

Conseil des gouverneurs Conférence générale

GOV/INF/2012/12-GC(56)/INF/6

7 septembre 2012

Distribution générale

Français

Original : anglais

Réservé à l'usage officiel

Point 6 a) de l'ordre du jour provisoire du Conseil

(GOV/2012/34)

Point 16 de l'ordre du jour provisoire de la Conférence générale

(GC(56)/1 et Add.1)

Situation internationale et perspectives de l'électronucléaire 2012

Rapport du Directeur général

Résumé

- Dans la résolution GC(55)/RES/12, la Conférence générale a prié le Secrétariat de mettre à jour en 2012 le rapport sur la situation internationale et les perspectives de l'électronucléaire (GC(54)/INF/5 publié en 2010), qui présente un aperçu général de la situation et des perspectives internationales de l'électronucléaire. Le présent rapport donne suite à cette demande.

Situation internationale et perspectives de l'électronucléaire 2012

Rapport du Directeur général

A. Faits nouveaux depuis 2010

1. Après deux années de petites baisses, la capacité électronucléaire mondiale a d'abord augmenté de 4 GWe en 2010, pour atteindre 375 GWe, puis a baissé en 2011, passant à 368 GWe, après l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi. En 2010, cinq nouveaux réacteurs ont été couplés au réseau et un a été mis à l'arrêt définitif. En 2011, sept nouveaux réacteurs ont été couplés au réseau, mais 13 ont été mis à l'arrêt définitif. Douze des 13 mises à l'arrêt étaient directement liées à l'accident de Fukushima Daiichi. Le nombre des mises en chantier de réacteurs a augmenté en 2010 pour la septième année consécutive, passant à 16, mais est tombé à 4 en 2011.

2. Globalement, l'accident de Fukushima Daiichi devrait ralentir la croissance de l'électronucléaire, mais non l'inverser. Dans la projection basse de l'Agence actualisée en 2011, la puissance électronucléaire mondiale installée augmente de 370 GWe aujourd'hui¹ à 501 GWe en 2030, soit 8 % de moins que ce qui était projeté en 2010. Dans la projection haute actualisée, la puissance nucléaire installée en 2030 atteint 746 GWe, soit une baisse de 7 % par rapport à la projection faite en 2010.

3. Dans les pays qui envisagent d'y recourir, l'électronucléaire suscite toujours un vif intérêt. Parmi les pays n'ayant pas de programme électronucléaire qui, avant l'accident de Fukushima Daiichi, avaient manifesté clairement leur intention d'en entreprendre un, quelques-uns ont annulé ou revu leurs plans, d'autres ont adopté une position d'attente mais la plupart ont poursuivi leur programme. En septembre 2011, une centrale nucléaire est entrée en service en République islamique d'Iran.

4. L'édition de 2011 du « livre rouge », *Uranium : Ressources, production et demande*, préparée par l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et par l'AIEA, estime à 5,3 Mt U les ressources classiques connues d'uranium d'un coût de 130 \$/kg U, soit une baisse de 1,4 % par rapport à l'édition de 2009. Au rythme de consommation projeté pour 2012, les 5,3 Mt U devraient durer 78 ans.

5. En décembre 2010, le Conseil des gouverneurs de l'Agence a approuvé la création d'une banque d'uranium faiblement enrichi (UFE) de l'AIEA devant être financée par des contributions volontaires de 150 millions de dollars. L'Agence a accepté l'offre du Kazakhstan d'accueillir la banque. En février 2011, l'accord entre le gouvernement russe et l'Agence en vue de créer une réserve d'uranium faiblement enrichi (UFE) à Angarsk (Fédération de Russie) est entré en vigueur. En mars 2011, le Conseil des gouverneurs a approuvé une proposition du Royaume-Uni concernant une assurance relative au combustible nucléaire, coparrainée par les États-Unis d'Amérique, la Fédération de Russie et l'Union européenne (UE). En août 2011, l'approvisionnement américain assuré en combustible est devenu disponible aux États-Unis. Il concerne 230 tonnes d'UFE enrichi à 4,95 %.

¹ 30 juin 2012.

6. En Finlande, la construction de l'installation souterraine de caractérisation des roches d'Onkalo, précurseur d'un dépôt de combustible usé, a atteint la profondeur de stockage définitif en 2010. Posiva, la société de gestion des déchets radioactifs, a l'intention de soumettre une demande de licence pour la construction du dépôt fin 2012 et de commencer le stockage définitif en 2020. La Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) a soumis une demande de licence en mars 2011 pour la construction d'un dépôt de combustible usé à Forsmark et estime que le stockage définitif pourrait commencer vers 2025. Le Conseil de l'UE a approuvé la « Directive 2011/70/Euratom du Conseil du 19 juillet 2011 établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs », qui définit des normes harmonisées pour tous les pays membres de l'UE et exige qu'ils mettent en place des programmes nationaux et fassent rapport sur les progrès réalisés à la Commission européenne (CE) en août 2015 et tous les trois ans par la suite.

7. Le progrès technologique s'est traduit en 2011 par le couplage au réseau, en Chine, du réacteur rapide expérimental chinois (CEFR) de type piscine de 65 MWth (20 MWe). En Argentine ont commencé en 2011 les travaux de terrassement du site du réacteur CAREM, prototype de petit réacteur à eau sous pression (REP) de 27 MWe, dont tous les composants du circuit primaire sont à l'intérieur de la cuve. En Afrique du Sud, les plans visant à passer à la phase de construction du réacteur modulaire à lit de boulets (PBMR) ont été stoppés en 2010 en raison, notamment, des difficultés de financement soulevées par la crise financière mondiale. Le projet reste soumis à un « plan d'entretien et de maintenance » visant à protéger la propriété intellectuelle et les biens concernés.

B. Situation actuelle de l'électronucléaire

B.1. Utilisation de l'énergie nucléaire

8. En 2011, l'énergie nucléaire a assuré 12,3 % de la production mondiale d'électricité et 5,1 % de l'énergie totale utilisée dans le monde. L'essentiel de la production d'électricité continue d'être assuré par des combustibles fossiles.

9. L'électronucléaire est utilisé pour produire de l'électricité depuis 1954, et des centrales nucléaires ont fonctionné depuis dans 33 pays². À l'heure actuelle, 30 pays exploitent 435 réacteurs ayant une capacité totale de 370 GWe³. Soixante-deux tranches supplémentaires, d'une capacité totale de 59,2 GWe, sont en construction⁴. La production électronucléaire était de 2 517 milliards de kWh d'électricité en 2011. Le secteur a aujourd'hui plus de 14 700 années-réacteur d'expérience.

10. La part de l'énergie nucléaire dans la production totale d'électricité varie considérablement par région, comme il ressort du tableau B-1. En 2011, c'est en Europe occidentale qu'elle était la plus élevée avec 25,7 %. Les parts les plus faibles étaient 1,8 % dans la région Moyen-Orient et Asie du Sud et 0 % dans la région Asie du Sud-Est et Pacifique. Au niveau mondial, la part de l'électronucléaire dans la production d'électricité a baissé, passant de 16 % en 2002 à 12,3 % en 2011.

² Afrique du Sud, Allemagne, Argentine, Arménie, Belgique, Brésil, Bulgarie, Canada, Chine, Espagne, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, Finlande, France, Hongrie, Inde, Italie, Japon, Kazakhstan, Lituanie, Mexique, Pakistan, Pays-Bas, République de Corée, République tchèque, République islamique d'Iran, Roumanie, Royaume-Uni, Slovaquie, Slovénie, Suisse, Suède et Ukraine.

³ Ces totaux comprennent 6 réacteurs à Taiwan (Chine), d'une capacité totale de 5 018 MWe.

⁴ Sauf indication contraire, toutes les statistiques sont établies au 30 juin 2012.

TABLEAU B-1. Utilisation (EJ) et part (%) des différents types d'énergie dans la production d'électricité en 2011

Région	Énergie thermique a)		Hydro		Nucléaire		Énergies renouvelables b)		Total	
	Utilisation (EJ)	%	Utilisation (EJ)	%	Utilisation (EJ)	%	Utilisation (EJ)	%	Utilisation (EJ)	%
Amérique du Nord	30,2	63,0	2,6	15,6	9,6	18,8	1,0	2,6	43,4	100
Amérique latine	5,5	39,5	2,8	57,4	0,3	2,2	0,4	0,9	9,0	100
Europe occidentale	14,4	51,3	1,9	16,8	8,7	25,7	1,1	6,3	26,1	100
Europe orientale	17,8	65,6	1,0	15,5	3,7	18,7	0,03	0,2	22,5	100
Afrique	6,1	80,9	0,4	16,5	0,1	2,0	0,06	0,5	6,6	100
Moyen-Orient et Asie du Sud	22,9	87,3	0,7	10,9	0,4	1,8	0,0	0,02	24,0	100
Asie du Sud-Est et Pacifique	7,5	88,4	0,3	9,3			0,4	2,3	8,2	100
Extrême-Orient	48,6	78,0	3,1	13,9	4,7	6,9	0,7	1,1	57,0	100
Total	152,9	68,2	12,8	17,4	27,5	12,3	3,7	2,1	196,8	100

a) La colonne « Énergie thermique » donne le total pour les combustibles solides, liquides et gazeux, la biomasse et les déchets.

b) La colonne « Énergies renouvelables » regroupe les énergies géothermique, éolienne, solaire et houlomotrice.

B.2. Technologie des réacteurs disponible

11. Environ 82 % des réacteurs commerciaux en exploitation sont des réacteurs modérés et refroidis par eau ordinaire, 11 % des réacteurs modérés et refroidis par eau lourde, 3 % des réacteurs refroidis par gaz et 3 % des réacteurs refroidis par eau et modérés par graphite. Deux réacteurs sont modérés et refroidis par métal liquide. Le tableau B-2 indique le nombre, les types et la puissance électrique nette des centrales nucléaires actuellement en service.

TABLEAU B-2. Répartition actuelle des types de réacteurs⁵

Pays	REP		REB		RRG		RELP		REOMG		RSNR		Totaux	
	Nbe	MWe	Nbe	MWe	Nbe	MWe	Nbe	MWe	Nbe	MWe	Nbe	MWe	Nbe	MWe
AFRIQUE DU SUD	2	1 830											2	1 830
ALLEMAGNE	7	9 496	2	2 572									9	12 068
ARGENTINE							2	935					2	935
ARMÉNIE	1	375											1	375
BELGIQUE	7	5 927											7	5 927
BRÉSIL	2	1 884											2	1 884
BULGARIE	2	1 906											2	1 906
CANADA							18	12 604					18	12 604
CHINE	13	10 496					2	1 300					16	11 816
ESPAGNE	6	6 057	2	1 510						1	20		8	7 567
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	69	67 368	35	34 097									104	101 465
FINLANDE	2	976	2	1 760									4	2 736
FRANCE	58	63 130											58	63 130
HONGRIE	4	1 889											4	1 889
INDE			2	300			18	4 091					20	4 391
IRAN, RÉP. ISL. D'	1	915											1	915
JAPON	24	19 284	26	24 931									50	44 215
Mexique			2	1 300									2	1 300
PAKISTAN	2	600					1	125					3	725
PAYS-BAS	1	482											1	482
RÉP. DE CORÉE	19	17 886					4	2 785					23	20 671
RÉP. TCHÈQUE	6	3 766											6	3 766
ROUMANIE							2	1 300					2	1 300
ROYAUME-UNI	1	1 191			15	8 055							16	9 246
RUSSIE	17	12 864							15	10 219	1	560	33	23 643
SLOVAQUIE	4	1 816											4	1 816
SLOVÉNIE	1	688											1	688
SUÈDE	3	2 816	7	6 509									10	9 325
SUISSE	3	1 700	2	1 563									5	3 263
UKRAINE	15	13 107											15	13 107
MONDE^a	272	250 289	84	77 720	15	8 055	47	23 140	15	10 219	2	580	435	370 003

a. Note – Les totaux mondiaux comprennent les données suivantes concernant Taiwan (Chine) : 2 REP totalisant 1 840 MWe et 4 REB totalisant 3 178 MWe, soit un total général de 6 réacteurs et 5 018 MWe.

⁵ Au 30 juin 2012. Source : AIEA (PRIS).

12. La majorité des réacteurs en service ont été conçus vers la fin des années 1960 et dans les années 1970 et ne sont plus commercialisés aujourd'hui. La puissance des modèles de réacteurs a été accrue progressivement pour tirer parti des économies d'échelle. Nombreux sont les réacteurs les plus anciens, dont l'exploitation commerciale a commencé au cours des années 1950, qui ont une puissance de 50 MWe ou moins. La puissance des réacteurs actuellement en service va de moins de 100 à 1 500 MWe. La puissance moyenne des réacteurs en service au 30 juin 2012 était de 851 MWe.

13. La technologie des réacteurs disponibles aujourd'hui repose pour l'essentiel sur des modèles antérieurs tout en tenant compte des éléments suivants : 1) durées de vie de soixante ans, 2) maintenance simplifiée – en fonctionnement ou pendant les arrêts, 3) construction plus facile et plus rapide, 4) prise en compte de la sûreté et de la fiabilité dès le début de la conception, 5) techniques modernes pour la commande numérique et l'interface homme-machine, 6) conception des systèmes de sûreté guidée par l'évaluation des risques, 7) simplicité par réduction du nombre des composants rotatifs, 8) recours accru aux systèmes passifs (gravité, circulation naturelle, pression accumulée, etc.), 9) ajout d'équipements d'atténuation des accidents graves, et 10) modèles complets et normalisés avec une procédure de pré-licence.

14. Bien que le secteur ait toujours par le passé recherché les économies d'échelle, la construction de réacteurs de faible ou moyenne puissance (RFMP) se poursuit. « Faible » signifie moins de 300 MWe. « Moyenne » signifie entre 300 et 700 MWe. Les RFMP sont conçus pour une utilisation dans des zones isolées ou dans de petits réseaux ayant des interconnexions limitées comme il en existe dans certains pays en développement, et pour des investissements de moindre ampleur afin de réduire les risques financiers. On a proposé de petits réacteurs transportables, ce qui permettrait de livrer les centrales nucléaires sous forme d'ensembles préconstruits.

B.3. Ressources humaines

15. La croissance projetée de l'électronucléaire dont il est question à la section C.4 nécessitera davantage de personnel ayant les compétences requises. Toutefois, même dans plusieurs pays ayant des centrales nucléaires en service, la formation théorique et pratique dans le domaine nucléaire a connu une désaffection et, même pour leurs réacteurs actuellement en service, de nombreux pays ont d'importantes difficultés face à la diminution attendue des effectifs. Pour les États-Unis, le *Nuclear Pipeline Survey 2011* de l'Institut de l'énergie nucléaire fait apparaître un taux potentiel de diminution de 39 % sur les cinq prochaines années, ce qui équivaut à environ 22 300 personnes. L'Observatoire européen des ressources humaines dans le secteur de l'énergie nucléaire, créé par la Commission européenne pour suivre la demande et l'offre d'experts nucléaires dans l'Union européenne, donne des chiffres similaires pour l'Europe. La publication *Nuclear Education and Training: From Concern to Capability* de l'AEN pour 2012 note que les gouvernements ont reconnu le problème et que l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France et le Royaume-Uni, entre autres, ont mené des études pour définir les besoins actuels et futurs. Dans l'ensemble, si un certain nombre d'initiatives nationales ont été lancées pour renforcer la capacité de formation, les réactions face au problème des ressources humaines ont été variables et un effort international plus cohérent reste nécessaire. En mai 2011, l'Agence a entrepris une enquête mondiale sur la main-d'œuvre dans le secteur de l'industrie électronucléaire pour obtenir des estimations précises de l'effectif actuel des personnels contribuant directement à l'exploitation des centrales nucléaires. La collecte des données a été lente, et l'enquête se poursuit en 2012 pour recueillir davantage de données.

16. Les pays qui lancent un programme électronucléaire font face à des problèmes particuliers de ressources humaines, et ils dépendront fortement des pays vendeurs pour la formation théorique et pratique du personnel de leurs premières centrales nucléaires. L'Agence peut encourager la coordination des services offerts par les vendeurs et dans le cadre d'arrangements bilatéraux et multilatéraux, et peut compléter leurs activités par des ateliers, des services d'examen, la validation et

le renforcement des programmes de formation, et une assistance pour la planification et les stratégies de mise en valeur des ressources humaines. Les États-Unis ont récemment mis à la disposition de l'Agence un outil de modélisation des ressources humaines pour l'électronucléaire pour qu'elle le partage avec les États Membres, notamment ceux qui envisagent de recourir à l'électronucléaire. Il permet de faire une estimation des besoins futurs en ressources humaines sur la base des plans nationaux. L'Agence a aussi appuyé les réseaux régionaux de formation en Asie (ANENT), en Afrique (AFRA-NEST) et en Amérique latine et aux Caraïbes (LANENT). Ceux-ci favorisent la collaboration et la mise en commun des pratiques optimales.

B.4. Cycle du combustible, déchets et déclassement

17. Le cycle du combustible est normalement divisé d'une part en activités de la partie initiale (extraction, conversion, enrichissement et fabrication du combustible) destinées à produire des assemblages combustibles pour les réacteurs, et d'autre part en activités de la partie terminale ayant trait à la gestion du combustible usé et des déchets nucléaires (y compris l'entreposage, le retraitement et le stockage définitif des déchets).

B.4.1. Partie initiale

18. La dernière édition du « livre rouge » établi par l'AEN et l'AIEA, *Uranium 2011 : Ressources, production et demande* estime à 5,3 Mt U les ressources classiques connues d'uranium d'un coût inférieur à 130 \$/kg U, soit une baisse de 1,4 % par rapport à l'édition de 2009. Pour référence, le prix au comptant de l'uranium le 24 juillet 2012 était également de 130 \$/kg U.

19. La production d'uranium en 2010, année la plus récente prise en compte dans le livre rouge, était de 54 670 t U, soit une hausse de 6 % par rapport à 2009. La production du Kazakhstan, premier producteur mondial, a augmenté de 27 %. L'Australie, le Canada et le Kazakhstan représentaient 62 % de la production mondiale. Ces trois pays et les États-Unis, la Fédération de Russie, la Namibie, le Niger et l'Ouzbékistan en représentaient 92 %. Les chiffres provisoires tendent à montrer que les valeurs définitives pour 2011, lorsqu'elles seront disponibles, seront à la hausse par rapport à 2010, avec environ 57 230 t U.

20. La consommation d'uranium par les centrales nucléaires dans le monde en 2010 était de 63 875 t U. L'Association nucléaire mondiale (WNA) a estimé que la consommation a chuté en 2011, passant à 62 552 t U, à la suite de l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi⁶, mais a prévu qu'elle reprendrait en 2012, avec 67 990 t U⁷. Au rythme de consommation projeté pour 2012, les 5,3 Mt U devraient durer 78 ans. Cela soutient avantageusement la comparaison avec les réserves d'autres matières premières (cuivre, zinc, pétrole et gaz naturel, par exemple), dont la durée varie entre 30 et 50 ans.

21. Des ressources non traditionnelles d'uranium et le thorium viennent s'ajouter aux autres ressources. Les ressources non traditionnelles comprennent notamment l'uranium potentiellement récupérable associé aux phosphates, aux minerais non ferreux, à la carbonatite, au schiste noir et au lignite, qui sont des ressources à partir desquelles l'uranium n'est récupérable qu'en tant que sous-produit mineur. Elles comprennent aussi l'uranium provenant de l'eau de mer. En 2011, seuls quelques pays (Afrique du Sud, Chili, Finlande, Jordanie, Mexique, Pérou et Suède) ont mentionné ou signalé des ressources non traditionnelles d'uranium. Les dernières estimations d'uranium

⁶ WNA – World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements, 1^{er} janvier 2012 (<http://www.world-nuclear.org/info/reactors0112.html>). Page consultée le 7 mai 2012.

⁷ WNA - World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements, avril 2012 (<http://www.world-nuclear.org/info/reactors0112.html>). Page consultée le 7 mai 2012.

potentiellement récupérable associé à des phosphates, des minerais non ferreux, de la carbonatite, du schiste noir et du lignite sont de l'ordre de 10 Mt U. Les ressources mondiales de thorium sont estimées à environ 6 millions de tonnes. Bien que le thorium ait été utilisé comme combustible à titre de démonstration, son emploi plus large dépendra de l'implantation commerciale de réacteurs au thorium, laquelle est un processus graduel.

22. Des usines commerciales de conversion d'octoxyde de triuranium (U_3O_8) en hexafluorure d'uranium (UF_6) sont en service au Canada, en Chine, aux États-Unis, en Fédération de Russie, en France et au Royaume-Uni. Des usines de conversion plus petites fonctionnent en Argentine, au Japon et au Pakistan. La capacité mondiale de conversion est restée stable avec environ 75 000 tonnes d'uranium naturel par an. La demande actuelle en services de conversion fluctue entre 59 000 et 65 000 t U par an.

23. La capacité mondiale d'enrichissement est d'environ 65 millions d'unités de travail de séparation (UTS) par an pour une demande totale d'environ 45 millions d'UTS par an. Des usines fonctionnent à l'échelle industrielle en Allemagne, en Chine, aux États-Unis, en Fédération de Russie, en France, aux Pays-Bas et au Royaume-Uni. Des installations d'enrichissement plus petites sont en service en Argentine, au Brésil, en Inde, au Japon, au Pakistan et en République islamique d'Iran.

24. Plusieurs propositions ont été faites ces dernières années pour mieux garantir un approvisionnement ininterrompu en combustible nucléaire, en particulier pour les pays qui se lancent dans l'électronucléaire. La plupart d'entre elles attribuent un rôle central à l'Agence. En décembre 2010, le Conseil des gouverneurs a approuvé la création d'une banque d'UFE de l'AIEA devant être financée par des contributions volontaires qui ont été promises et s'élèvent à 150 millions de dollars. L'Agence a accepté l'offre du Kazakhstan d'accueillir la banque et les négociations officielles sur un « accord avec l'État hôte » ont commencé en 2012. En février 2011, l'accord entre le gouvernement russe et l'Agence portant création d'une réserve d'UFE à Angarsk (Fédération de Russie) est entré en vigueur. Cette réserve contient 120 tonnes d'UFE et se trouve au Centre international d'enrichissement d'uranium. En mars 2011, le Conseil des gouverneurs a approuvé une proposition du Royaume-Uni concernant une assurance relative au combustible nucléaire, coparrainée par les États-Unis, la Fédération de Russie et l'UE. A été ainsi adopté un projet de modèle d'accord d'ACN en vertu duquel un État fournissant de l'UFE ou des services d'enrichissement peut accepter de ne pas interrompre les approvisionnements aux États acquéreurs qui respectent les obligations internationales et les prescriptions publiées en matière d'autorisation des exportations. En août 2011, l'approvisionnement américain assuré en combustible est devenu disponible aux États-Unis. Il concerne 230 tonnes d'UFE enrichi à 4,95 %.

25. La capacité mondiale de fabrication de combustible pour les réacteurs à eau ordinaire (REO), qui utilisent du combustible à l'uranium enrichi, est d'environ 13 000 t U par an (d'uranium enrichi dans les assemblages combustibles). La demande de ce type de combustible est aujourd'hui de l'ordre de 7 000 t U par an et devrait passer à approximativement 9 500 t U par an d'ici à 2020. La capacité de fabrication de combustible à l'uranium naturel pour les réacteurs à eau lourde sous pression (RELPS) est d'environ 4 000 t U par an ; la demande s'établit aux alentours de 3 000 t U par an.

26. Le recyclage, utilisant l'uranium retraité et le combustible à mélange d'oxydes (MOX), est une source d'approvisionnement secondaire en combustible nucléaire. La capacité actuelle de fabrication de combustible MOX est d'environ 250 t de métaux lourds (ML). Aujourd'hui, environ 30 REO utilisent du combustible MOX dans le monde.

B.4.2. Partie terminale

27. Certains pays considèrent le combustible usé comme un déchet à stocker au même titre que les déchets de haute activité (DHA). D'autres y voient une ressource qui peut être retraitée et réutilisée. Il existe aujourd'hui un marché pour le retraitement et la réutilisation, mais pas pour l'entreposage ou le stockage définitif.

28. Comme il n'y a actuellement aucune installation de stockage définitif en service pour les DHA, les stocks de combustible usé augmentent et une grande partie de ce combustible devra être stockée pendant des périodes plus longues que prévues initialement, pouvant dépasser 100 ans. En 2011, environ 10 500 tonnes de métaux lourds (ML) ont été déchargées comme combustible usé de tous les réacteurs nucléaires de puissance. La quantité totale cumulée de combustible usé déchargé en décembre 2011 était de 350 500 t de ML approximativement, dont 240 000 t étaient entreposées. Le reste avait été retraité. La capacité mondiale de retraitement commercial était d'environ 4 800 t de ML par an, répartie dans quatre pays, à savoir la Fédération de Russie, la France, l'Inde et le Royaume-Uni. Au Japon, la construction à Rokkasho de l'usine de retraitement commercial de 800 t ML/an était pratiquement achevée lorsque les travaux ont dû être suspendus à la suite du tremblement de terre et du tsunami du 11 mars 2011.

29. Les pays ayant le plus progressé dans le domaine des installations de stockage définitif des DHA sont la Finlande, la France et la Suède. En Finlande, la construction de l'installation souterraine de caractérisation des roches d'ONKALO, précurseur d'un dépôt de combustible usé, a atteint la profondeur de stockage définitif en 2010. Posiva, la société de gestion des déchets nucléaires, a l'intention de soumettre une demande de licence pour la construction du dépôt fin 2012 et de commencer le stockage définitif en 2020. En France, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra) a signé un contrat en janvier 2012 pour la conception de son futur dépôt géologique profond, qui devrait entrer en service en 2025 en Meuse/Haute-Marne, dans l'est du pays. La Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) a soumis une demande de licence en mars 2011 pour la construction d'un dépôt de combustible usé à Forsmark et estime que le stockage définitif pourrait commencer vers 2025.

30. Au sein de l'UE, en juillet 2011, le Conseil de l'UE a approuvé une directive sur la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs, qui définit des normes harmonisées pour tous les pays membres de l'UE et exige qu'ils mettent en place des programmes nationaux et fassent rapport à la Commission européenne (CE) en août 2015, puis tous les trois ans, sur les progrès réalisés.

31. Outre les DHA associés au combustible usé, des déchets de faible ou moyenne activité (DFMA) sont produits tout au long du cycle du combustible. Le traitement, le conditionnement et l'entreposage à long terme de ce type de déchets sont des technologies éprouvées normalement mises en œuvre dans les installations nucléaires où les déchets sont produits. Un certain nombre de pays exploitent déjà des installations de stockage définitif de DFMA à l'échelle industrielle et d'autres en construisent. Toutefois, certains pays qui exploitent des centrales nucléaires ne sont pas encore en mesure de choisir le site et de construire des installations de stockage définitif pour ce type de déchets, essentiellement parce que l'idée n'est acceptée ni sur le plan politique ni par le public.

B.4.3. Déclassement

32. Lorsque les réacteurs de puissance arrivent à la fin de leur cycle de vie, ils sont déclassés. Le déclassement consiste à les démanteler de manière contrôlée puis à gérer et stocker définitivement les déchets radioactifs qui en résultent.

33. Il existe trois options fondamentales : le démantèlement immédiat, la mise en attente sûre de longue durée suivie d'un démantèlement et la mise sous massif de protection, également appelée

stockage définitif sur site ou *in situ*. La troisième option n'est généralement retenue que pour les petites installations. Le choix entre les deux premières dépend de la disponibilité d'installations de stockage définitif et de l'incertitude concernant leur disponibilité future, de la disponibilité de fonds (parfois nulle pour les réacteurs mis à l'arrêt plus tôt que prévu ou qui n'avaient pas à accumuler de tels fonds pendant la durée de leur exploitation), des coûts prévus (qui reculent avec la baisse des niveaux de rayonnements et l'amélioration technologique), des préoccupations relatives aux emplois autour de réacteurs à l'arrêt, de l'utilisation future prévue pour le site (parfois pour de nouveaux réacteurs), des préférences des parties prenantes ainsi que des lois, règlements et stratégies de gestion du combustible usé en vigueur au niveau national.

34. En décembre 2011, 124 réacteurs de puissance étaient à l'arrêt. Seize d'entre eux avaient été entièrement démantelés, 50 étaient en cours de démantèlement, 49 étaient mis en attente sûre, trois étaient placés sous massif de protection, et pour six autres, les stratégies de déclasserment n'avaient pas été encore déterminées.

B.5. Capacité industrielle

35. Le nombre de réacteurs nucléaires de puissance en construction a culminé en 1979, où il s'établissait à 233. Il a ensuite chuté pendant la période 1995-2005, où il oscillait entre 30 et 40, mais a depuis connu une reprise ; il était de 62 au 30 juin 2012 (Fig. B-1). Les fournisseurs de combustible nucléaire se sont adaptés au déclin d'après 1980 grâce à des regroupements, en particulier en Amérique du Nord et en Europe. Inversement, les capacités de la Chine, de l'Inde et de la République de Corée se sont accrues grâce à l'adaptation aux conditions locales et devraient répondre de plus en plus aux besoins mondiaux futurs en compétences en matière de construction nucléaire. La présente section met en lumière certains faits récents en rapport avec l'expansion de la capacité nucléaire qui s'est opérée pour répondre à la croissance projetée de l'électronucléaire, comme indiqué à la section C.4.

36. Les fournisseurs d'équipements industriels lourds se trouvent en Chine, en Fédération de Russie, en France, au Japon, en République tchèque et en République de Corée. De nouvelles capacités industrielles sont mises en chantier au Japon par Japan Steel Works (JSW) et Japan Casting & Forging Corporation (JCFC), en Chine par le groupe Shanghai Electric et ses filiales, en Inde par Bharat Forge, en République de Corée par Doosan, en France par Le Creusot, en République tchèque par Plzeň et en Fédération de Russie par OMZ Izhora et ZiO-Podolsk.

37. Au Canada, le fournisseur de réacteurs Énergie atomique du Canada limitée, qui était un organisme public, a été partiellement privatisé en 2011. La branche de l'entreprise consacrée à la fourniture de réacteurs nucléaires de puissance et aux services nucléaires a été vendue au groupe d'ingénierie et de construction SNC-Lavalin puis rebaptisée Candu Énergie. L'autre branche de l'entreprise a gardé le nom de l'EACL et se concentre désormais sur la recherche-développement, la conception, l'ingénierie, la technologie spécialisée, la gestion des déchets et le déclasserment. Elle possède et gère encore les laboratoires nucléaires de Chalk River.

38. En 2011, en Chine, la Corporation nationale de la technologie de l'énergie nucléaire (SNPTC) et l'Institut de recherche et de conception en ingénierie nucléaire de Shanghai (SNERDI), en coopération avec la société Westinghouse, ont achevé l'étude de conception préliminaire du réacteur de puissance avancé chinois (CAP-1400), également appelé REP passif avancé de grande puissance. La Chine a ainsi la possibilité d'exporter ce modèle, en coopération avec Westinghouse.

39. La République de Corée met au point un réacteur de puissance avancé de 1 500 MWe exportable (APR+) ainsi qu'une version de l'APR 1400 destinée au marché européen (voir le paragraphe 86), et en Fédération de Russie, le principal fournisseur de composants de réacteurs, OMZ, double

actuellement sa capacité de production de grandes pièces forgées dans son installation Komplekt-Atom-Izhora, pour passer à trois ou quatre cuves sous pression par an.

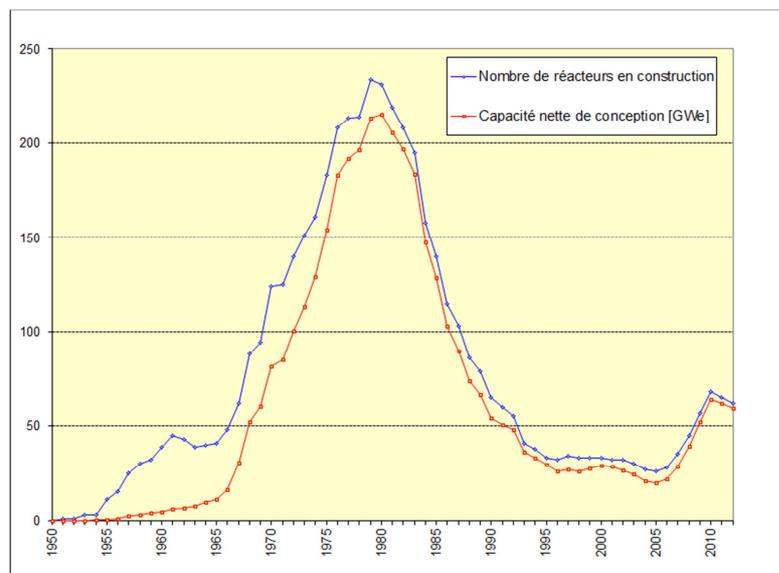


FIG. B-1. Nombre de réacteurs (et capacité totale des réacteurs) en construction de 1951 à 2010. Source : AIEA (PRIS).

C. Perspectives des applications futures de l'énergie nucléaire

C.1. Perspectives dans les pays qui utilisent déjà l'électronucléaire

40. Le tableau C-1 récapitule les informations disponibles concernant les plans d'expansion de la part de pays exploitant actuellement des centrales nucléaires, plus la Lituanie qui a 43,5 années-réacteur d'expérience d'exploitation mais qui n'a plus de réacteur en exploitation depuis l'arrêt de la tranche Ignalina 2 à la fin de 2009. Il prend en compte les présentations que les États Membres ont faites à la session 2011 de la Conférence générale et d'autres déclarations publiques concernant leurs positions.

C.2. Perspectives dans les pays qui envisagent l'option électronucléaire

41. Depuis le milieu des années 2000, les pays en développement expriment un intérêt nouveau ou renouvelé pour le nucléaire. Si l'accident de Fukushima a poussé certains pays à modifier leurs plans et d'autres à adopter une position d'attente, des pays envisageant d'adopter ou planifiant un programme électronucléaire poursuivent dans cette voie.

42. Le tableau C-2 indique le nombre de pays à différents stades de la réflexion ou de l'engagement vis-à-vis du nucléaire. Parfois appelés 'primo-accédants nucléaires', certains pays comme le Bangladesh, l'Égypte ou le Vietnam planifient en fait un programme électronucléaire depuis un certain temps. D'autres, comme la Pologne, sont en train de relancer l'option nucléaire après que leurs plans ont été contrariés au gré des changements de gouvernement ou dans l'opinion publique. D'autres encore, comme la Jordanie et l'Uruguay, envisagent d'adopter ou planifient un programme électronucléaire pour la première fois. Ce qu'ils ont en commun, c'est qu'ils envisagent tous à différents degrés d'adopter un programme électronucléaire mais n'ont pas encore effectué leur premier raccordement au réseau.

TABLEAU C-1. Position des pays ayant des centrales nucléaires en exploitation plus la Lituanie

Catégorie	Nombre de pays
Nouvelle(s) tranche(s) en construction, avec d'autres à l'étude/en projet	11
Nouvelle(s) tranche(s) en construction, mais pas de plan en prévoyant d'autres	2
Aucune tranche en construction mais des plans/propositions dans ce sens	10
Aucune tranche en construction et aucun plan en prévoyant actuellement	4
Position ferme de ne pas construire de nouvelles tranches et/ou de mettre à l'arrêt les tranches existantes	4

TABLEAU C-2. Position des pays n'ayant pas de centrale nucléaire en exploitation⁸

Description du groupe	Nombre de pays 2012	Nombre de pays 2010	Nombre de pays 2008
Pays qui considèrent l'option nucléaire pour répondre à des besoins énergétiques déterminés, avec une forte indication de l'intention de l'adopter	14	14	14
Pays qui se préparent activement pour un possible programme électronucléaire sans décision finale	6	7	7
Pays qui ont décidé d'introduire l'électronucléaire et commencé à préparer l'infrastructure appropriée	6	10	5
Pays qui ont commandé une nouvelle centrale nucléaire	3	2	0
Pays où une nouvelle centrale nucléaire est en construction	0	1	1

43. Sur les 29 pays envisageant de construire ou planifiant une centrale électronucléaire en 2012, dix se trouvent dans la région Asie et Pacifique, dix autres dans la région Afrique, sept en Europe (Europe orientale essentiellement) et deux en Amérique latine.

44. Même après l'accident de Fukushima, quelques pays ont pris des mesures concrètes d'adoption de l'électronucléaire. Dans les Émirats arabes unis, en 2011, la Société de l'énergie nucléaire ENEC a lancé des appels d'offres pour la conversion et l'enrichissement d'uranium pour le combustible de ses premiers réacteurs. En Turquie, la Société Akkuyu Nukleer Santral Elektrik Uretim a déposé des demandes pour des permis de construction et une licence de production d'électricité. Le Bélarus a signé un contrat avec la Fédération de Russie pour la construction de deux réacteurs, et le Bangladesh a signé un accord intergouvernemental avec la Fédération de Russie aussi pour deux réacteurs. Le Vietnam a signé un accord de prêt avec la Fédération de Russie pour financer sa première centrale nucléaire et a annoncé son intention de passer un accord similaire avec le Japon.

⁸ Deux autres groupes étaient inclus dans les éditions précédentes mais ne le sont plus dans la présente car ils n'étaient pas significatifs en ce qui concerne les attentes croissantes que l'énergie nucléaire suscite parmi les pays en développement. Un groupe comprenait les pays ne prévoyant pas l'adoption d'un programme nucléaire mais intéressés par l'examen des questions qui en découlent ; mais il s'est avéré difficile d'identifier des tendances, d'autant que les nombres fluctuaient considérablement d'une année à l'autre. L'autre groupe comprenait les pays dans lesquels un appel d'offres avait été préparé pour la livraison d'une centrale nucléaire ; mais cela posait des problèmes en raison des pays choisissant de passer commande de centrales moyennant des accords bilatéraux directs plutôt que des appels d'offres.

45. La République islamique d’Iran a commencé à mettre en service sa première centrale nucléaire, à Bushehr en septembre 2011, ce qui constitue la mise en service depuis 15 ans d’une première centrale dans un pays primo-accédant.

46. Le rythme d’adhésion au groupe des pays exploitant des centrales nucléaires a été relativement stable jusqu’au début des années 1980, comme l’indique la figure C-1. Jusqu’à ce que la République islamique d’Iran ne le fasse en 2011, trois pays seulement avaient raccordé leur première centrale nucléaire au réseau dans la période après Tchernobyl – la Chine, le Mexique et la Roumanie. Les pays qui envisagent maintenant de se doter de leur première centrale nucléaire le font après un déficit d’expérience de 15 ans. Parmi les pays envisageant de construire ou planifiant leur première centrale nucléaire, neuf se sont clairement fixé comme objectif que celle-ci entrera en service avant 2030.

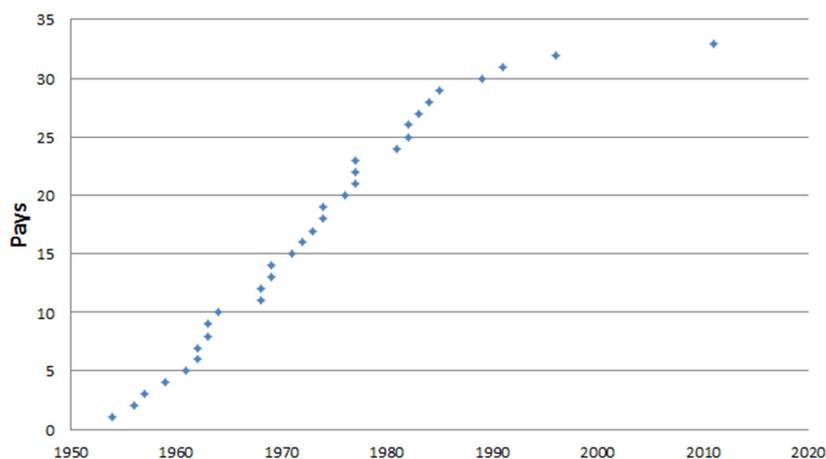


FIG. C-1. Nombre de pays exploitant, ou ayant exploité, des centrales nucléaires Source : (PRIS) AIEA

47. Dans l’ensemble, les données des tableaux C-1 et C-2 sont conformes aux tendances reflétées dans les projections basses et hautes de l’Agence exposées ci-après : un degré important d’incertitude subsiste dans les projections sur le nucléaire et, d’après les prévisions, le recours accru au nucléaire proviendra davantage d’une expansion dans les pays déjà dotés d’un programme nucléaire que du démarrage d’un programme par les pays nouveaux accédants. Les neuf pays qui se sont clairement fixé comme objectif que leur première centrale entrera en service avant 2030 se situent dans la fourchette des sept pays, selon la projection basse de l’Agence, qui raccorderont leur première centrale au réseau d’ici à 2030 et des 16 pays qui le feront selon la projection haute.

C.3. Facteurs potentiels en faveur de l’option nucléaire

48. L’accident nucléaire de Fukushima Daiichi n’a pas eu d’incidence sur les principaux facteurs à l’origine de l’intérêt croissant suscité par l’électronucléaire depuis 2005 environ et la hausse du nombre de mises en chantier indiquée à la figure B-1 : augmentation de la demande d’énergie, notamment d’électricité ; instabilité des prix des combustibles fossiles ; pressions en matière d’environnement et préoccupations relatives à la sécurité énergétique.

C.3.1. Demande

49. La demande mondiale d’énergie et d’électricité devrait s’accroître lors des décennies à venir. Aucune évaluation énergétique crédible à court ou long terme n’indique le contraire. En raison de la croissance démographique mondiale et des aspirations au développement des actuels pays en développement, où une grande partie de la population n’a toujours pas accès à l’électricité, la demande

d'électricité augmente même plus rapidement que la demande d'énergie primaire totale. Toutes les études s'accordent sur le fait que la demande augmentera principalement dans les pays en développement.

50. Selon la variante moyenne des dernières estimations démographiques de l'ONU, la population mondiale augmentera d'un milliard et demi de personnes d'ici 2030 et d'un milliard supplémentaire d'ici 2050, pour s'établir à environ 9,3 milliards de personnes⁹. La Banque mondiale estime que l'économie mondiale enregistrera en moyenne une croissance annuelle de 3,1 % jusqu'en 2015 et de 2,5 % entre 2015 et 2030¹⁰. C'est dans les pays en développement que la croissance sera la plus rapide. Sur la base de ces deux principaux facteurs de la demande énergétique, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'OCDE prévoit une augmentation de la demande d'électricité, de 21 300 TWh en 2010 à entre 30 390 et 35 470 TWh d'ici 2030 en fonction des politiques environnementales. La croissance aurait lieu à 80 % dans les pays non membres de l'OCDE. L'analyse des résultats pour 2050 indique une hausse de la demande d'électricité située entre 37 660 et 46 190 TWh¹¹.

C.3.2. Prix des combustibles fossiles et économie

51. L'instabilité des prix des combustibles fossiles sur les marchés internationaux à des niveaux très élevés reste une préoccupation majeure tant dans les pays développés que dans les pays en développement. Dans de nombreux pays en développement tributaires des importations d'énergie, les prix élevés des importations de combustible épuisent les recettes d'exportation limitées et entravent le développement économique. Au vu de la croissance de la demande énergétique mondiale et de la réticence des grands producteurs à accélérer les investissements dans les capacités de prospection et de production supplémentaires, due en partie à la précarité économique, il est peu probable que les niveaux de prix élevés des combustibles fossiles au niveau mondial diminuent prochainement.

52. Cependant, la récente commercialisation d'importants volumes de gaz de schiste aux États-Unis a inversé la tendance à la hausse des prix du gaz naturel et mis à mal l'hypothèse selon laquelle les ressources fossiles non traditionnelles étaient nécessairement plus chères que les ressources fossiles traditionnelles. On trouve de nombreux gisements de schiste dans diverses régions du monde, mais leur contenu en gaz varie considérablement, ce qui rend les estimations de la disponibilité de gaz de schiste à des fins commerciales hautement incertaines. Il existe aussi des incertitudes quant à l'acceptation du gaz de schiste par le public en raison des préoccupations écologiques et sanitaires que soulève l'extraction par fracturation hydraulique. En outre, comme indiqué à la section C.3.3, l'utilisation du gaz de schiste génère des émissions de dioxyde de carbone, et le gaz de schiste qui s'échappe dans l'atmosphère constitue un gaz à effet de serre (GES) direct encore plus puissant.

53. Le développement économique suppose un approvisionnement fiable et abordable en électricité en charge de base. Avec l'électronucléaire, les coûts du combustible ne représentent que quelques pour cent des coûts de l'électricité, ce qui n'est pas le cas avec la production d'électricité d'origine fossile. La multiplication par deux ou par trois des prix de l'uranium ne correspond donc qu'à une hausse de 4 à 6 % des coûts de production. En revanche, dans la production d'électricité d'origine fossile, la multiplication par deux des coûts de combustible provoque une hausse des coûts de production totaux

⁹ UNDESA (Département des affaires économiques et sociales de l'ONU). 2010. Perspectives de la population mondiale. La Révision de 2010. Disponible [en ligne] à l'adresse <http://esa.un.org/unpd/wpp/index.htm>.

¹⁰ Banque mondiale. 2009. Perspectives économiques mondiales : Un tournant décisif pour les produits de base. Disponible [en ligne] à l'adresse http://siteresources.worldbank.org/INTGEP2009/Resources/10363_WebPDF-w47.pdf.

¹¹ Agence internationale de l'énergie (AIE). 2010. Perspectives des technologies de l'énergie : Scénarios et stratégies à l'horizon 2050. Disponible [en ligne] à l'adresse <http://titania.sourceoecd.org/vl=13668216/cl=27/nw=1/rpsv/~6673/v2010n11/s1/p1>.

de 40 à 70 %. L'instabilité des prix est donc plus préoccupante avec la production d'électricité d'origine fossile.

C.3.3. Environnement

54. Sur un cycle de vie, l'électronucléaire n'émet que quelques grammes de GES par kWh. Le cycle de vie complet comprend l'extraction, le traitement, la conversion et l'enrichissement d'uranium, la fabrication de combustible, la construction et l'exploitation de centrales nucléaires, le retraitement et le conditionnement du combustible usé, l'entreposage provisoire de déchets radioactifs et la construction d'installations de stockage définitif. Les émissions générées par la filière de production d'électricité nucléaire sur un cycle de vie sont comparables à celles générées par les meilleures filières d'énergies renouvelables et inférieures d'un ordre de grandeur au moins à celles générées par les filières de combustibles fossiles, comme le montre la figure C-2. D'une manière générale, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a estimé que l'électronucléaire avait le plus grand potentiel de réduction des GES au moindre coût dans le secteur énergétique (GIEC, 2007)¹².

55. L'électronucléaire suscite un intérêt croissant notamment en raison des très faibles émissions de GES qu'il génère et du grand potentiel qu'il offre en termes de réduction des émissions de GES du secteur énergétique. Toutefois, si aucun nouvel accord international sur l'environnement global, contraignant et à long terme ne remplace le Protocole de Kyoto, qui a été prorogé en décembre 2011 jusqu'en 2017 au moins, les faibles émissions de GES de l'électronucléaire ne pourront peut-être pas profiter, sur le plan financier, à toutes les personnes qui investissent dans de nouvelles centrales nucléaires.

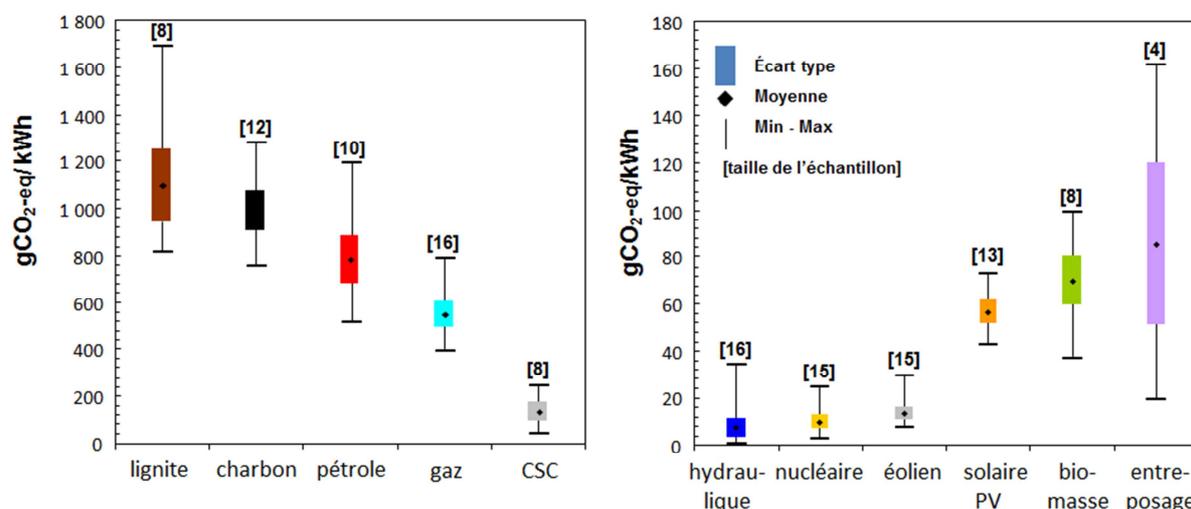


FIG. C-2. Émissions de GES des différentes options de production d'électricité sur un cycle de vie. Note : l'échelle utilisée à droite est inférieure d'un ordre de grandeur à celle utilisée à gauche.

56. Outre ses très faibles émissions de GES, l'électronucléaire se caractérise par le fait qu'il n'émet, lors de l'exploitation, aucun gaz nocif créant des polluants atmosphériques comme des oxydes d'azote (NOx), du dioxyde de soufre (SO₂) et des émissions de particules qui nuisent à la santé humaine et sont à l'origine de la mauvaise qualité de l'air dans les villes et de l'acidification régionale.

¹² GIEC. 2007. Bilan 2007 des changements climatiques : Atténuation du changement climatique. Contribution du Groupe de travail III au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni) et New York (États-Unis).

C.3.4. Sécurité énergétique

57. La technologie, la diversification des sources de combustible et d'énergie et l'entreposage stratégique sont depuis longtemps les principaux piliers de la sécurité énergétique. L'électronucléaire renforce la sécurité des approvisionnements lorsqu'il fait partie du bouquet énergétique d'un pays, et l'expansion du nucléaire permettrait, dans la plupart des pays, d'accroître la diversité dans le secteur de l'électricité.

58. Les ressources d'uranium sont à la fois nombreuses et diversifiées sur le plan géographique, comme indiqué à la section B.4. Les ressources d'uranium traditionnelles répertoriées dont le coût de récupération est inférieur à 130 \$/kg U suffisent pour environ 78 ans au rythme de consommation estimé pour 2012. Les ressources dont le coût est plus élevé et relevant d'autres catégories, telles les « ressources pronostiquées et spéculatives », viennent s'ajouter aux ressources estimées. Le retraitement, le recyclage et le déploiement de la technologie de surgénérateurs à neutrons rapides augmenteraient d'un facteur de 60 à 70 la longévité de toutes les catégories de ressources.

59. La densité énergétique du combustible nucléaire est bien plus élevée que celle des combustibles fossiles ; les quantités de combustible nécessaires sont donc plus faibles, ce qui facilite la constitution de stocks stratégiques. Dans la pratique, la tendance de ces dernières années se caractérise par l'abandon progressif des stocks stratégiques au profit d'une sécurité de l'approvisionnement basée sur un marché efficace pour l'uranium et les services d'approvisionnement en combustible. Toutefois, pour les pays qui jugent important d'établir, à un coût relativement faible, des stocks stratégiques, cette option reste disponible.

60. La longue vie utile des centrales nucléaires et la stabilité de leurs coûts de production d'électricité en charge de base sont d'autres aspects de la sécurité énergétique.

C.4. Projections de la croissance électronucléaire

61. Chaque année, l'Agence publie deux projections actualisées, une basse et une haute, de la croissance mondiale de l'électronucléaire. La projection 2011 actualisée tient compte des effets de l'accident de Fukushima Daiichi. Dans la projection basse actualisée, la puissance électronucléaire mondiale installée augmente de 370 GWe aujourd'hui¹³ à 501 GWe en 2030, soit 8 % de moins que ce qui était projeté en 2010. Dans la projection haute actualisée, la puissance nucléaire installée en 2030 atteint 746 GWe, soit une baisse de 7 % par rapport à la projection faite en 2010. Il ressort du tableau C-3 que c'est en Extrême-Orient que la croissance projetée est la plus forte. Les autres régions ayant d'importants programmes électronucléaires sont l'Europe orientale et le Moyen-Orient et Asie du Sud.

¹³ 30 juin 2012.

TABLEAU C-3. Estimations de la capacité de production d'électricité d'origine nucléaire

Région	2010	2020		2030		2050	
		Basse	Haute	Basse	Haute	Basse	Haute
Amérique du Nord	113,8	119	126	111	149	120	200
Amérique latine	4,1	6,4	6,4	9	18	15	60
Europe occidentale	122,9	93	126	83	141	60	170
Europe orientale	47,4	66	80	82	108	80	140
Afrique	1,8	1,8	1,8	5	16	10	48
Moyen-Orient et Asie du Sud	4,6	13	22	30	53	50	140
Asie du Sud-Est et Pacifique	0	0	0	0	6	5	20
Extrême-Orient	80,6	130	164	180	255	220	450
Total mondial	375,3	429	525	501	746	560	1 228

62. La figure C-3 compare les projections de l'Agence avec celles de l'AIE de l'OCDE et de la WNA. La projection basse de l'AIEA, le « scénario politiques actuelles » de l'AIE et le scénario de référence de la WNA adoptent tous des hypothèses de statu quo et produisent tous des résultats comparables. Les scénarios de projection haute de ces organismes sont aussi comparables, de même que les scénarios de projection basse de l'AIE et la WNA.

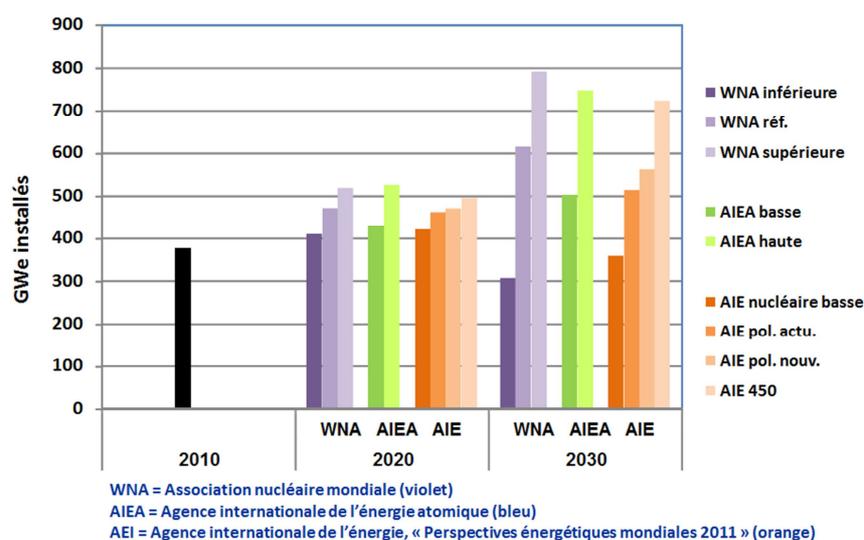


FIG. C-3. Comparaison des projections concernant l'électronucléaire de l'AIEA (bleu), de la WNA (violet)¹⁴ et de l'AIE (orange)¹⁵ « 450 » désigne un scénario dans lequel la concentration atmosphérique des GES est limitée à 450 parties par million.

63. L'Évaluation énergétique mondiale (GEA), présentée par l'Institut international d'analyse systémique appliquée, coordonnateur de l'évaluation, lors de la Conférence des Nations Unies sur le développement durable en juin 2012 (Rio+20), contient aussi divers scénarios dans le domaine énergétique, lesquels incluent l'électronucléaire. Les scénarios de la GEA reposent sur un seul scénario de développement économique, mais sur trois groupes de transformation des systèmes

¹⁴ The Global Nuclear Fuel Market: Supply and Demand 2011-2030, WNA, London (2011).

¹⁵ AIE, Perspectives énergétiques mondiales (2011), Paris (2011).

énergétiques. Le groupe GEA-S (approvisionnement) fait augmenter rapidement toutes les options concernant l’approvisionnement. Le groupe GEA-E (efficacité) met l’accent sur les gains d’efficacité dans l’ensemble du système énergétique et sur les solutions, y compris les changements du mode de vie, pour limiter la demande d’énergie. Le groupe GEA-M (mélange) est une combinaison des groupes GEA-S et GEA-E. Au sein de ces groupes, la GEA a élaboré 60 voies différentes qui correspondent à des analyses de sensibilité multiples. La figure C-4 indique l’évolution de l’électronucléaire dans le temps pour les trois groupes. La plupart des analyses de la GEA avaient été achevées avant l’accident de Fukushima Daiichi, et les limites inférieures de la capacité nucléaire résultent d’analyses de sensibilité qui excluent délibérément l’électronucléaire pour 2100. Toutefois, les trajectoires nucléaires basses ont aussi été interprétées comme des conséquences possibles de l’accident.

C.5. Applications non électriques

64. Les applications non électriques comprennent la production d’hydrogène pour, premièrement, améliorer les ressources pétrolières de faible qualité, comme les sables bitumineux, tout en compensant les émissions de carbone associées au reformage du méthane à la vapeur, deuxièmement, appuyer la production à grande échelle de combustibles liquides synthétiques à partir de la biomasse, du charbon ou d’autres sources de carbone, et, troisièmement, servir directement de combustible pour véhicules, le plus probablement des véhicules utilitaires légers hybrides rechargeables à pile à hydrogène. L’énergie nucléaire peut aussi être utilisée dans l’industrie pétrolière pour extraire le bitume par drainage par gravité au moyen de vapeur ou distillation de schistes bitumineux.

65. La figure C-5 illustre les avantages de la cogénération d’électricité et de chaleur, et elle est en principe valable pour d’autres applications non électriques comme le dessalement de l’eau de mer et la production d’hydrogène. Il y a actuellement 79 réacteurs fonctionnant en mode cogénération, et le potentiel d’application élargie de la technologie semble prometteur. Plus la construction de centrales nucléaires et d’autres installations industrielles et autres voisines peut être coordonnée de façon que ces autres installations utilisent la chaleur produite par les centrales nucléaires, plus la centrale nucléaire est utile et rentable. En outre, là où l’eau de mer est abondante et l’eau douce rare, le dessalement de l’eau de mer peut fournir à la fois de l’eau potable et de l’eau industrielle à un coût intéressant pour la centrale nucléaire elle-même.

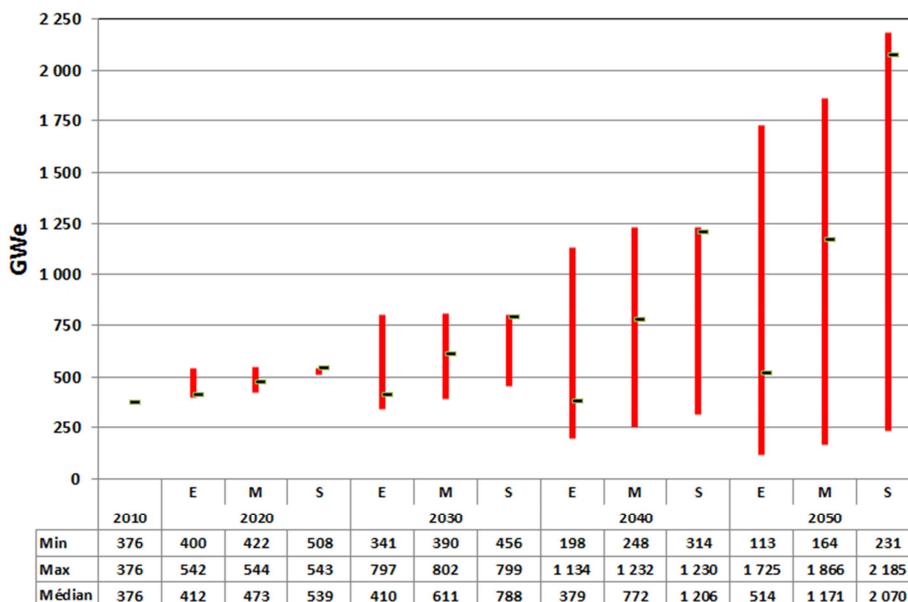


FIG. C-4. Évolution de l’électronucléaire selon les groupes GEA-S, GEA-E et GEA-M (source : GEA, 2012).

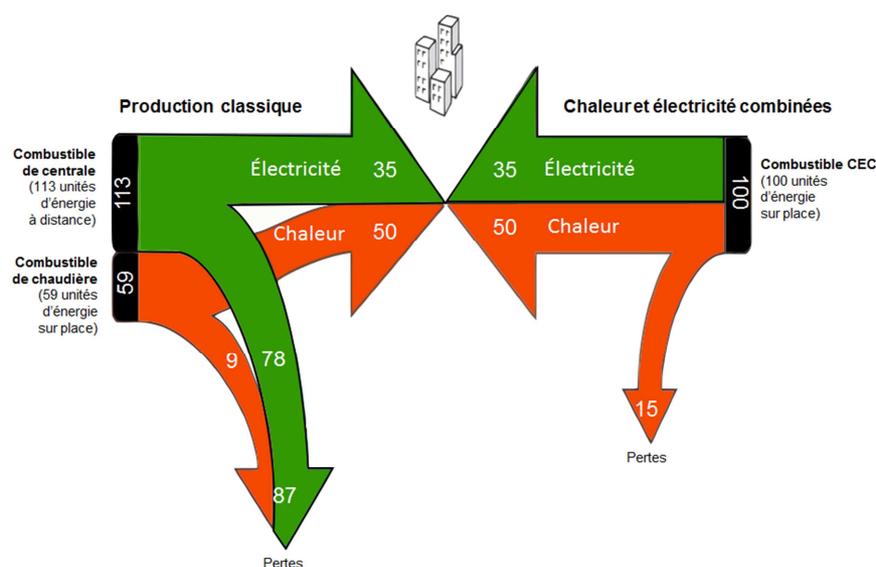


FIG. C-5. Économies d'énergie primaire dues à la cogénération par comparaison avec une production distincte classique d'énergie.

D. Enjeux d'une expansion du nucléaire

D.1. Financement

66. Par rapport notamment aux centrales au gaz naturel, la construction des centrales nucléaires coûte relativement cher, mais leur exploitation est relativement bon marché. Elles partagent cette structure des coûts concentrés en début de période avec d'autres technologies à faible émission de carbone telles que l'hydroélectrique, l'énergie éolienne et l'énergie solaire.

67. Les grosses dépenses d'investissement en amont qu'exige l'électronucléaire, ses longs délais de planification, d'autorisation et de construction et le fait que ses coûts réagissent fortement aux taux d'intérêt sont autant de défis en matière de financement. Il s'avère donc que l'électronucléaire est un investissement plus attrayant si le financement est disponible et peut attendre pour des rendements à plus long terme (ce qui est plus caractéristique du secteur public que du secteur privé) et là où les risques financiers sont moindres en raison d'une demande et de prix de l'électricité plus prévisibles, de structure du marché stables et d'un appui politique solide.

68. C'est en partie pour ces raisons que la plupart des 62 réacteurs en construction dans le monde sont financés directement par des entreprises publiques bénéficiant d'un fort soutien gouvernemental, de l'accès aux ressources, de taux d'emprunt favorables et d'une plus grande facilité d'accès au marché du crédit international. Entrent aussi en ligne de compte les pays où le développement actuel et prévu de l'électronucléaire est centralisé, à savoir la Chine, la Fédération de Russie, l'Inde et la République de Corée.

69. Les grandes entreprises privées affichant des bilans solides participent à la construction et au financement d'un nombre plus restreint de nouveaux réacteurs, habituellement dans le cadre de partenariats en coalition. Les projets Olkiluoto 3 et Fennovoima en Finlande sont des exemples de modèles coopératifs, combinant le financement public et privé, avec la propriété et le financement

partagés entre les municipalités, les entreprises locales de distribution d'énergie, les consommateurs industriels d'électricité et les partenaires stratégiques.

70. L'évolution de la situation au Royaume-Uni et aux États-Unis traduit l'importance que la prévisibilité et la stabilité représentent pour les investisseurs privés. La plupart des nouveaux réacteurs aux États-Unis ont été proposés dans des États où le marché de l'électricité est régulé, où certains coûts peuvent être facturés aux clients de l'entreprise d'électricité même pendant la construction et où la réglementation accroît la prévisibilité des prix de l'électricité. Pour accroître l'investissement privé dans l'électronucléaire au Royaume-Uni, les investisseurs étudient des mécanismes tels que les « contrats de différence » (CFD), et le gouvernement propose une législation, les deux visant à accroître la prévisibilité des prix.

71. Pour les pays qui démarrent un programme électronucléaire, les sources de financement se trouvent en partie ou entièrement dans les pays fournisseurs des centrales nucléaires. Les quatre nouveaux réacteurs des Émirats arabes unis sont financés par leur gouvernement et par un consortium coréen dirigé par la Compagnie d'électricité de Corée. En Turquie, la société exécutant le projet est entre les mains à la fois de la Turquie et de la Fédération de Russie, tandis que les coûts de construction, d'exploitation et de déclasserement seront entièrement financés par la partie russe. Au Bangladesh, au Bélarus et au Vietnam, des accords précisent également que le gros du financement proviendra de la Fédération de Russie.

72. Aucune des projections indiquées dans la figure C-3 de la section C.4 ne prévoit que l'électronucléaire ne se développera beaucoup plus vite que le reste du secteur électrique dans son ensemble, de sorte que les besoins en investissement ne seront pas démesurés par rapport à l'ensemble du secteur. Les difficultés rencontrées pour renforcer les arrangements financiers actuels dans les foyers d'expansion comme la Chine, la Fédération de Russie, l'Inde et la République de Corée seront vraisemblablement moins nombreuses que celles rencontrées pour assurer la prévisibilité de la demande et des prix de l'électricité et pour mobiliser un soutien politique fort, ce qui est important dans d'autres pays pour encourager l'investissement privé.

D.2. Sûreté et fiabilité

73. Depuis mars 2011, le débat sur la sûreté des centrales nucléaires a été dominé par la nécessité de recenser et d'appliquer les enseignements tirés de l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi.

74. La Conférence ministérielle de l'AIEA sur la sûreté nucléaire a été organisée en juin 2011 pour discuter d'une première évaluation de l'accident de Fukushima, examiner les enseignements à en tirer, faciliter le lancement d'un processus de consolidation de la sûreté nucléaire dans le monde et étudier les moyens de renforcer encore les interventions en cas d'accidents et de situations d'urgence nucléaires. De nombreux États Membres ont procédé à des examens dans le cadre d'évaluations nationales de la sûreté (souvent appelées « tests de résistance ») et se sont engagés à achever rapidement les évaluations restantes et à mettre en œuvre les mesures correctives nécessaires.

75. Le premier enseignement tiré de l'accident a été que les responsables de la réglementation et les exploitants des centrales nucléaires du monde entier devaient examiner et renforcer, si besoin est : a) les mesures de protection contre les risques extrêmes comme les tsunamis ; b) les capacités d'énergie de secours et de refroidissement en cas d'accident grave ; c) les préparatifs pour gérer les accidents graves ; et d) les bases de conception des centrales, à savoir les hypothèses quant à un ensemble prédéterminé d'accidents à prendre en compte.

76. Bien qu'il y ait encore des leçons à tirer de l'accident, des plans d'action prenant en compte les premiers enseignements tirés ont été élaborés tant au niveau national qu'international. Le plan d'action de l'AIEA¹⁶ sur la sûreté nucléaire définit un programme de travail pour renforcer le cadre mondial dans ce domaine. Adopté par la Conférence générale en septembre 2011, il définit 12 actions principales.

77. Sur le plan opérationnel, le niveau de sûreté des centrales nucléaires à travers le monde reste élevé, comme le montrent les indicateurs de sûreté recueillis par l'AIEA et l'Association mondiale des exploitants nucléaires. La figure C-6 montre le nombre total d'arrêts non programmés de réacteurs de puissance, qu'ils soient automatiques ou manuels, pour 7 000 heures de fonctionnement en régime critique. Cet indicateur suit les opérations visant à réduire le nombre de mises à l'arrêt totales non programmées des réacteurs et est couramment utilisé pour indiquer les progrès accomplis dans l'amélioration de la sûreté de la centrale. Comme le montre la figure C-6, des améliorations importantes, bien que pas aussi marquantes que celles réalisées dans les années 90, ont été apportées ces dix dernières années. Toutefois, l'écart entre les meilleurs résultats et les moins bons reste important, offrant des possibilités d'amélioration continue. L'accroissement entre 2010 et 2011 est lié au nombre élevé d'arrêts non programmés déclenchés par le séisme de mars 2011 au Japon.

D.3. Perception du public

78. L'acceptation du nucléaire par le public dans différents pays et zones d'implantation de centrales reflète la perception relative des avantages et des risques. À la suite de l'accident de Fukushima, de nombreux sondages d'opinion publique ont été menés, dont deux grands qui posaient aux personnes interrogées dans plusieurs pays des questions similaires, à savoir si elles étaient pour ou contre le nucléaire¹⁷ ou si elles considéraient le nucléaire de manière positive ou non¹⁸. Les pourcentages d'opinions favorables différaient considérablement d'un pays ou d'une région à l'autre, allant du rejet quasi total du nucléaire dans certains pays à des baisses brutales des opinions favorables suivies de remontées au niveau d'avant Fukushima dans d'autres pays¹⁹. Dans de nombreux pays ayant des réacteurs en exploitation, les sondages ont par ailleurs révélé des différences d'opinion en ce qui concerne les réacteurs, favorables s'agissant des réacteurs existants, mais moins favorables s'agissant des nouveaux réacteurs.

¹⁶ <http://www.iaea.org/newscenter/focus/actionplan/>

¹⁷ IPSOS (Institut de recherche sociale Ipsos). 2011. Forte opposition mondiale au nucléaire. [En ligne] <http://www.ipsos-mori.com/researchpublications/researcharchive/2817/Strong-global-opposition-towards-nuclear-power.aspx>

¹⁸ Gallup. 2011. Impact du séisme japonais sur les opinions sur le nucléaire : résultats d'un sondage instantané Gallup réalisé dans 47 pays par WIN-Gallup International. [En ligne] http://www.nrc.co.jp/report/pdf/110420_2.pdf. [Page consultée le 26 avril 2012]

¹⁹ IPSOS (Institut de recherche sociale Ipsos). 2012. Après Fukushima ; sondage d'opinion mondial sur la politique énergétique. [En ligne] <http://www.ipsos.com/public-affairs/sites/www.ipsos.com/public-affairs/files/Energy%20Article.pdf>

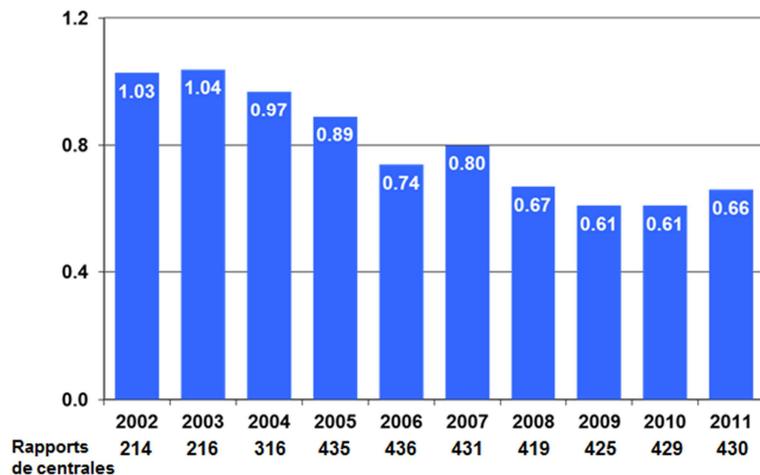


FIG. C-6. Nombre total d'arrêts non programmés de réacteurs de puissance, qu'ils soient automatiques ou manuels, recensés pour 7 000 heures de fonctionnement en régime critique. Source : AIEA (PRIS).

79. Les résultats des sondages montrent bien qu'il importe d'encourager l'accès à des informations transparentes sur les conséquences de l'accident, sur les plans de préparation en cas d'accidents futurs et sur tous les risques et les avantages que présentent le nucléaire et les autres sources d'énergie. Il importe aussi de bénéficier d'une forte participation des parties prenantes, notamment les autorités locales, les services d'urgence, les organismes de réglementation, les syndicats et les mouvements associatifs. Enfin, il est capital que le public soit mieux informé sur l'exposition continue aux rayonnements qui font partie de sa vie quotidienne, de sorte qu'il puisse juger en connaissance de cause des effets que l'énergie nucléaire a sur la santé.

D.4. Gestion et stockage définitif du combustible utilisé et des déchets

80. Comme il est récapitulé dans la partie B.4, il n'y a actuellement aucune installation de stockage définitif en service pour les DHA et, de ce fait, les stocks de combustible utilisé augmentent. Tout le combustible utilisé est d'abord entreposé dans des bassins situés dans les installations des réacteurs pendant une durée de neuf mois pouvant aller jusqu'à plusieurs décennies, suivant les capacités d'entreposage des bassins. Le combustible qui doit être retraité est transporté dans une installation de retraitement où il est entreposé dans des bassins d'entreposage tampon avant d'être introduit dans le processus. Le combustible qui ne doit pas être retraité reste entreposé dans son bassin d'origine ou alors est transporté dans une installation d'entreposage de combustible hors du site du réacteur. Malgré leur nom, ces installations peuvent être situées sur une partie du site du réacteur ou sur des sites spécialement conçus pour ce type d'entreposage. Environ 120 installations commerciales d'entreposage du combustible utilisé hors du site sont actuellement en service dans le monde, la plupart étant des installations d'entreposage à sec sur le site du réacteur.

81. Il s'agit actuellement d'accélérer la construction d'installations de stockage définitif des DHA et de développer davantage l'entreposage hors du site de réacteurs pour recevoir les stocks accrus de combustible utilisé et faire face aux durées d'entreposage prolongées. Les pays ayant le plus progressé dans le domaine des installations de stockage définitif sont la Finlande, la France et la Suède où celles-ci devraient devenir opérationnelles en 2020–2025. Pour les autres pays de l'UE, comme indiqué dans la partie B.4, le Conseil de l'UE a approuvé en juillet 2011 une directive qui prévoit que tous les pays membres de l'UE mettent en place des programmes nationaux sur la gestion du combustible utilisé et des déchets radioactifs et fassent rapport à la CE en août 2015, puis tous les trois ans, sur les progrès réalisés.

D.5. Relations entre les réseaux électriques et la technologie des réacteurs

82. Afin d'éviter des problèmes de stabilité du réseau, on estime généralement que toute nouvelle centrale nucléaire doit faire environ 10 % du réseau existant. Douze des 29 pays qui envisagent ou planifient un programme électronucléaire ont des réseaux de moins de 5 GWe, trop petits, selon la règle des 10 %, pour y raccorder la plupart des types de réacteur existants sans améliorer les interconnexions des réseaux à l'échelle internationale. Bien que de nombreux modèles inférieurs à 600 MWe soient à l'étude, peu sont disponibles commercialement. Les problèmes de réseau pourraient aussi limiter les options technologiques pour les pays dont les réseaux sont inférieurs à 10 GWe.

E. Évolution de la technologie des réacteurs et du cycle du combustible

E.1. Réacteurs à eau ordinaire (REO)

83. Les réacteurs à eau ordinaire (REO) sont prépondérants dans les mises en chantier. Cinquante-quatre des 62 tranches actuellement en construction sont des REO.

84. Parmi les 26 réacteurs en construction en Chine figurent le réacteur européen à eau sous pression (EPR), le réacteur AP-1000 de Westinghouse, et des modèles locaux de REP comme le CNP-600, le CPR-1000 et le CAP-1400. La Compagnie nucléaire nationale chinoise a aussi mis au point une centrale CNP-1000 en se basant sur l'expérience acquise lors de la conception, de la construction et de l'exploitation des centrales nucléaires de Qinshan et de Daya Bay. L'exploitation commerciale des deux premières tranches a commencé en 2010 et 2011 à Ling'ao. L'Institut de recherche et de conception en ingénierie nucléaire de Shanghai (SNERDI) est en train de mettre au point la centrale passive avancée CAP-1400/1700 à partir de la technologie de sûreté passive conçue pour l'AP-1000.

85. Le Japon exploite quatre réacteurs avancés à eau bouillante (RAEB) et en construisait deux autres jusqu'à ce que survienne l'accident à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. Les travaux de construction sont suspendus sine die. Ce pays a un programme pour mettre au point le réacteur ABWR-II de 1638 MWe dont il escompte des économies d'échelle par rapport aux RAEB existants. La mise en service commerciale de ce réacteur est prévue pour la deuxième partie de la décennie en cours. Il a aussi des programmes pour mettre au point un réacteur avancé à eau bouillante à hautes performances ainsi qu'un réacteur avancé à eau sous pression à hautes performances, tous deux de 1 800 MWe. Une version européenne du RAEP est aussi en train d'être mise au point et sera évaluée en fonction des exigences des compagnies d'électricité européennes.

86. En République de Corée, 11 tranches OPR1000 sont en exploitation et une est en construction. En s'inspirant de leur conception, la Compagnie coréenne d'énergie hydroélectrique et nucléaire a mis au point un réacteur de puissance avancé APR1000 et, pour réaliser d'autres économies d'échelle, un réacteur APR1400. Des tranches d'un APR1400 sont en construction sur le site de Shin-Kori-3 et -4 et sont prévues sur les sites de Shin-Ulchin-1 et -2 et Shin-Kori-5 et -6. Quatre APR1400 ont été commandés par les Émirats arabes unis. Une version européenne de l'APR1400 est en train d'être mise au point et sera évaluée en fonction des exigences des compagnies d'électricité européennes. Les travaux de conception de l'APR+, un REP avancé de 1 500 MWe, ont commencé.

87. En France, AREVA a conçu le réacteur européen à eau sous pression (EPR) de 1 650 MWe, qui répond aux exigences des compagnies d'électricité européennes. Quatre de ces réacteurs sont en construction en Chine, en Finlande et en France. En partenariat avec E.ON, AREVA est en train de

mettre au point le modèle KERENA de 1 250 MWe, un REB avancé doté de systèmes de sûreté passive et, dans le cadre d'une société commune avec Mitsubishi Heavy Industries, met au point le modèle ATMEA-1 de 1 150 MWe, un REP avancé doté de systèmes de sûreté active.

88. Aux États-Unis d'Amérique, Westinghouse a mis au point le modèle AP-1000, qui a reçu en 2006 sa certification. Quatre tranches AP-1000 sont en cours de construction sur les sites de Sanmen et Haiyang en Chine. La Commission de la réglementation nucléaire des États-Unis (NRC) examine les RAEB de GE-Hitachi Nuclear Energy et de Toshiba pour un renouvellement de la certification de leur conception. Elle est en train d'examiner l'EPR conçu par AREVA pour les États-Unis, le RAEP de Mitsubishi et l'ESBWR de GE-Hitachi Nuclear Energy en vue de la certification de leur conception.

89. En Fédération de Russie, Atomenergoproekt/Gidropress est en train de concevoir des centrales dotées de réacteurs VVER évolutifs dont la puissance varie entre 300 MWe et 1 800 MWe. Deux tranches VVER-1000 (V-320) et cinq tranches VVER-1200 (NPP-2006) sont en construction. Il y a deux tranches de VVER-1000 (V-320) en exploitation en Chine (Tianwan-1 et -2), deux en République tchèque (Temelin-1 et -2) et une en République islamique d'Iran.

E.2. Réacteurs de faible ou moyenne puissance (RFMP)

90. À l'heure actuelle, 131 RFMP d'une capacité totale de 58,9 GWe sont en exploitation dans 26 pays. Sur les 62 réacteurs en construction, 14 sont des RFMP. Quelque 45 concepts innovants de RFMP sont à différents stades de recherche-développement.

91. L'Argentine met au point le réacteur CAREM, un modèle de REO sous pression de type intégré de faible puissance, où tous les composants du circuit primaire sont à l'intérieur de la cuve du réacteur et dont la production électrique est de 150 à 300 MWe. Les travaux de terrassement du site d'une centrale prototype CAREM de 27 MWe ont débuté en septembre 2011.

92. En France, la DCNS met au point Flexblue, un modèle modulaire sous-marin de faible puissance (de 50 à 250 MWe) basé sur le réacteur français de propulsion navale refroidi à l'eau.

93. Le modèle de réacteur avancé modulaire intégré (SMART) de la République de Corée, d'une capacité thermique de 330 MWth, est destiné au dessalement nucléaire. La Commission nationale de la sûreté nucléaire devrait donner l'agrément du modèle type d'ici la fin de 2012.

94. La Fédération de Russie construit deux réacteurs KLT-40S de 35 MWe installés sur barge qui sont destinés à la cogénération (production d'électricité et de chaleur industrielle). Ce type de réacteur, inspiré de la centrale commerciale de propulsion navale KLT-40, est une variante avancée du réacteur qui propulse les brise-glace nucléaires. Le réacteur ABV-6M de 8,6 MWe en est à un stade de conception avancé. Il s'agit d'un réacteur à eau ordinaire sous pression de type intégré à circulation naturelle du caloporteur primaire. Le réacteur RITM-200 de 8,6 MWe, actuellement au stade de conception détaillée, est un réacteur de type intégré à circulation forcée destiné aux brise-glace nucléaires.

95. Aux États-Unis, quatre RFMP de type intégré à eau sous pression sont en cours de conception : mPower, NuScale, Westinghouse's SMR et Hi-SMUR 140. Le mPower est composé de deux à six modules de 180 MWe. La demande de certification de sa conception devrait être déposée auprès de la NRC en 2013. NuScale Power envisage la conception d'une centrale nucléaire composée de 12 modules au maximum de 45 MWe. La demande de certification de son concept devrait aussi intervenir en 2013. Le RFMP de Westinghouse est un modèle conceptuel de 225 MWe incluant des systèmes de sûreté passive et des composants éprouvés de l'AP-1000. Les travaux de conception d'un modèle de RFMP plus récent, le réacteur souterrain modulaire intrinsèquement sûr Holtec

(Hi-SMUR 160), réacteur de 160 MWe qui repose sur la convection naturelle et n'a donc pas besoin de pompes pour la circulation du réfrigérant et de sources externes d'électricité, ont aussi démarré.

E.3. Réacteurs à eau lourde (REL)

96. Il y a 47 REL en exploitation et 5 en construction. Il en existe de deux sortes : le type à tubes de force et le type à caisson. À l'exception d'Atucha-1 en Argentine, tous les REL en exploitation sont du type à tubes de force. Sur les 5 en construction, tous sauf Atucha-2 sont aussi des réacteurs à tubes de force.

97. En janvier 2011, la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) a achevé l'examen de la conception de l'avant-projet d'ACR-1000 ; ce réacteur de puissance avancé est ainsi le premier à avoir atteint ce stade d'étude auprès de la CCSN. L'ACR-1000, mis au point par Candu Énergie, est caractérisé par une normalisation très poussée des composants et fonctionne à l'uranium légèrement enrichi pour compenser l'utilisation d'eau ordinaire comme caloporteur primaire. La CCSN procède actuellement à l'examen de la conception du pré-projet concernant le CANDU-6 amélioré de 700 MWe. Candu Énergie met aussi au point un réacteur CANDU refroidi à l'eau supercritique (CANDU-RESC).

98. En Inde, la Nuclear Power Corporation of India Limited (NPCIL) a conçu un REL évolutif de 700 MWe. Quatre réacteurs de ce type sont actuellement en construction. Le Centre de recherche atomique Bhabha (BARC) est en train de finaliser la conception d'un réacteur avancé à eau lourde (RAEL) de 300 MWe qui utilisera du combustible à base de thorium, des systèmes de sûreté passive, de l'eau lourde comme modérateur et de l'eau ordinaire bouillante comme caloporteur dans des tubes de force verticaux.

E.4. Réacteurs refroidis par gaz (RRG)

99. Il y a 14 réacteurs avancés refroidis par gaz (RARG) et un réacteur Magnox en exploitation, tous au Royaume-Uni.

100. En Chine, une installation industrielle modulaire de démonstration, appelé le réacteur modulaire à lit de boulets à haute température (HTR-PM), en est à un stade avancé de conception. Une société propriétaire a été créée, et des composants comme les cuves sous pression du circuit primaire, les générateurs de vapeur, les internes du réacteur et les soufflantes à l'hélium sont en cours de fabrication. Le site est prêt, et le premier coulage de béton aura lieu une fois que les autorités auront donné leur agrément.

101. La République de Corée met au point des capacités de production d'hydrogène dans le cadre du projet de développement et de démonstration de la production nucléaire d'hydrogène (NHDD). Un projet de R-D consacré à la mise au point de technologies clés pour la production d'hydrogène avec le réacteur à très haute température (RTHT) est en cours. Les efforts sont concentrés sur le couplage du RTHT et du cycle thermochimique soufre-iode, les données sur le métal à haute température et le graphite ; le cycle soufre-iode à haute pression ; la fabrication et la qualification du combustible TRISO et les méthodes de programmation informatique et de conception.

102. En Afrique du Sud, le projet de réacteur modulaire à lit de boulets a été abandonné en 2010. La société Pebble Bed Modular Reactor (Pty) Limited existe toujours et ce jusqu'à 2013 au moins. Elle s'occupe maintenant des questions de propriété intellectuelle relatives au projet et élabore des stratégies pour une future mobilisation des clients et des fournisseurs.

103. Aux États-Unis, la Next Generation Nuclear Plant Industry Alliance Limited a annoncé, en février 2012, avoir choisi le concept du réacteur à haute température refroidi par gaz (RHTRG) d'AREVA comme étant le meilleur modèle de centrale nucléaire de la prochaine génération. Les

sociétés membres de cette Alliance entendent coopérer à la conception, à la construction et à l'application de la technologie RHTRG. Le concept d'AREVA est un RHTRG à blocs prismatiques d'environ 625 MWth per module.

E.5. Réacteurs à neutrons rapides (RNR)

104. Il existe deux réacteurs à neutrons rapides en service, le réacteur rapide expérimental chinois (CEFR) de 20 MWe et le BN-600 de 560 MWe de la Fédération de Russie. Deux autres sont en construction dans ce pays et en Inde.

105. Le CEFR est un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium de type piscine. La Chine met aussi au point le CFR-1000, réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium utilisant du combustible MOX destiné à une centrale de démonstration.

106. Dans le cadre de son Plan stratégique européen pour les technologies énergétiques (Plan SET), la Commission européenne explore actuellement deux voies pour le développement de la technologie des réacteurs à neutrons rapides. La première est consacrée à un réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium et la deuxième à des réacteurs refroidis au plomb et refroidis par gaz comme option à plus long terme. Le programme de démonstration et de mise en œuvre correspondant — l'Initiative européenne pour une industrie nucléaire durable — prévoit le développement du prototype français de réacteur refroidi au sodium appelé ASTRID et de deux centrales de démonstration, ALFRED et ALLEGRO, pour les filières de réacteurs refroidis au plomb et refroidis par gaz, respectivement. Le programme est également appuyé par une installation sous-critique d'irradiation en spectre rapide, MYRRHA, située en Belgique.

107. L'Inde construit actuellement à Kalpakkam le prototype de réacteur surgénérateur à neutrons rapides (RSNR) de 500 MWe, dont la mise en service est prévue pour début 2013. Le programme indien prévoit la construction de plusieurs tranches vers 2020-2025 ainsi que le développement, après 2025, de réacteurs à neutrons rapides à combustible métallique et ayant un rapport de surgénération plus élevé.

108. Le Japon est en train de mettre au point son réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium de 1 500 MWe dans le cadre du projet national de développement de la technologie d'un cycle pour réacteurs à neutrons rapides (FaCT), et la République de Corée mène actuellement un vaste programme de R-D pour appuyer le réacteur KALIMER à neutrons rapides refroidi au sodium de 600 MWe.

109. La Fédération de Russie construit actuellement le BN-800 sur le site où est aujourd'hui exploité le BN-600. La phase de mise en service du BN-800 devrait commencer en 2014. Le pays a lancé récemment un nouveau programme destiné à développer un réacteur avancé à neutrons rapides refroidi au sodium (BN-1200), le BREST-OD-300 refroidi au plomb, le SVBR-100 refroidi par mélange eutectique de plomb et de bismuth, les cycles du combustible connexes, et le nouveau réacteur de recherche polyvalent à neutrons rapides refroidi au sodium appelé MBIR.

E.6. Cycle du combustible nucléaire et progrès technologiques associés

110. Les nouvelles technologies de retraitement du combustible usé par procédé aqueux et non aqueux sont actuellement étudiées pour les REO ; elles permettraient de réduire considérablement la production de déchets. En vue de tester et d'optimiser les technologies à l'étude, on s'occupe actuellement de créer des installations industrielles de démonstration à l'échelle pilote.

111. Pour le stockage définitif de DHA, des études sont en cours pour trouver des sites et des barrières artificielles adaptés et pour réaliser des évaluations de la sûreté et appliquer la technologie d'enrobage et de stockage définitif.

F. Coopération concernant l'expansion de l'énergie nucléaire et le développement technologique

112. Le Forum international Génération IV (GIF), à travers un système de contrats et d'accords, coordonne les activités de recherche sur les six systèmes d'énergie nucléaire de la prochaine génération retenus en 2002 et décrits dans le document *A Technology Roadmap for the Generation IV Nuclear Energy Systems*. Ces six systèmes sont les suivants : réacteurs à neutrons rapides refroidis par gaz (RNRRG), réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb (RNRRP), réacteurs à sels fondus (RSF), réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, réacteurs refroidis par eau supercritique (RESC) et réacteurs à très haute température (RTHT). Ils représentent diverses technologies dans les domaines des réacteurs, de la conversion d'énergie et du cycle du combustible. En fonction de leurs niveaux respectifs de développement technique, ces systèmes devraient être disponibles à des fins d'introduction commerciale entre 2015 et 2030 ou au-delà. Le GIF compte actuellement 13 membres²⁰.

113. Le Projet international de l'Agence sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) a 37 membres²¹. Il se divise en quatre sous-projets : 1) Stratégies nationales à long terme pour l'énergie nucléaire, 2) Scénarios mondiaux pour l'énergie nucléaire, 3) Innovations techniques et institutionnelles et 4) Politique et Forum de dialogue de l'INPRO.

114. L'INPRO et le GIF coordonnent des activités dans le cadre d'un plan d'action conjoint visant la coopération dans les domaines suivants : échange d'informations générales, synergies dans les méthodes d'évaluation (mettant l'accent sur la résistance à la prolifération, la sûreté et les questions économiques), coopération dans des études thématiques (notamment dans le domaine des applications non électriques, des RFMP et des ressources humaines), dialogue mondial entre les détenteurs et les utilisateurs de technologie nucléaire et activités conjointes, comme le deuxième atelier conjoint AIEA/INPRO/GIF sur les aspects relatifs à la sûreté des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium qui s'est tenu en novembre 2011. Au titre du plan d'action conjoint, l'Agence participe en tant qu'observateur au groupe d'orientation du GIF et en tant que membre aux groupes de travail du GIF.

115. Le nombre de membres du Cadre international de coopération pour l'énergie nucléaire (IFNEC) a augmenté pour s'établir à 31 pays participants²², 30 pays observateurs et trois organisations internationales ayant le statut d'observateur, dont l'Agence. L'IFNEC comprend actuellement deux groupes de travail, l'un sur le développement des infrastructures et l'autre sur la fiabilité des services liés au combustible nucléaire.

²⁰ Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, Chine, États-Unis d'Amérique, Euratom, Fédération de Russie, France, Japon, République de Corée, Royaume-Uni et Suisse.

²¹ Afrique du Sud, Algérie, Allemagne, Argentine, Arménie, Bélarus, Belgique, Brésil, Bulgarie, Canada, Chili, Chine, Égypte, Espagne, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, France, Inde, Indonésie, Israël, Italie, Japon, Jordanie, Kazakhstan, Malaisie, Maroc, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, République de Corée, République tchèque, Slovaquie, Suisse, Turquie, Ukraine, Vietnam et Commission européenne.

²² Allemagne, Argentine, Arménie, Australie, Bulgarie, Canada, Chine, Émirats arabes unis, Estonie, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, France, Ghana, Hongrie, Italie, Japon, Jordanie, Kazakhstan, Kenya, Koweït, Lituanie, Maroc, Oman, Pays-Bas, Pologne, République de Corée, Roumanie, Royaume-Uni, Sénégal, Slovaquie et Ukraine.

116. Le Programme multinational d'évaluation des conceptions (MDEP) a été lancé en 2006 par la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) des États-Unis et l'Autorité française de sûreté nucléaire (ASN). En avril 2012, les organismes de réglementation nationaux de 11 pays²³ participaient à ce programme. Le MDEP met en commun les ressources de ces 11 organismes pour, tout d'abord, coopérer aux examens de la sûreté de certains modèles de réacteurs, puis étudier les possibilités d'harmonisation des pratiques réglementaires. Il compte cinq groupes de travail, portant respectivement sur les EPR, l'AP-1000, les codes et normes, les systèmes numériques de contrôle-commande et la coopération des fournisseurs lors d'inspections.

²³ Afrique du Sud, Canada, Chine, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, Finlande, France, Inde, Japon, République de Corée et Royaume-Uni.