

## Chapitre 5

# Consommations, Réserves et Évolutions des Ressources d'Énergie

### 5.1 Introduction

La consommation mondiale d'énergie s'accroît d'année en année et les ressources fossiles jouent un rôle irremplaçable dans la couverture des besoins énergétiques. Entre 1950 et 1990, la consommation mondiale d'énergie a quasiment quintuplé. La demande énergétique augmente régulièrement pour deux raisons. La première est liée à l'augmentation de la population mondiale. Il y a, chaque jour, presque 200 000 habitants supplémentaires sur la Terre (un peu plus de 350 000 naissances (4 par seconde) pour presque 160 000 décès). La seconde est l'augmentation du niveau de vie des pays en voie de développement qui ne peut se faire sans consommer de plus en plus d'énergie. Or, presque 2.8 milliards d'habitants vivent avec moins de 2 \$ par jour et la croissance de la demande énergétique se trouve et va surtout avoir lieu dans les pays en développement.

Ainsi, en une vingtaine d'années la Chine a augmenté sa consommation de pétrole de 190 % alors que cette augmentation n'a été que de 16 % aux États-Unis pour la même période.

La consommation mondiale d'énergie primaire est passée d'environ 1 Gtep en 1900 à 10 Gtep en 2000 (11.7 Gtep en 2006). On estime qu'elle devait être de 0.2 Gtep en 1800. L'augmentation de la consommation mondiale d'énergie est bien supérieure à celle de la population qui est passée d'environ 1 milliard d'habitants en 1800 à 6.7 milliards aujourd'hui. Entre 1900 et 2000 la population mondiale a été multipliée par environ 3.6 alors que la consommation d'énergie a été multipliée par 10. Cette différence vient de ce qu'il y a eu simultanément une augmentation de la population mondiale et un accroissement du niveau de vie d'une grande partie des habitants de la planète.

Avec une croissance énergétique comme celle que l'on connaît depuis le début du siècle,

---

d'environ 2 %/an, on devrait consommer 7 fois plus d'énergie en 2100 qu'en 2000. Cela ne peut être possible dans une civilisation utilisant majoritairement les combustibles fossiles comme c'est le cas aujourd'hui.

Depuis environ deux siècles, le monde a connu une croissance importante en exploitant des ressources énergétiques concentrées et peu chères: les combustibles fossiles. La révolution industrielle a démarré grâce au charbon et l'évolution s'est poursuivie avec le pétrole et le gaz. Ce n'est que vers le début du 20<sup>ème</sup> siècle que les combustibles fossiles ont supplanté les énergies renouvelables. Avec une énergie peu chère et abondante, l'homme a pu consacrer toute son énergie à développer des domaines qui ont eut une importance capitale pour l'accroissement du niveau de vie de la population mondiale et sur ses conditions de vie.

## 5.2 Unités de mesure

L'unité officielle, dérivée du système international (SI), pour l'énergie est le joule (J) qui correspond au travail effectué par une force d'un Newton sur un mètre. Mais, par la force de l'habitude, la plupart des statisticiens continuent à utiliser la tonne d'équivalent pétrole (tep) et plus souvent son multiple, le million de tonne d'équivalent pétrole (Mtep), le pétrole étant la source d'énergie la plus utilisée dans le monde. Cependant certains (surtout dans les pays d'Europe du Nord) prennent l'habitude d'utiliser des multiples de "unité officielle et il n'est pas rare de trouver des péta voire des yotta - qui sont des préfixes du système international d'unités - joules si l'on veut traiter des productions à l'échelle internationale.

Chaque type d'énergie possède son unité privilégiée, et c'est pour les agréger ou les comparer que l'on utilise les unités de base que sont le joule, le Mtep ou parfois le kWh, toute énergie primaire étant assez souvent convertie en électricité.

- Pétrole : tonne d'équivalent pétrole (tep).
- Gaz naturel : mètre cube, pied cube ou British thermal unit (btu).
- Charbon : tonne équivalent charbon (tec).
- Electricité : kilowatt-heure (kWh).

A titre indicatif, nous citerons la calorie qui ne fait plus partie du système international d'unité, et qui était utilisée dans le domaine thermique en tant qu'unité de chaleur.

- 1 tonne d'équivalent pétrole (tep) = 41,855 GJ, certaines organisations utilisant la valeur arrondie (par convention) à 42 GJ
  - 1 tonne équivalent charbon (tec) = 29,307 GJ
  - 1 kilowatt-heure (kWh) = 3,6 MJ
  - 1 British thermal unit (btu) = 1 054 à 1 060 J
-

- 
- 1 calorie (cal) = 4,1855 J
  
  - 1 tonne d'équivalent pétrole (tep) = 11 628 kWh
  - 1 tonne d'équivalent pétrole (tep) = 1,4286 tec
  - 1 tonne d'équivalent pétrole (tep) = 1 000 m<sup>3</sup> de gaz (équivalence conventionnelle du point de vue énergétique)
  - 1 tonne d'équivalent pétrole (tep) = 7,33 barils de pétrole (équivalence conventionnelle du point de vue énergétique)
  - 1 Mégawatt-heure (MWh) = 0,086 tep

### 5.3 De l'énergie primaire à l'énergie finale

Pour ce qui est de l'énergie, le monde actuel repose en grande partie sur les combustibles fossiles. Cela est illustré par la figure 5.3 qui montre, au niveau mondial pour l'année 2006, la répartition de l'énergie primaire entre les différentes sources d'énergie. On constate que les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) représentent 80 % de cette consommation.

---

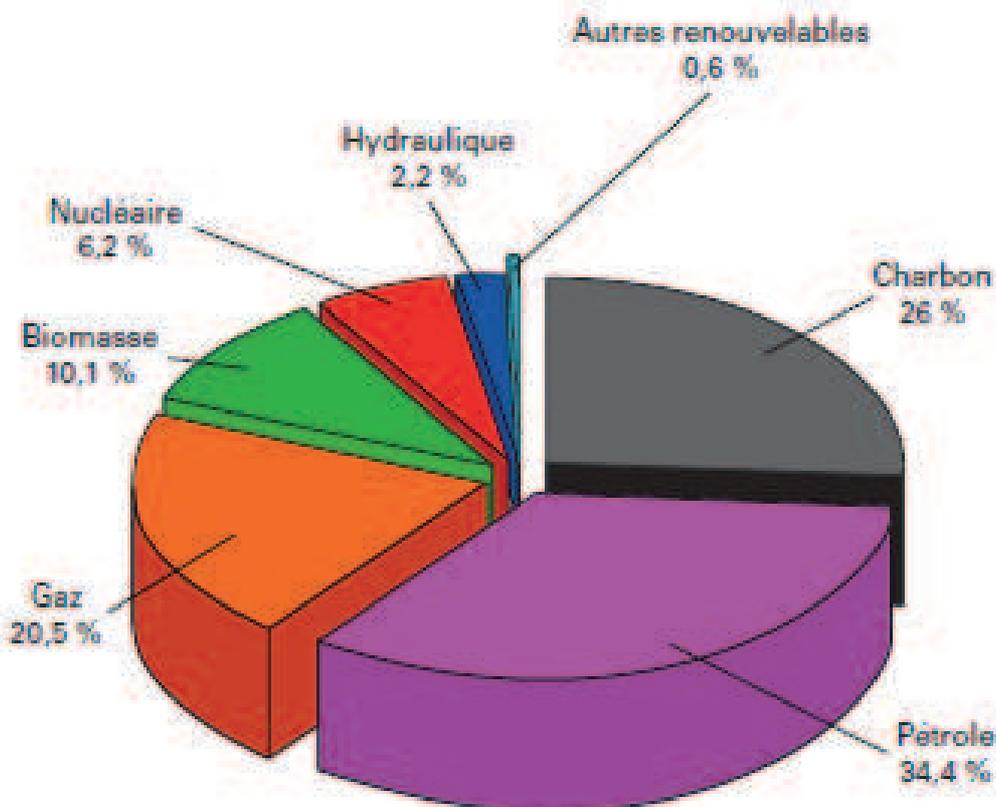


FIGURE 5.1 – Répartition de la Consommation de l'énergie

En évaluant la contribution d'une source d'énergie en tep, il y a une part d'arbitraire dont il faut prendre garde. Ainsi, au niveau de l'énergie primaire, le nucléaire contribue presque 3 fois plus que l'hydraulique (6.2 % contre 2.2 %). Or, l'hydraulique et le nucléaire, toutes deux utilisées pour générer de l'électricité, en produisent à peu près la même quantité (16 % de l'électricité mondiale est produite par l'hydraulique contre 14.8 % par le nucléaire). Ce facteur 3, au niveau de l'énergie primaire, vient de ce qu'une centrale hydraulique a un rendement de production électrique proche de 100 % alors qu'il n'est que de l'ordre du tiers pour les réacteurs nucléaires actuels.

La consommation d'énergie finale était de 8.1 Gtep en 2006 alors que la quantité d'énergie primaire consommée était de 11.7 Gtep. Cela représente une perte de 3,6 Gtep soit 30 %. La figure 5.3 montre la répartition de la consommation d'énergie finale selon les sources d'énergie.

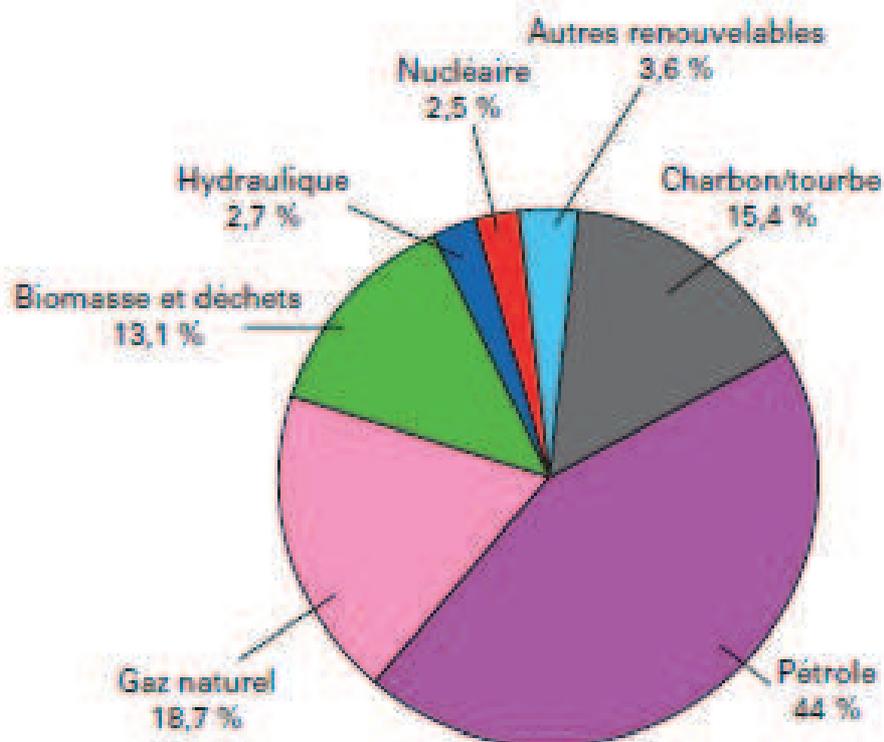


FIGURE 5.2 – Répartition de l'énergie finale mondiale en 2006 selon les sources d'énergie

L'ensemble des combustibles fossiles représente encore 78 % de l'énergie finale.

Les combustibles fossiles ont été formés il y a des centaines de millions d'années par la nature à partir de biomasse marine ou terrestre. Malheureusement, ils sont en quantités finies et seront un jour pratiquement épuisés. Cela peut être rapide si on les consomme abondamment ou plus lent si on est économe, mais, dans tous les cas, ils deviendront rares un jour. Notre civilisation reposant largement, en matière énergétique, sur de tels combustibles, il va falloir progressivement s'en passer et les remplacer par d'autres ressources. Aurons-nous fait cette transition avant qu'ils soient complètement épuisés (au sens économique du terme) ou irons-nous jusqu'à leur épuisement complet ? Nous n'avons pour le moment pas assez d'éléments pour répondre à cette question où d'autres facteurs que scientifiques et technologiques interviennent.

## 5.4 Le défi énergétique

Nous sommes confrontés aujourd'hui à un défi énergétique qui a deux volets avec des échelles de temps différentes pour répondre à deux contraintes de nature différente.

La première est la possibilité d'un changement climatique important dû à l'émission de gaz à effet de serre provenant des activités humaines. Il faut donc rapidement réduire les émissions de CO<sub>2</sub> en ayant de plus en plus recours à des sources d'énergie décarbonées, c'est-à-dire qui n'en n'émettent pas en fonctionnement. Pour le moment, ces sources se réduisent à l'énergie nucléaire et aux énergies renouvelables. Ces dernières ont aujourd'hui une contribution mineure au bilan énergétique. Une autre solution consiste en la capture et le stockage de CO<sub>2</sub> dans des installations centralisées utilisant des combustibles fossiles. Cette solution est à l'étude et quelques démonstrateurs en vraie grandeur existent mais cela restera quantitativement marginal car il faudrait, pour simplement stocker une dizaine de pour cents des émissions en surplus par rapport à ce que la nature peut absorber, être capable de construire environ 1 400 centrales de capture et de stockage de CO<sub>2</sub> d'une capacité de 1 Mt de CO<sub>2</sub>/an. Capturer et stocker quelques pour cents du CO<sub>2</sub> mondial émis à l'horizon 2050 serait déjà un succès mais c'est insuffisant pour résoudre le problème des émissions auquel nous sommes confronté à l'échelle de la planète.

La deuxième contrainte vient du fait que l'économie mondiale repose en grande partie sur les combustibles fossiles qui sont épuisables. À la fin du siècle, le pétrole et le gaz seront plus rares puis ce sera plus tard le tour du charbon. Il faut donc progressivement apprendre à se passer des combustibles fossiles mais l'échelle de temps pour le faire est plus longue que celle liée à la problématique de l'augmentation de l'effet de serre.

Compte tenu de ces deux contraintes, le défi énergétique du 21<sup>ème</sup> siècle a deux volets:

- réduire les émissions de CO<sub>2</sub>;
- remplacer progressivement les énergies fossiles par des sources d'énergie décarbonées.

Les réserves mondiales prouvées d'énergies non renouvelables (fossiles et uranium) sont estimées à 939 milliards de tonne d'équivalent pétrole (tep), soit 80 ans de production au rythme actuel. Cette durée est très variable selon le type d'énergie: 55 ans pour le pétrole, 110 ans pour le charbon.

## 5.5 Production annuelle énergétique mondiale

La production mondiale d'énergie commercialisée était en 2014, selon BP, de 13 045 Mtep, en progression de 46 % depuis 1998; elle se répartissait en 32.4 % de pétrole, 30.1 % de charbon, 24 % de gaz naturel, 4.4 % de nucléaire et 9 % d'énergies renouvelables (hydroélectricité 6.7 %, éolien 1.2 %, biomasse et géothermie 0.8 %, solaire 0.3 %). Cette statistique ne prend pas en compte les énergies auto-consommées (bois, pompes à chaleur, solaire thermique, etc).

Depuis la révolution industrielle, la consommation d'énergie n'a cessé d'augmenter. Elle a plus que doublé en quarante ans (de 1973 à 2013). En 2009, à la suite de la crise de

---

2008, elle n'avait augmenté que de 1 %. La consommation énergétique mondiale (énergie primaire) était en 2012, selon l'Agence internationale de l'énergie de 13.37 milliards de tep (6.1 en 1973), pour une production énergétique mondiale (énergie primaire) de 13.5 milliards de tep (6.2 en 1973). 81.7 % de cette production provenait de la combustion d'énergies fossiles. Le reste de la production d'énergie provenait du nucléaire (4.8 %) et des énergies renouvelables (13.5 %): bois énergie, énergie hydraulique, éolien, solaire, agro-carburants, .... Cette statistique sous-évalue la part des énergies renouvelables électriques (hydroélectricité, éolien, photovoltaïque).

Au niveau mondial, les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dues à l'énergie en 2012 sont estimées par l'AIE à 31 734 Mt, en progression de 51 % depuis 1990, dont 44 % produites par le charbon, 35 % par le pétrole et 20 % par le gaz naturel; par secteur, 47 % étaient issues de l'industrie de l'énergie, 23 % des transports, 20 % de l'industrie, 6 % des ménages et 4 % des services et de l'agriculture. Les émissions de CO<sub>2</sub> par habitant en 2012 sont estimées à 4,51 tonnes dans le monde, 16,15 tonnes aux Etats-Unis, 9,22 tonnes en Allemagne, 5,10 tonnes en France, 6,08 tonnes en Chine et 1,58 tonnes en Inde. 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.

Énergie	Production en 1998	Production en 2014	Production en 2014 en Mtep	Variation 2014/1998	Part dans la production
Pétrole	73 538 kbbl/j	88 673 kbbl/j	4 221	21 %	32,4 %
Gaz naturel	2 273 Gm <sup>3</sup>	3 461 Gm <sup>3</sup>	3 127	52 %	24,0%
Charbon	2 227 Mtep	3 933 Mtep	3 933	77 %	30,1 %
Nucléaire	2 431 TWh	2 537 TWh	574	4 %	4,4%
Hydraulique	2 607 TWh	3 885 TWh	879	49 %	6,7 %
Eolien	16 TWh	706 TWh	160	4312 %	1,2 %
Solaire photovoltaïque	0,8 TWh	186 TWh	42	23150 %	0,3 %
Géothermie, Biomasse, etc	179 TWh	509 TWh	109	184 %	0,8 %
<b>Total</b>	<b>8 958 Mtep</b>		<b>13 045</b>	<b>46%</b>	<b>100 %</b>

TABLE 5.1 – Production énergétique mondiale commercialisée selon la source d'énergie

Cette statistique comprend les énergies renouvelables utilisées pour la production d'électricité, mais pas celles utilisées directement pour des usages thermiques (bois, bio-carburants, pompe à chaleur géothermique, chauffe-eau solaire, ...) ni celles qui sont autoconsommées. 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 86,5 % du total et les énergies renouvelables 9,0 %;

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 10 % de l'énergie primaire consommée en 2012; on peut en déduire qu'au total, les énergies renouvelables couvrent environ 19 % des besoins mondiaux en énergie.

Secteur	Consommation finale 1990	Part dans la consommation	Consommation finale 2012	Variation consommation 2012/1990	Part dans la consommation
Industrie	1814	29%	2541	+40 %	28 %
Transport	1581	25%	2507	+59%	28%
Résidentiel	1533	24%	2076	+35%	23%
Tertiaire	458	7%	723	+58%	8%
Agriculture + pêche	170	3%	194	+14%	2%
Non spécifié	261	4%	130	50%	1%
Usages non énergétiques	478	8%	809	+69%	9%
<b>Total</b>	<b>6293</b>	<b>100%</b>	<b>8979</b>	<b>+43%</b>	<b>100 %</b>

TABLE 5.2 – Consommation finale d'énergie par secteur

## 5.6 Réserves

	Réserves Mondiales	Réserves Mondiales en Gtep	Réserves mondiales en %	Production annuelle en Gtep	Nombre d'années de production à ce rythme
Pétrole	1700 Gbbl	232	25%	4.2	55
Gaz naturel	187 Tm <sup>3</sup>	168	18%	3.13	54
Charbon	892 Gt	431	46%	3.93	110
Uranium	5.9 Mt	52	6%	0.56	81
Thorium	6.4 Mt	56	6%	-	-
<b>Total Conventionnel</b>		<b>939</b>	<b>100%</b>	<b>11.8</b>	<b>80</b>

TABLE 5.3 – Réserves mondiales d'énergies et production annuelle par sources d'énergie

### 5.6.1 Pétrole

Nous sommes sans doute très près d'avoir épuisé la moitié du pétrole dit conventionnel. Il en reste environ 140 Gt ce qui, au rythme de la consommation actuelle, représente une

<b>Pays</b>	<b>fin 1992</b>	<b>fin 2014</b>	<b>% du total</b>
Venezuela	63.3	298.3	17.5%
Arabie Saoudite	261.2	267.0	15.7%
Canada	39.6	172.9	10.2%
Iran	92.9	157.8	9.3%
Irak	100.0	150.0	8.8%
Russie		103.2	6.1%
Koweït	96.5	97.8	6.0%
Emirats arabes unis	98.1	97.8	5.8%
Etat-Unis	21.0	48.5	2.9%
Libye	22.8	48.4	2.8%
<b>Total des réserves prouvées</b>	<b>998.4</b>	<b>1700.1</b>	<b>100%</b>

TABLE 5.4 – Réserves prouvées de pétrole par pays en milliards de barils

quarantaine d'années. La planète va être de plus en plus dépendante du Moyen-Orient où se trouve une grande partie des réserves. Le tableau 5.4 illustre cela en montrant, par ordre décroissant, les 10 pays qui possèdent les plus grandes réserves.

Il existe aussi des pétroles non conventionnels comme les extra-lourds, les schistes bitumineux ou les sables asphaltiques. Les réserves sont considérables, mais leur extraction demande plus d'énergie que pour le pétrole traditionnel et génère plus de pollution. Il existe aussi des pétroles non conventionnels comme les extra-lourds, les schistes bitumineux ou les sables asphaltiques. Les réserves sont considérables, mais leur extraction demande plus d'énergie que pour le pétrole traditionnel et génère plus de pollution. la forte augmentation des réserves du Canada, du Vénézuéla et Etats-Unis résulte de l'intégration des réserves non conventionnelles de sable bitumineux pour les deux premiers, pétrole de schiste pour le troisième.

### 5.6.2 Gaz naturel

Les réserves de gaz naturel sont du même ordre de grandeur que celles du pétrole, mais comme on en consomme moins, elles peuvent durer plus longtemps. Notons qu'il est possible de fabriquer du pétrole à partir du gaz naturel. La Fédération de Russie et l'Iran sont les pays qui ont les plus grandes réserves comme le montre le tableau 5.5.

Pays	fin 2014	% du total
Etats-Unis	237	26,6 %
Russie	157	17,6 %
Chine	115	12,8 %
Australie	76	8,6 %
Inde	61	6,8 %
Allemagne	41	4,5 %
Ukraine	34	3,8 %
Kazakhstan	34	3,8 %
Afrique du Sud	30	3,4 %
Indonésie	28	3,1 %
<b>Total monde</b>	<b>892</b>	<b>100,0 %</b>

TABLE 5.6 – Réserves prouvées de charbon par pays (en milliards de tonnes)

Pays	fin 1992	fin 2002	fin 2014	% du total
Iran	20.7	26.7	34.0	18.2%
Russie		29.8	32.6	17.1%
Qatar	6.7	25.8	24.5	13.1%
Turkménistan		2.3	17.5	9.3%
Etats-Unis	4.7	5.3	9.8	5.2%
Arabie-Saoudite	5.2	6.6	8.3	4.4%
Emirats Arabes Unis	5.8	6.1	6.1	3.3%
Venezuela	3.7	4.2	5.6	3.0%
Nigeria	3.7	5.0	5.1	2.7%
Algérie	3.7	4.5	4.5	2.4%
<b>Total des réserves prouvées</b>	<b>11.7</b>	<b>154.9</b>	<b>187.1</b>	<b>100%</b>

TABLE 5.5 – Réserves prouvées de gaz naturel par pays (en tera m<sup>3</sup>)

### 5.6.3 Charbon

C'est le charbon qui a les réserves les plus importantes. À ce titre c'est un combustible fossile d'avenir car il sera le dernier utilisable lorsque le pétrole et le gaz seront rares. Par ailleurs, il est important de noter qu'il est et qu'il sera possible de fabriquer du pétrole à partir du charbon mais au prix d'une pollution importante. La répartition du charbon dans le monde est différente de celle des hydrocarbures et du gaz naturel comme le montre le tableau 5.6 qui indique les 10 pays possédant les plus grandes réserves.

<b>Pays Réserves</b>	<b>2007</b>	<b>%</b>	<b>Réserves 2013</b>	<b>%</b>
Australie	725	22,0 %	1 706	29%
Kazakhstan	378	11,5 %	679	12 %
Russie	172	5,2 %	506	9 %
Canada	329	10,0 %	494	8 %
Niger	243	7,4 %	405	7%
Namibie	176	5,3 %	383	6 %
Afrique du Sud	284	8,6 %	338	6 %
Brésil	157	4,8 %	276	5%
Etats-Unis	334	10,3 %	207,4	4 %
Chine	nd	nd	199	4 %
<b>Total monde</b>	<b>3 300</b>	<b>100 %</b>	<b>5 903</b>	<b>100 %</b>

TABLE 5.7 – Réserves mondiales prouvées récupérables d'uranium par pays (en milliers de tonnes)

#### 5.6.4 Énergie nucléaire

<b>Pays</b>	<b>Réserves 2014</b>	<b>100 %</b>
Inde	846	16 %
Brésil	632	11 %
Australie	595	10 %
Etats-Unis	595	8 %
Egypte	380	7 %
Turquie	374	14 %
Venezuela	300	6 %
Canada	172	3 %
Russie	155	3 %
Afrique du Sud	148	3 %
<b>Total monde</b>	<b>6 355</b>	<b>100 %</b>

TABLE 5.8 – Réserves mondiales estimées de thorium par pays (en milliers de tonnes)