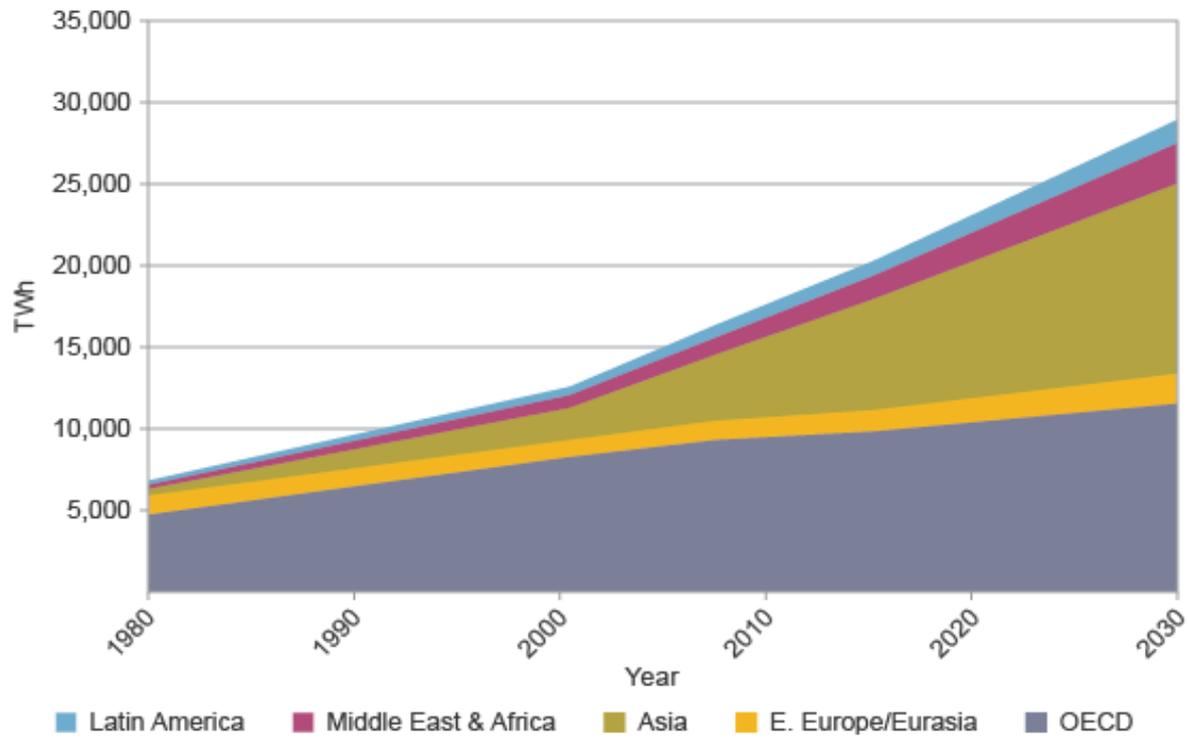
Chapitre I

Analyse et perspectives énergétiques mondiales

I.1. Evolution de la demande énergétique

Les réserves mondiales prouvées d'énergie non renouvelable (combustibles fossiles et énergie nucléaire) pouvaient être estimées en 2019, selon BP et WNA, à 1 187 milliards de tonnes d'équivalent pétrole (tep), soit 85 ans de production au rythme actuel. Cette durée est très variable selon le type d'énergie : 50 ans pour le pétrole et pour le gaz naturel, 132 ans pour le charbon, 128 ans pour l'uranium avec les techniques actuelles. La durée potentielle d'utilisation de l'énergie nucléaire pourrait se compter en siècles grâce aux filières de surgénération et en millénaires avec celle de fusion nucléaire, et le potentiel exploitable de l'énergie solaire est estimé à vingt fois la consommation mondiale annuelle.

World Electricity Consumption by Region



Source: OECD/IEA World Energy Outlook 2009 - Reference Scenario

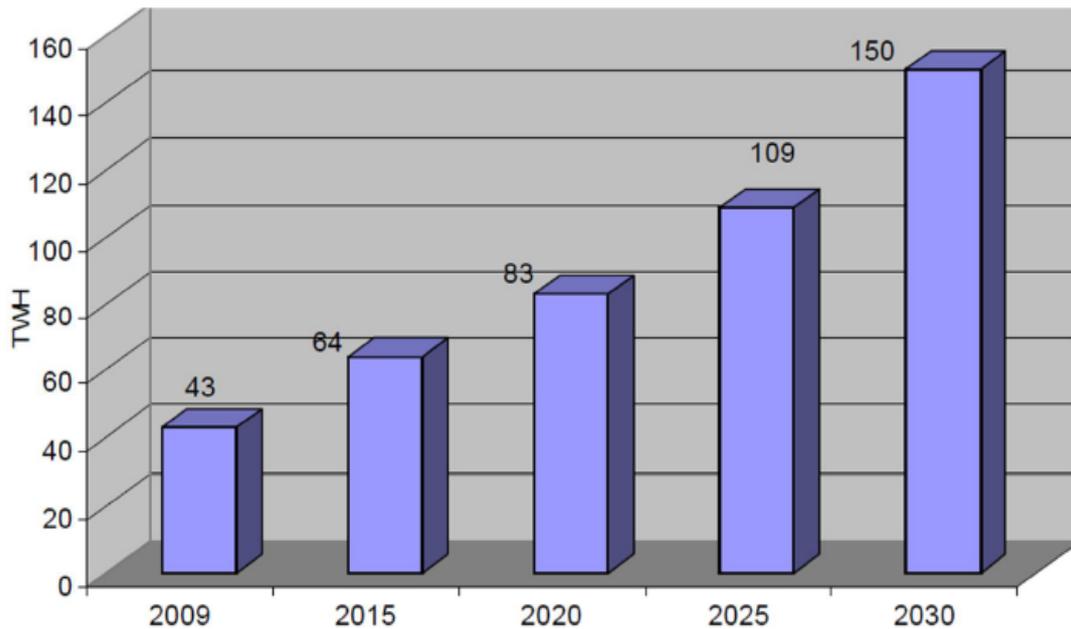


Fig4: Electric Consumption in Algeria (TWh)

- In 2009: 43 TWH
- In 2020: 83 TWH
- In 2030: 150 TWH

II.2. Pétrole, gaz naturel et charbons

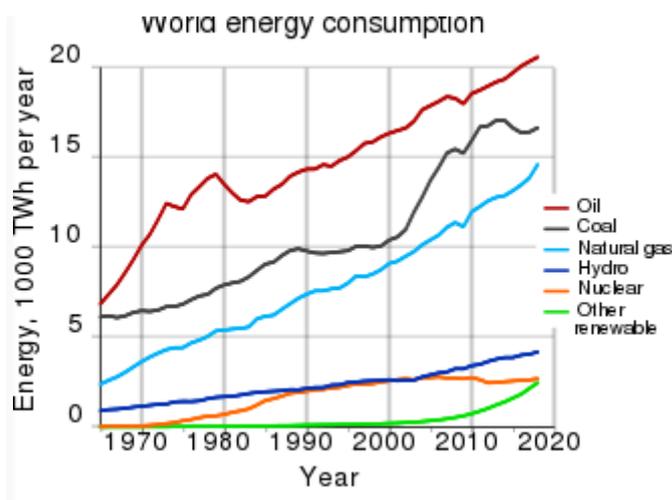
La production mondiale d'énergie commercialisée était en 2019, selon BP, de 584,9 Exajoules, en progression de 12,1 % depuis 2009. Elle se répartissait en 33,1 % de pétrole, 27,0 % de charbon, 24,2 % de gaz naturel, 4,3 % de nucléaire et 11,5 % d'énergies renouvelables (hydroélectricité 6,5 %, éolien 2,2 %, biomasse et géothermie 1,0 %, solaire 1,1 %, agrocarburants 0,7 %). Cette statistique ne prend pas en compte les énergies auto-consommées (bois, pompes à chaleur, solaire thermique, etc.), qui selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE) représentaient 9,3 % en 2018. Au total, la part des énergies renouvelables dans la production d'énergie mondiale est donc supérieure à 20 %.

Depuis la révolution industrielle, la consommation d'énergie n'a cessé d'augmenter. La consommation finale énergétique mondiale a progressé de 109 % en 44 ans, de 1973 à

2018 ; elle s'élevait en 2018, selon l'Agence internationale de l'énergie, à 9 938 Mtep, dont 19 % sous forme d'électricité ; depuis 1990, elle a progressé un peu plus vite que la population, mais sa répartition par source d'énergie n'a guère évolué : la part des énergies fossiles a reculé de 0,3 points, mais leur domination reste massive : 82 % ; la part des énergies renouvelables (EnR) n'a progressé que de 0,5 points, passant de 15,5 % en 1990 à 16,0 % en 2018, car le recul de la part de la biomasse compense en partie la progression des autres EnR. Sa répartition par secteur était : industrie 29 %, transports 29 %, résidentiel 21 %, tertiaire 8 %, agriculture et pêche 2 %, usages non énergétiques (chimie, etc.) 9 %.

Au niveau mondial, les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) dues à l'énergie en 2018 sont estimées par l'AIE à 33 513 Mt, en progression de 117 % depuis 1973, dont 44,0 % produites par le charbon, 34,1 % par le pétrole et 21,2 % par le gaz naturel ; par secteur en 2017, 37 % étaient issues de l'industrie, 25 % des transports, 16 % du secteur résidentiel et 10 % du secteur tertiaire. Les émissions de CO₂ par habitant en 2018 sont estimées à 4,42 tonnes dans le monde, 15,03 tonnes aux États-Unis, 8,40 tonnes en Allemagne, 4,51 tonnes en France, 6,84 tonnes en Chine, 1,71 tonnes en Inde et 0,98 tonnes en Afrique.

Dans le cadre des négociations internationales sur le climat, tous les pays se sont engagés à maintenir la hausse des températures en deçà de 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle. Pour aboutir à ce résultat, il faut globalement s'abstenir d'extraire un tiers des réserves de pétrole, la moitié des réserves de gaz et plus de 80 % du charbon disponibles dans le sous-sol mondial, d'ici à 2050. Selon l'AIE, les engagements individuels des pays à la Conférence de Paris de 2015 sur les changements climatiques (COP21) sont largement insuffisants : ils ne feraient que ralentir la progression des émissions de CO₂ et mèneraient à une hausse des températures de 2,7 °C en 2100.



Consommation énergétique mondiale, en **térawatts-heures** (TWh), de 1965 à 2018 (pétrole, charbon, gaz naturel, hydraulique, nucléaire, autres renouvelables).

Réserves prouvées de pétrole : 10 principaux pays (milliards de barils)

Pays	fin 1999	fin 2009	fin 2019	% en 2019	R/P
 Venezuela	76,8	211,2	303,8	17,5 %	907
 Arabie saoudite	262,8	264,6	297,6	17,2 %	69
 Canada	181,6	175,0	169,7	9,8 %	82
 Iran	112,5	137,0	155,6	9,0 %	121

 Irak	112,5	115,0	145,0	8,4 %	83
 Russie	112,1	105,6	107,2	6,2 %	25
 Koweït	96,5	101,5	101,5	5,9 %	93
 Émirats arabes unis	97,8	97,8	97,8	5,6 %	67
 États-Unis	29,7	30,9	68,9	4,0 %	11
 Libye	29,5	46,4	48,4	2,8 %	108
Total des réserves prouvées	1 277,1	1 531,8	1 733,9	100,0 %	49,9
R/P = Réserves /Production 2019 (années restantes au rythme actuel)					

NB : la forte augmentation des réserves du [Canada](#), du [Venezuela](#) et des [États-Unis](#) résulte de l'intégration des réserves non conventionnelles de [sable bitumineux](#) pour les deux premiers (162,4 Gbl au Canada et 261,8 Gbl au Venezuela), de pétrole de schiste pour le troisième.

Les 4 premiers pays concentrent 53,5 % des réserves.

Réerves prouvées de gaz naturel : 10 principaux pays

(billions de m³ ou Tm³)

	Pays	fin 1999	fin 2009	fin 2019	% en 2019	R/P
1	 <u>Russie</u>	32,9	34,0	38,0	19,1 %	56
2	 <u>Iran</u>	23,6	28,0	32,0	16,1 %	131
3	 <u>Qatar</u>	11,5	26,2	24,7	12,4 %	139
4	 <u>Turkménistan</u>	2,6	8,2	19,5	9,8 %	308
5	 <u>États-Unis</u>	4,5	7,4	12,9	6,5 %	14
6	 <u>Chine</u>	1,4	2,9	8,4	4,2 %	47
7	 <u>Venezuela</u>	4,6	5,6	6,3	3,2 %	238
8	 <u>Arabie saoudite</u>	5,8	7,4	6,0	3,0 %	53
9	 <u>Émirats arabes unis</u>	5,8	5,9	5,9	3,0 %	95

10	 Nigeria	3,3	5,0	5,4	2,7 %	109
	Total monde	132,8	170,5	197,1	100,0 %	49,8
R/P = Réserves /Production 2019 (années restantes au rythme actuel)						

Les 4 premiers pays concentrent 57,4 % des réserves.

**Réserves prouvées de charbon : 10 principaux pays
(milliards de tonnes)**

	Pays	Réserves à fin 2019	Part en 2019	ratio R/P
1	 États-Unis	249,5	23,3 %	390
2	 Russie	162,2	15,2 %	369
3	 Australie	149,1	13,9 %	294
4	 Chine	141,6	13,2 %	37
5	 Inde	105,9	9,9 %	140
6	 Indonésie	39,9	3,7 %	65

7	 Allemagne	35,9	3,4 %	268
8	 Ukraine	34,4	3,2 %	(>500)
9	 Pologne	26,9	2,5 %	240
10	 Kazakhstan	25,6	2,4 %	222
	Total monde	1 069,6	100,0 %	132

R/P (années de production) = Réserves/Production 2019.

Les 4 premiers pays concentrent 65,6 % des réserves de charbon.

III. 3. Les énergies renouvelables

Les flux d'énergie, depuis l'extraction minière de combustibles fossiles ou la production d'énergie nucléaire ou renouvelable (énergie primaire), jusqu'à la consommation par l'utilisateur final (énergie finale), sont retracés par les bilans énergétiques. Les opérations de conversion et transport de l'énergie donnant toujours lieu à des pertes diverses, l'énergie finale est toujours plus faible que l'énergie primaire.

La différence peut être faible pour l'industrie des hydrocarbures par exemple, dont le rendement est dans certains cas proche de 1 (par exemple, pour une tonne brûlée dans un moteur d'automobile, on n'a eu besoin d'extraire qu'à peine plus d'une tonne d'un puits de pétrole saoudien ; ce n'est néanmoins pas le cas pour les gisements offshore profonds, les

pétroles lourds, le gaz de schiste voire les bitumes canadiens dont le rendement de production peut être le facteur limitant leur exploitabilité - indépendamment du prix).

En revanche, la différence est très importante si ce carburant est converti en énergie mécanique (puis éventuellement électrique), puisque le rendement de ce processus est au maximum de l'ordre de 40 % (p. ex., pour 1 TEP sous forme d'électricité consommée chez soi, le producteur a brûlé 2,5 TEP dans sa centrale à charbon, type de centrale actuellement le plus répandu dans le monde). Dans le cas d'une électricité produite directement (hydroélectricité, photovoltaïque, géothermique...), la conversion en énergie primaire pertinente est fonction du contexte et le coefficient de conversion utilisé doit être indiqué (voir ci-dessous) : pour comptabiliser la production d'une centrale hydroélectrique, on peut convertir directement les kWh en TEP selon l'équivalence physique en énergie $11\,630 \text{ kWh} = 1 \text{ TEP}$; mais si l'on se pose la question « combien de centrales à charbon cette centrale hydroélectrique peut-elle remplacer ? », alors il faut multiplier par 2,5.

III.3.1. Conversion des productions électriques

Lorsqu'il s'agit de convertir une énergie électrique exprimée en kWh (ou ses multiples) en énergie primaire exprimée en tep, on rencontre couramment deux méthodes :

- la méthode théorique ou « énergie finale » : on calcule simplement le nombre de tep selon l'équivalence physique en énergie ci-dessus,
- la méthode de « l'équivalent à la production » ou « méthode de substitution », qui indique le nombre de tep nécessaires à la production de ces kWh. Pour cela, on introduit un coefficient de rendement par lequel on doit multiplier le nombre de tep pour obtenir le nombre de kWh. Par exemple, considérant un rendement de 38 %, on a $1 \text{ TWh} = 10^6 \text{ MWh} = 0,086 / 0,38 \cdot 10^6 \text{ tep} = 0,226 \text{ Mtep}$. Ainsi, on considère que 1 TWh est

équivalent à 0,226 Mtep (et non 0,086 Mtep), car on considère qu'il est nécessaire de produire ou qu'il a fallu produire 0,226 Mtep pour obtenir 1 TWh.

La méthode retenue par les institutions internationales (AIE, Eurostat...) et utilisée en France depuis 2002, est assez complexe en ce qu'elle utilise deux méthodes différentes et deux coefficients différents selon le type d'énergie primaire ayant produit l'électricité :

- électricité produite par une centrale nucléaire : coefficient de 33 % ;
- électricité produite par une centrale géothermique : coefficient de 10 % ;
- toutes les autres formes d'électricité : méthode théorique, ou méthode du contenu énergétique qui revient à utiliser un coefficient de conversion de 100 %.

Par contre, l'Energy Information Administration américaine et les statistiques de BP adoptent la méthode de substitution.

Le présent article utilise également cette méthode de substitution ou méthode de l'équivalent à la production avec un coefficient de 38 % pour toutes les sources d'énergie électriques. En effet nous considérons l'énergie qu'il aurait fallu dépenser dans une centrale thermique d'un rendement de 38 % pour produire cette énergie électrique. Ceci est la meilleure méthode pour comparer les différentes énergies entre elles.

III.3.2. Classement des énergies primaires

Au niveau de la production et de la consommation, les différentes formes d'énergie primaire peuvent se classer de la façon suivante :

- Énergies fossiles
 - Pétrole
 - Gaz naturel

- Charbon
- Énergie nucléaire
 - Uranium
- Énergies renouvelables
 - Énergies renouvelables dites de haute enthalpie (haut potentiel énergétique)
 - Énergie hydroélectrique
 - Énergie éolienne
 - Énergie solaire photovoltaïque
 - Énergies renouvelables thermiques
 - Biomasse
 - Bois énergie, résidus de bois et de récoltes
 - Biogaz
 - Biocarburants
 - Déchets (peuvent contenir de la biomasse)
 - Géothermie
 - Énergie solaire thermique
 - Énergie thermique récupérée dans l'air, l'eau, le sol, etc. par pompe à chaleur

III.3.3. Ressources énergétiques mondiales

Les ressources ou réserves mondiales en énergie peuvent être considérées comme inépuisables si l'on considère que :

- l'énergie solaire reçue *en un jour* par notre planète est environ trente fois supérieure à notre consommation *annuelle* totale, et son potentiel exploitable est estimé à vingt fois la consommation mondiale annuelle;
- l'énergie nucléaire pourrait devenir quasiment inépuisable si l'on utilisait les filières de surgénération ou de fusion.

Cependant :

- l'énergie solaire est très peu concentrée, ce qui pose des problèmes économiques de rentabilité et d'espace ; de plus, l'irrégularité de sa production pose le problème du stockage de l'énergie ;
- l'énergie nucléaire pose des défis techniques et des problèmes de sûreté et de [déchets](#) qui suscitent des oppositions.

Le tableau suivant montre :

- l'immensité des réserves *potentielles* de l'énergie solaire ;
- la prépondérance des ressources énergétiques en charbon (50 % des ressources conventionnelles) ;
- la relative faiblesse des réserves d'uranium (énergie nucléaire) telles qu'estimées par l'Association nucléaire mondiale (ANM). Selon le rapport 2014 du GIEC, les ressources déjà identifiées et exploitables à des coûts inférieurs à 260 \$/kgU suffisent à couvrir la demande actuelle d'uranium pour 130 ans, soit un peu plus que l'estimation de l'ANM (voir tableau infra), qui repose sur un plafond de coût d'exploitation inférieur. Les autres ressources conventionnelles, à découvrir mais dont l'existence est probable, exploitables à des coûts éventuellement supérieurs, permettraient de répondre à cette demande pour plus de 250 ans. Le retraitement et le recyclage de l'uranium et du plutonium des combustibles usés permettrait de doubler ces ressources et la technologie des réacteurs à neutrons

rapides peut théoriquement multiplier par 50 ou plus le taux d'utilisation de l'uranium. Le thorium est trois à quatre fois plus abondant que l'uranium dans la croûte terrestre mais les quantités exploitables sont mal connues car cette ressource n'est pas utilisée actuellement.

Réserves mondiales d'énergies et production annuelle 2017 par sources d'énergie

	Réserves mondiales (en unité physique)	Réserves mondiales (en <u>Gtep</u>)	Réserves mondiales (en %)	Production annuelle (en Gtep)	Nombre d'années de production à ce rythme
Pétrole	1 734 <u>Gbbl</u>	237	21 %	4,5	50
Gaz naturel.	199 <u>Tm³</u>	179	15 %	3,6	50
Charbon	1 070 <u>Gt</u>	606	51 %	4,5	132
Total fossiles		1 022	87 %	12,6	82
Uranium	6,14 <u>Mt</u>	77	6 %	0,60	128

Thorium	6,4 Mt	80	7 %	ns	Ns
Total conventionnel		1 179	100 %	13,2	85
Hydroélectrique	8,9 PWh/an	2,0 (par an)		2,25	Ns
Énergie éolienne	39 PWh/an	8,8 (par an)		0,31	Ns
Solaire	1 070 000 PWh/an	92 000 (par an)		0,16	ns
Biomasse⁸	3×10^{21} J/an	70 (par an)		1,32 ⁹	ns

Les potentiels énergétiques présentés ci-dessus ne sont pas directement comparables : pour les énergies fossiles et nucléaires, il s'agit de ressources techniquement récupérables et économiquement exploitables, alors que pour les énergies renouvelables (sauf l'hydroélectricité et une part de la biomasse), il n'existe encore aucune estimation globale des ressources économiquement exploitables : les parcs éoliens de nouvelle génération et les fermes solaires de grande taille s'approchent de la compétitivité en coût d'investissement par rapport aux centrales à gaz ou au charbon, mais ne peuvent encore, dans la plupart des cas, être produites que si elles sont subventionnées : selon l'ADEME, « les soutiens publics restent

nécessaires pour prolonger les baisses de coût, faciliter les investissements ou compenser les défaillances de marché » ; les potentiels indiqués ici sont des potentiels théoriques basés sur des considérations uniquement techniques.

Pour le solaire, les réserves indiquées correspondent aux potentiels annuels disponibles sur toute la surface terrestre, alors que pour les autres énergies seules les réserves prouvées et économiquement exploitables sont prises en compte. Bien évidemment, seule une très petite part du potentiel solaire théorique peut être exploitée, car les terres cultivables resteront dédiées à l'agriculture, les océans seraient difficilement exploitables, et les zones proches des pôles ne sont pas économiquement exploitables.

Conventions de conversion : Pour les énergies qui sont transformées en électricité (uranium, hydraulique, éolien, solaire), la conversion en unité de base (Gtep) est réalisée en termes d'équivalent à la production. Cela correspond à la quantité de pétrole qui serait nécessaire pour produire cette énergie électrique dans une centrale thermique dont le rendement est pris, ici et dans la référence BP, comme égal à 40 %. Pour l'uranium, la conversion des réserves en tonnes-équivalent-pétrole a été réalisée sur la base d'une consommation annuelle 2018 de 47 758 tonnes d'uranium pour produire 2 096 TWh, soit 240 Mtep.

Réserves mondiales prouvées récupérables d'uranium par pays en milliers de tonnes

rang	Pays	Réserves 2007	%	Réserves 2017	%
1	 Australie	725	22,0 %	1 818	30 %
2	 Kazakhstan	378	11,5 %	842	14 %

3	 Canada	329	10,0 %	514	8 %
4	 Russie	172	5,2 %	486	8 %
5	 Namibie	176	5,3 %	442	7 %
6	 Afrique du Sud	284	8,6 %	322	5 %
7	 Chine	nd	nd	290	5 %
8	 Niger	243	7,4 %	280	5 %
9	 Brésil	157	4,8 %	277	5 %
10	 Ouzbékistan	nd	nd	139	2 %
	Total 10 premiers	2 213	67,1 %	5 410	88 %
	Total monde	3 300	100 %	6 143	100 %

L'institut allemand des sciences de la Terre et des matières premières (BGR) classe en 2017 les réserves mondiales en quatre catégories:

- réserves prouvées, techniquement et économiquement récupérables (coût : 80 à 260 \$/kg) : 3 174 kt ;

- réserves déduites ((coût < 260 \$/kg) : 3 290 kt ;
- réserves pronostiquées : 1 704 kt ;
- réserves spéculatives : 3 408 kt.

Les deux premières catégories forment les réserves découvertes : 6 465 kt. Les deux dernières forment les réserves à découvrir : 5 112 kt. Au total, les réserves ultimes (ressources) atteindraient 11 576 kt.

Réserves mondiales estimées de thorium par pays en milliers de tonnes

rang	Pays	Réserves 2014	%
1	 Inde	846	16 %
2	 Brésil	632	11 %
3	 Australie	595	10 %
4	 États-Unis	595	8 %
5	 Égypte	380	7 %
6	 Turquie	374	14 %
7	 Venezuela	300	6 %

8	 Canada	172	3 %
9	 Russie	155	3 %
10	 Afrique du Sud	148	3 %
	Total 10 premiers	4 197	66 %
	Total monde	6 355	100 %

Les énergies renouvelables sont par définition « inépuisables à l'échelle du temps humain ». L'évaluation de leur potentiel se fait donc non en termes de réserves, mais en considérant le flux énergétique potentiel que peut fournir chacune de ces sources d'énergies. Comme pour toutes les sources d'énergie, on obtient la quantité d'énergie produite en multipliant le temps de production par la puissance moyenne disponible (puissance maximale pondérée par le facteur de charge). Il est assez difficile de connaître le potentiel de chaque énergie car celui-ci varie selon les sources (voir tableau). Cependant, le potentiel théorique de l'énergie solaire peut être évalué assez facilement puisque l'on considère que la puissance maximale reçue par la terre – après passage dans l'atmosphère – est d'environ 1 kW/m^2 . On arrive alors à un potentiel énergétique solaire théorique sur un an de 1 070 000 [PWh](#). Bien entendu, la grande majorité de la surface terrestre est inutilisable pour la production d'énergie solaire, car celle-ci ne doit pas entrer en concurrence avec la photosynthèse nécessaire à la production alimentaire, depuis les échelons les plus modestes des chaînes alimentaires (phytoplancton, végétaux en général) jusqu'à l'agriculture. Les surfaces utilisables pour le solaire se limitent

aux déserts, aux toits de bâtiments et autres surfaces déjà stérilisées par l'activité humaine (routes, etc). Mais il suffirait de couvrir 0,3 % des 40 millions de km² de déserts de la planète de centrales solaires thermiques pour assurer les besoins électriques de la planète en 2009 (environ 18 000 [TWh](#)/an).

Production annuelle énergétique mondiale



Carte de la répartition de la production d'énergie dans le monde entre 1989 et 1998.

La production énergétique mondiale (énergie primaire) s'élevait selon l'Agence internationale de l'énergie à 14,28 milliards de tep en 2018 contre 6,1 Mds tep en 1973. Les énergies fossiles représentaient 81,3 % de cette production (charbon : 26,9 %, pétrole : 31,6 %, gaz naturel : 22,8 %) ; le reste de la production d'énergie provenait du nucléaire (4,9 %) et des énergies renouvelables (13,8 %, dont 9,3 % de la biomasse, 2,5 % de l'énergie hydraulique et 2 % d'autres EnR) ; la biomasse comprend le bois énergie, les déchets urbains et agricoles, les agrocarburants ; les autres EnR comprennent l'énergie éolienne, l'énergie solaire, la géothermie, etc. Cette statistique sous-évalue la part des énergies renouvelables électriques (hydroélectricité, éolien, photovoltaïque) : cf. conversion des productions électriques. Avec des conventions différentes, BP donne des estimations plus récentes:

Production énergétique mondiale commercialisée selon la source d'énergie

Énergie	Production en 2009	Production en 2019	Variation 2019/2009	Consommation 2019 en <u>Exajoules</u>	Part en 2019
<u>Pétrole</u>	81,58 Mbbl/j	95,19 Mbbl/j	+16,7 %	193,03	33,1 %
<u>Charbon</u>	7 051 Mt	8 129 Mt	+15,3 %	157,86	27,0 %
<u>Gaz naturel</u>	2 935 Gm ³	3 989 Gm ³	+35,9 %	141,45	24,2 %
<u>Hydraulique</u>	3 252 TWh	4 222 TWh	+29,8 %	37,84	6,5 %
<u>Nucléaire</u>	2 699 TWh	2 796 TWh	+3,6 %	24,92	4,3 %
<u>Éolien</u>	276 TWh	1 430 TWh	+418 %	12,74	2,2 %
<u>Solaire photovoltaïque</u>	21,0 TWh	724,1 TWh	× 34	6,45	1,1 %
<u>Géothermie, Biomasse</u>	340 TWh	652 TWh	+92 %	5,81	1,0 %
<u>e</u>					
<u>Biocarburants</u>	1 025 kbblep/	1 841 kbblep/	+80 %	4,11	0,7 %

	j	j			
Total énergie primaire	11 705 Mtep	13 865 Mtep	+18,5 %	583,9	100,0 %

Cette statistique comprend les énergies renouvelables utilisées pour la production d'électricité, mais pas celles utilisées directement pour des usages thermiques (bois, biocarburants, pompe à chaleur géothermique, chauffe-eau solaire...) ni celles qui sont auto-consommées.

Pour l'hydroélectricité, l'éolien et le solaire, la conversion en Mtep se fait en « équivalent à la production » en considérant un rendement de 38 %.

Les combustibles fossiles totalisent 83,8 % du total et les énergies renouvelables 11,0 % ; si les énergies renouvelables thermiques étaient prises en compte, la part des renouvelables serait beaucoup plus importante : ainsi, dans les statistiques mondiales de l'AIE, la catégorie « biomasse et déchets » représente 9,3 % de l'énergie primaire consommée en 2018; on peut en déduire qu'au total, les énergies renouvelables couvrent environ 20 % des besoins mondiaux en énergie.

En 2016, pour la première fois, les investissements mondiaux dans le pétrole et le gaz sont tombés au-dessous de ceux dans l'électricité ; ils ont baissé de 38 % entre 2014 et 2016 ; les investissements bas carbone dans la production et le transport d'électricité ont progressé de 6 %, atteignant 43 % des investissements totaux dans l'énergie ; les investissements dans le charbon ont chuté d'un quart en Chine ; les mises en service de centrales charbon ont baissé fortement de 20 GW au niveau mondial, et les décisions d'investissement prises en 2016 sont tombées à 40 GW seulement ; dans le nucléaire, 10 GW ont été mis en service mais seulement 3 GW ont été décidés. Les investissements dans les énergies renouvelables ont reculé de 3 %,

mais les mises en service ont progressé en cinq ans de 50 % et la production correspondante de 35 %.

Énergie hydroélectrique

Production d'énergie hydroélectrique par pays

	TWh	2009	2019	Variation 2019/2009	% en 2019
1	 Chine	615,6	1 269,7	+106 %	30,1 %
2	 Brésil	391,0	399,3	+2 %	9,5 %
3	 Canada	368,7	382,0	+4 %	9,0 %
4	 États-Unis	271,5	271,2	-0,1 %	6,4 %
5	 Russie	174,2	194,4	+12 %	4,6 %
6	 Inde	106,3	161,8	+52 %	3,8 %
7	 Norvège	125,3	125,3	0 %	3,0 %

8	 Turquie	36,0	89,2	+148 %	2,1 %
9	 Japon	70,5	73,9	+5 %	1,8 %
10	 Suède	65,4	65,7	+0,5 %	1,6 %
11	 Viêt Nam	30,0	65,6	+119 %	1,6 %
12	 Venezuela	85,8	63,3	-26 %	1,5 %
13	 France	57,0	58,5	+3 %	1,4 %
14	 Colombie	40,8	51,5	+26 %	1,2 %
	Total monde	3 252,5	4 222,2	+30 %	100 %

La production hydroélectrique varie fortement d'une année à l'autre en fonction des précipitations : ainsi, la production brésilienne a connu en 2011 un record de 428,3 TWh, suivi d'une série d'années sèches avec un minimum de 359,7 Mtep en 2015 (-16 %), malgré la mise en service de nombreux barrages dans l'intervalle ; la production des États-Unis a connu un bond de +23 % en 2011 suivi d'une chute de -13 % en 2012.

Énergie éolienne

Production d'électricité éolienne par pays (TWh)

Rank	Country	Production 2005	Production 2010	Production 2015	Production 2019	% in 2019	Variation 2019/2010	Share in mix 2019 *
1	 Chine	2,0	44,6	185,8	405,7	28,4 %	+810 %	5,4 %
2	 États-Unis	17,9	95,1	193,0	303,4	21,2 %	+219 %	6,9 %
3	 Allemagne	27,8	38,5	80,6	126,0	8,8 %	+227 %	20,4 %
4	 Inde	6,2	19,7	35,1	66,0	4,6 %	+235 %	4,1 %
5	 Royaume-Uni	2,9	10,2	40,3	64,1	4,5 %	+528 %	19,8 %
6	 Espagne	21,2	44,3	49,3	55,6	3,9 %	+26 %	20,3 %

7	 Brésil	0,1	2,2	21,6	56,0	3,9 %	+2445 %	8,9 %
8	 France	0,1	9,9	21,4	34,6	2,4 %	+249 %	6,1 %
9	 Canada	1,6	8,7	27,0	34,2	2,4 %	+293 %	5,2 %
10	 Turquie	0,1	2,9	11,7	21,8	1,5 %	+652 %	7,2 %
11	 Italie	2,3	9,1	14,8	20,2	1,4 %	+122 %	6,9 %
12	 Suède	0,9	3,5	16,3	19,8	1,4 %	+466 %	11,8 %
13	 Australie	0,9	5,1	11,5	17,7	1,2 %	+247 %	6,7 %
14	 Mexique	0,02	1,2	8,7	17,6	1,2 %	+1367 %	5,3 %
15	 Danemark	6,6	7,8	14,1	16,1	1,1 %	+106 %	55,2 %

	Total monde	104	341,4	838,5	1 430^{p.6}	100,0 %	+319 %	5,3 %
--	------------------------	------------	--------------	--------------	----------------------------	--------------------	---------------	--------------

Source : AIE et BP pour 2019 hors OCDE.

* part mix = part de l'éolien dans la production d'électricité du pays.

Le classement est fondé sur la production 2019.

Énergie solaire

Production d'électricité solaire par pays (TWh).

ran g 201 9	Pays	Productio n 2010	Productio n 2015	Productio n 2019	% en 2019	Variation 2019/201 5	part mix 2019 *
1	 Chine	0,7	44,8	223,8 ^{p.7}	30,9 %	+400 %	3,0 %
2	 États- Unis²⁰	3,9	39,0	107,3	14,8 %	+175 %	2,6 %
3	 Japon	3,5	34,8	74,1	10,2 %	+113 %	3,3 %

4	 Allemagne e	11,7	38,7	47,5	7,0 %	+23 %	7,7 %
5	 Inde	0,1	10,4	50,6	6,4 %	+387 %	3,1 %
6	 Italie	1,9	22,9	23,7	3,3 %	+3 %	8,1 %
7	 Espagne	7,2	13,9	15,0	2,1 %	+8 %	5,5 %
8	 Australie	0,4	5,0	14,8	2,0 %	+196 %	5,6 %
9	 Corée du Sud	0,8	4,0	13,0	1,8 %	+225 %	2,2 %
10	 Royaume-Uni	0,04	7,5	12,7	1,8 %	+69 %	3,9 %
11	 France	0,6	7,3	11,4	1,6 %	+56 %	2,0 %
	Total mondial	33,9	259,7	724,1^{p.z}	100,0 %	+179 %	2,7 %

Source :

AIE

* part mix = part du solaire dans la production d'électricité du pays.

Le classement est fondé sur la production 2019. Ces statistiques prennent en compte l'énergie solaire photovoltaïque et les centrales solaires thermodynamiques, qui sont incluses dans la production 2019 pour environ 12 TWh dont 4,5 TWh aux États-Unis, 5,7 TWh en Espagne, 1,55 TWh en Afrique du Sud et 0,2 TWh aux Émirats arabes unis (voir Liste des centrales solaires thermodynamiques).

Par contre, l'énergie solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage de piscines, chauffage collectif, etc.), ressource d'énergie importante en Chine, Grèce ou encore Israël n'est pas prise en compte.