

Réservé à l'usage officiel

Point 13 de l'ordre du jour provisoire de la Conférence générale
(GC(52)/1)

Situation internationale et perspectives de l'électronucléaire

Rapport du Directeur général

Résumé

- Dans ses résolutions GC(50)/RES/13 et GC(51)/RES/14, la Conférence générale a prié le Secrétariat de présenter, sur une base biennale, un rapport exhaustif distinct sur la situation internationale et les perspectives de l'énergie nucléaire, à partir de 2008. Le présent rapport, qui fait une mise à jour comme demandé, sera également publié comme annexe distincte du *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2009*.

Table des matières

Synthèse	1
Introduction	1
Situation de l'énergie nucléaire dans les États Membres	1
Perspectives de l'utilisation future de l'électronucléaire.....	2
Enjeux d'une expansion du nucléaire.....	2
A. Introduction	4
B. Situation actuelle de l'électronucléaire	4
B.1. Utilisation de l'énergie nucléaire.....	4
B.2. Technologies des réacteurs disponibles.....	7
B.3. Ressources humaines	11
B.4. Activités du cycle du combustible.....	11
B.5. Gestion des déchets radioactifs et déclassé.....	13
B.6. Capacité industrielle	14
B.7. Applications non électriques.....	15
C. Perspectives des applications futures de l'énergie nucléaire.....	16
C.1. Perspectives dans les pays qui utilisent déjà l'électronucléaire.....	16
C.2. Perspectives dans les pays qui envisagent d'introduire l'électronucléaire	17
C.3. Collaboration régionale	18
C.4. Facteurs potentiels de l'introduction de l'électronucléaire	18
C.5. Projections de la croissance électronucléaire.....	20
C.6. Attentes et potentialités des applications non électriques.....	22
D. Enjeux d'une expansion du nucléaire.....	23
D.1. Questions clés et tendances en ce qui concerne une expansion du nucléaire à court terme	23
D.1.1. Sécurité et fiabilité.....	23
D.1.2. Compétitivité économique et financement	23
D.1.3. Perception du public	24
D.1.4. Ressources humaines.....	25
D.1.5. Gestion du combustible utilisé et des déchets.....	25
D.1.6. Transport	26
D.1.7. Risques de prolifération et sécurité nucléaire	26
D.1.8. Création d'infrastructures dans les nouveaux pays nucléaires	27
D.1.9. Relations entre les réseaux de distribution et la technologie des réacteurs	27
D.2. Questions clés pour une utilisation à long terme	28
D.2.1. Utilisation efficace des ressources disponibles.....	28
D.2.2. Innovations dans la conception des réacteurs.....	29
D.2.3. Innovations concernant le cycle du combustible.....	29
E. Évolution de la technologie des réacteurs et du cycle du combustible	30
E.1. Évolution des réacteurs nucléaires et de la technologie associée.....	30
E.1.1. Modèles évolutifs.....	30
E.1.2. Innovations futures.....	32
E.2. Cycle du combustible nucléaire et progrès technologiques associés	33
E.2.1. Évolution de la technologie du cycle du combustible.....	33
E.2.2. Innovations futures.....	34
E.3. Applications non électriques.....	34
F. Coopération concernant l'expansion du recours à l'énergie nucléaire et le développement technologique	35

Situation internationale et perspectives de l'électronucléaire

Rapport du Directeur général

Synthèse

Introduction

1. Le présent rapport a été élaboré en réponse à la requête des États Membres figurant dans les résolutions GC(50)/RES/13 et GC(51)/RES/14, priant le Secrétariat de présenter, sur une base biennale, un rapport exhaustif distinct sur la situation internationale et les perspectives de l'énergie nucléaire, à partir de 2008.

Situation de l'énergie nucléaire dans les États Membres

2. Les centrales nucléaires sont essentiellement utilisées pour la production d'électricité. À l'heure actuelle, 439 réacteurs sont en exploitation dans 30 pays et fournissent environ 14 % de la production mondiale d'électricité. La part du nucléaire dans cette production a légèrement baissé ces dernières années. Toutefois, la production totale d'électricité d'origine nucléaire augmente car la disponibilité des centrales, l'augmentation de puissance et les nouvelles centrales compensent les pertes de production dues à la mise à l'arrêt des anciennes centrales. Étant donné les avantages économiques de la poursuite de l'exploitation des centrales après le remboursement des investissements initiaux, et avec les évaluations minutieuses de la gestion de la durée de vie des centrales, les licences d'exploitation d'un certain nombre de réacteurs ont été prolongées pour 20 années supplémentaires.

3. Les réacteurs à eau ordinaire (REO) sont de loin les réacteurs les plus fréquents utilisés de nos jours, suivis des réacteurs à eau lourde sous pression puis des réacteurs refroidis par gaz. Bien que les réacteurs rapides soient en cours d'élaboration depuis les années 1950, seules des centrales de démonstration sont actuellement en exploitation.

4. La sûreté et la fiabilité des installations nucléaires augmentent régulièrement. De solides réseaux de pays possédant des centrales nucléaires en activité permettent aux exploitants d'apprendre les uns des autres et de traiter les problèmes communs. Les efforts en cours renforcent continuellement la culture de sûreté et la supervision réglementaire.

5. L'offre d'uranium disponible actuellement répond à la demande. Les capacités actuelles d'enrichissement et de fabrication de combustible sont adéquates pour faire face à la demande attendue pour la prochaine décennie. Il existe en outre une importante expérience en ce qui concerne l'entreposage et le retraitement du combustible usé ainsi que le traitement des déchets de haute activité. Les capacités existantes de retraitement sont adéquates pour répondre à la demande actuelle. Toutefois, l'essentiel du combustible usé continue d'être entreposé en attendant une décision sur la politique future, c'est-à-dire de savoir s'il doit être retraité et recyclé, ou stocké comme déchets. Jusque-là, il n'y a aucune installation de stockage définitif.

6. Seuls quelques pays utilisent actuellement de l'énergie nucléaire civile pour des besoins autres que la production d'électricité – essentiellement pour le dessalement de l'eau de mer et le chauffage urbain – et, même dans ce cas, cette utilisation est limitée.

Perspectives de l'utilisation future de l'électronucléaire

7. Les besoins énergétiques mondiaux et la part de l'électricité dans la consommation totale d'énergie augmentent rapidement, et les projections indiquent que la part de l'électronucléaire connaîtra une forte augmentation. Vingt-quatre des 30 pays qui utilisent actuellement cette forme d'énergie pour la production d'électricité envisagent d'autoriser la construction de nouvelles centrales et la majorité d'entre eux appuient activement l'utilisation accrue de l'électronucléaire, certains à travers des mesures incitatives. On s'attend à ce que la plupart de ces pays construisent des réacteurs ayant une capacité de production supérieure à 1 000 MWe.

8. En outre, un nombre croissant de pays se disent intéressés par l'introduction de l'électronucléaire. Sur plus de 40 qui ont exprimé un tel intérêt ces dernières années, plus de 20 examinent activement la possibilité de répondre à leurs besoins en énergie grâce à des programmes électronucléaires, tandis que les autres ont indiqué vouloir comprendre les questions liées à l'introduction de l'énergie d'origine nucléaire.

9. Les attentes croissantes concernant l'électronucléaire s'expliquent, entre autres, par la hausse de la demande d'énergie, les préoccupations concernant la sécurité des approvisionnements énergétiques nationaux, l'instabilité des prix des combustibles fossiles et les préoccupations mondiales concernant l'environnement. Ces facteurs semblent être les mêmes pour les pays qui développent les programmes nucléaires existants que pour ceux qui cherchent à les introduire.

10. Les projections de différentes organisations internationales prévoient une croissance notable de l'utilisation de l'électronucléaire. Celles de l'Agence indiquent que la capacité mondiale totale de production électronucléaire sera de 437 à 542 GWe d'ici 2020 et de 473 à 748 GWe d'ici 2030. Il ressort des projections haute et basse que la contribution des pays ayant actuellement des programmes électronucléaires à la croissance de cette production sera la plus importante au cours des 20 prochaines années. Toutes les projections, qu'elles viennent de l'Agence ou d'ailleurs, comportent un haut degré d'incertitude.

11. Le recours à l'électronucléaire dans les applications autres que la production d'électricité pourrait augmenter dans l'avenir pour les applications telles que le dessalement de l'eau de mer, le chauffage urbain, la chaleur industrielle, la liquéfaction du charbon et la production d'hydrogène. On pourrait accroître le rôle de l'électronucléaire dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre à travers les contributions indirectes au secteur du transport avec les véhicules et les trains électriques.

Enjeux d'une expansion du nucléaire

12. Les perspectives de croissance et d'expansion électronucléaires dépendent des efforts faits pour relever plusieurs défis, et notamment :

- Travailler diligemment pour assurer la sûreté et la fiabilité des centrales nucléaires ;
- Améliorer la compétitivité économique ;
- Gagner et retenir la confiance du public dans l'électronucléaire ;
- Retenir et développer les compétences professionnelles nécessaires ;
- Poursuivre la gestion appropriée du combustible usé et des déchets radioactifs ;

- Démontrer le stockage définitif approprié du combustible usé et des déchets de haute activité ;
- Promouvoir la gestion et l'acceptation du transport du combustible usé ;
- Maintenir la confiance dans la non-prolifération et la sécurité nucléaires ;
- Établir une infrastructure acceptable dans les pays qui introduisent l'électronucléaire ;
- Élaborer des modèles éprouvés de réacteurs appropriés pour les pays spécifiques ;
- À long terme, veiller à une utilisation efficace et durable des ressources.

13. La capacité industrielle des fournisseurs nucléaires a généralement baissé au cours des 20 dernières années. Non seulement il y a moins de concepteurs et de choix de réacteurs, mais aussi il y a moins d'ingénieurs architectes et d'organismes de gestion de projets ayant de l'expérience dans la mise en œuvre des grands projets électronucléaires. Les difficultés liées au recrutement, à l'éducation et à la formation du personnel, ainsi qu'à l'acquisition de l'expérience nécessaire pour appuyer la croissance et l'expansion de l'industrie nucléaire pourraient entraver les plans de développement même dans certains pays possédant des programmes nucléaires établis.

14. De nombreux pays qui ont exprimé de l'intérêt pour l'introduction de l'électronucléaire ne possèdent pas actuellement l'infrastructure nécessaire. Ils pourraient avoir besoin de beaucoup de temps et de ressources pour établir les compétences nécessaires en vue de l'introduction de centrales nucléaires. Les défis futurs pourraient comprendre l'innovation institutionnelle et les améliorations du mode de fonctionnement de l'industrie, y compris la possibilité de partager les informations relatives à l'approbation des licences de conception ; le partage de l'infrastructure nucléaire régionale, y compris les installations du cycle du combustible ; et les dépôts internationaux.

15. La mise en valeur des ressources et l'utilisation efficiente du combustible pourraient être améliorées grâce aux réacteurs rapides et aux cycles du combustible fermés. Ce système recycle l'uranium et le plutonium à partir du combustible usé, accroît l'utilisation des ressources d'uranium et réduit la quantité de nucléides radioactifs à longue période contenue dans les déchets. Les risques de prolifération et les dangers potentiels pour l'environnement de ces stratégies constituent encore des sujets de préoccupation dans certains pays.

16. La plupart des pays qui souhaitent introduire leur première centrale nucléaire veulent adopter des modèles éprouvés. Nombreux sont ceux d'entre eux dont le réseau national est trop petit pour les grands réacteurs (1 000 MWe ou plus) disponibles actuellement.

17. Les objectifs clés des modèles de réacteurs évolutifs sont une fiabilité et une sûreté améliorées, l'incorporation de technologies modernes, des périodes de construction plus courtes, des investissements initiaux plus faibles, et un processus plus facile d'autorisation et de choix du site. À court terme, la plupart des nouvelles centrales nucléaires seront des modèles évolutifs. À long terme, non seulement la durée de construction de ces modèles devrait être plus courte et les investissements initiaux plus faibles, mais aussi ces réacteurs devraient appliquer les nouvelles stratégies de gestion du cycle du combustible et des déchets.

18. La coopération internationale peut aider à réduire le coût de l'élaboration de la technologie, en particulier pour les systèmes innovants ou qui seront mis en place à plus long terme. Deux grands projets internationaux, le Forum international Génération IV (GIF) et le Projet international sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) de l'AIEA, aident les États Membres participants à évaluer les innovations technologiques et à étudier les moyens de faire de l'énergie nucléaire une option viable faisant partie intégrante de leur bouquet énergétique futur.

19. L'initiative sur l'infrastructure électronucléaire mondiale de la Fédération de Russie, avec comme première étape l'établissement d'un centre international d'enrichissement d'uranium (CIEU) à Angarsk, et celle du Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire des États-Unis d'Amérique visent à établir un lien entre les États partageant une vision commune de la nécessité de développer l'énergie nucléaire à des fins pacifiques de manière sûre et sécurisée dans le monde.

A. Introduction

20. Le présent rapport récapitule brièvement la situation actuelle en ce qui concerne l'utilisation mondiale de l'énergie nucléaire, la technologie actuellement disponible pour les centrales nucléaires, et le cycle du combustible pertinent.

21. Il examine en outre les perspectives de l'application future de l'énergie nucléaire au vu des informations dont dispose l'Agence sur les intentions des pays dans ce domaine.

22. Les enjeux pour les pays qui possèdent ou posséderont l'électronucléaire sont examinés, de même que certaines questions qui pourraient faciliter l'utilisation future de celle-ci, et l'évolution de la technologie des réacteurs et du cycle du combustible nécessaire pour répondre à ces enjeux

23. Ce rapport a été élaboré en réponse à la requête des États Membres faite à la 50^e Conférence générale et réitérée à la 51^e Conférence générale priant « le Secrétariat de présenter ... un rapport exhaustif biennal distinct sur la situation internationale et les perspectives de l'énergie nucléaire, à partir de 2008 » (résolution GC(51)/RES/14).

B. Situation actuelle de l'électronucléaire

B.1. Utilisation de l'énergie nucléaire

24. L'énergie nucléaire assure actuellement environ 14 % de la production mondiale d'électricité et quelque 6 % de l'énergie totale utilisée dans le monde.

25. La quantité totale d'énergie produite et d'énergie utilisée par habitant augmente. Les besoins totaux en énergie de la planète ont été multipliés par 2,5 entre 1970 et 2006, passant de 6 181 à 15 311 GW·an (195 à 483 exajoules)¹. Ces dernières décennies, la part de l'électricité, en pour cent de l'énergie totale produite, a aussi augmenté.

26. La figure B-1 montre la contribution des différentes sources d'énergie à l'équilibre énergétique mondial au cours de cette période. Celle du nucléaire a augmenté d'un peu moins de 0,5 % en 1970 à plus de 7 % dans les années 1990, puis baissé à 6 % en 2006. Les combustibles fossiles restent la source d'énergie dominante.

¹ Un exajoule égale 2.78 x 10⁵ GW·h ou 31,7 GW·an.

27. L'électronucléaire est utilisée pour produire de l'électricité depuis 1954. Depuis, des centrales nucléaires sont exploitées dans 32 pays². À l'heure actuelle, 30 pays exploitent 439 centrales ayant une capacité totale de 372 GWe. En outre, 34 tranches d'une capacité totale de 28 GWe sont en construction (au 26 juin 2008). La production électronucléaire était de 2 608 milliards de kW·h d'électricité en 2007. Cette industrie a aujourd'hui plus de 13 000 années d'expérience.

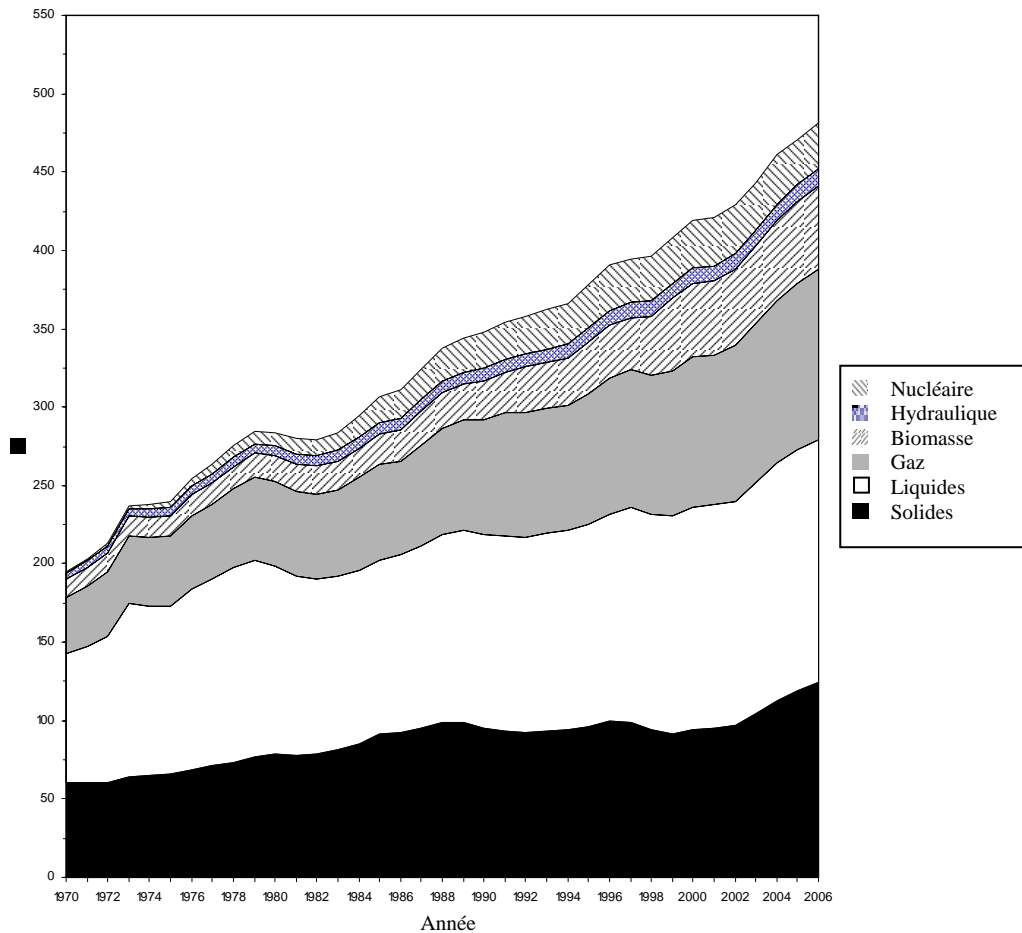


FIG. B-1. Part des sources d'énergie dans la production mondiale totale d'énergie, 1970-2006

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, Roumanie, Royaume-Uni, Slovaquie, Slovénie, Suisse, Suède, Ukraine.

Tableau B-1. Utilisation (EJ) et part (%) des différents types d'énergie dans la production d'électricité en 2006

Région	Énergie thermique (a)		Énergie hydroélectrique		Énergie nucléaire		Énergies renouvelables (b)		Total	
	Utili- sation (EJ)	%	Utili- sation (EJ)	%	Utili- sation (EJ)	%	Utili- sation (EJ)	%	Utili- sation (EJ)	%
Amérique du Nord	22,21	65,71	2,43	14,53	9,61	18,99	0,63	0,77	34,87	100,00
Amérique latine	4,42	38,28	2,46	58,31	0,33	2,61	0,32	0,81	7,54	100,00
Europe occidentale	15,56	52,32	1,72	15,86	9,56	29,14	0,53	2,68	27,37	100,00
Europe orientale	17,36	64,95	1,12	17,21	3,51	17,80	0,02	0,05	22,01	100,00
Afrique	4,89	80,01	0,35	17,74	0,11	1,84	0,04	0,41	5,4	100,00
Moyen-Orient et Asie du Sud	14,42	82,42	0,64	15,51	0,20	1,57	0,02	0,50	15,28	100,00
Asie du Sud-Est et Pacifique	5,81	88,17	0,26	10,73			0,21	1,10	6,28	100,00
Extrême-Orient	32,61	75,65	2,04	12,50	5,70	11,52	0,47	0,33	40,83	100,00
Total mondial	117,27	66,46	11,02	17,46	29,03	15,18	2,26	0,89	159,83	100,00

Notes : (a) La colonne « Énergie thermique » donne le total pour l'énergie solide, liquide, les gaz, la biomasse et les déchets.

(b) La colonne « Énergies renouvelables » regroupe l'énergie géothermique, éolienne et solaire et l'énergie des vagues.

28. La part de l'énergie nucléaire dans la production totale d'électricité varie considérablement par région (tableaux B-1 et B-2). En Europe occidentale, presque 30 % de l'électricité totale est d'origine nucléaire, contre environ 18 % pour l'Amérique du Nord et l'Europe orientale, 1,8 % pour l'Afrique, 2,6 % pour l'Amérique latine, 11,5 % pour l'Extrême-Orient et 1,6 % pour le Moyen-Orient et l'Asie du Sud³. L'énergie nucléaire est surtout utilisée dans les pays avancés sur le plan technologique.

Tableau B-2. Nombre de réacteurs de puissance dans le monde (fin 2007)

Région	En exploitation		En construction		Production d'électricité des centrales nucléaires en 2007 (TW-h)
	Nombre de réacteurs	Capacité nette (MWe)	Nombre de réacteurs	Capacité nette (MWe)	
Amérique du Nord	122	113 171	1	1 165	895
Amérique latine	6	4 090	1	692	28
Europe occidentale	130	122 638	2	3 200	827
Europe orientale	68	47 765	10	7 445	325
Afrique	2	1 800			13
Moyen-Orient et Asie du Sud	19	4 207	8	4 125	18
Extrême-Orient	92	78 531	11	10 566	502
Total mondial	439	372 202	33	27 193	2 608

³ Il n'y a pas de centrale nucléaire en Asie du Sud-Ouest et dans la région Pacifique et l'électronucléaire ne contribue donc pas à la production d'électricité de ces régions.

29. La production électronucléaire totale a augmenté de quelque 714 TW·h (soit environ 40 %) au cours de la période 1990-2004, sous l'effet combiné de trois facteurs : une disponibilité accrue des centrales nucléaires existantes, les nouvelles constructions, et l'augmentation de la puissance de centrales nucléaires existantes. Les facteurs de l'amélioration de la disponibilité (de 72,3 % à 83,2 %) sont les plus importants avec 57 % de l'augmentation. Viennent ensuite les nouvelles constructions (36 %) et enfin l'augmentation de la puissance (7 %) (figure B-2).

30. Les bilans de sûreté de cette industrie se sont considérablement améliorés depuis l'accident de Tchernobyl⁴. Les arrêts d'urgence automatiques non planifiés ont diminué de 1,8 par 7 000 heures critiques en 1990 à 0,55 par 7 000 heures critiques en 2007⁵. La disponibilité améliorée et les bilans de sûreté sont, en partie, attribuables au développement du partage de l'information sur les meilleures pratiques et les enseignements tirés dans l'industrie, à travers la mise en œuvre d'une réglementation basée sur les risques, et le regroupement dans cette industrie.

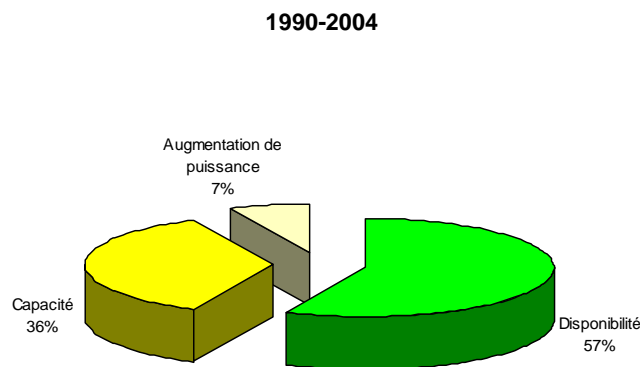


FIG. B-2. Contributions à l'augmentation de la production électronucléaire

B.2. Technologies des réacteurs disponibles

31. Bien qu'un large éventail de technologies différentes restent utilisées aujourd'hui, la plupart des réacteurs actuellement en exploitation sont des réacteurs à eau ordinaire. Environ 82 % des réacteurs commerciaux en exploitation sont des réacteurs modérés et refroidis par eau ordinaire⁶. 10 % des réacteurs modérés par eau lourde et refroidis par eau ordinaire, 4 % des réacteurs refroidis par gaz et autant de réacteurs refroidis par eau et modérés par graphite. Deux tranches de réacteur sont des réacteurs modérés et refroidis par métal liquide. Le tableau B-3 donne le nombre, les types et la puissance électrique nette des centrales nucléaires actuellement en exploitation. Outre les pays figurant sur cette liste, d'autres pays ont aussi exploité des réacteurs rapides, lesquels sont aujourd'hui à l'arrêt.

⁴ Rapport d'ensemble sur la sûreté nucléaire pour l'année 2007 (GOV/2008/2), 22 janvier 2008.

⁵ Association mondiale des exploitants nucléaires (WANO), *Indicateurs de performance WANO en 2007*, 2008.

⁶ Certains REO sont modérés par graphite.

32. Les trois quarts environ de tous les réacteurs aujourd'hui en exploitation ont plus de 20 ans, et un quart plus de 30 ans, comme le montre la figure B-3. La période d'exploitation initiale de nombreuses centrales a été prolongée grâce à des programmes de gestion de leur durée de vie pour permettre de les exploiter pendant jusqu'à 20 ans supplémentaires. Le vieillissement des réacteurs entraîne des problèmes de dégradation des matériaux et d'obsolescence technologique comme dans les domaines des instruments et du contrôle. La gestion de la durée de vie vise à faire face à ces problèmes pour non seulement accroître la rentabilité des investissements mais aussi, étant donné que l'expérience s'est traduite par d'excellentes performances d'exploitation, accroître la durée de vie totale autorisée des centrales.

33. La plupart des centrales nucléaires en exploitation dans le monde ont été conçues vers la fin des années 1960 et 1970 et ne sont pas offertes commercialement aujourd'hui. Les modèles de réacteur ont vu leur taille augmenter progressivement, tirant parti des économies d'échelle pour être plus compétitifs. Nombreux sont les réacteurs les plus anciens, dont l'exploitation commerciale a commencé au cours des années 1950, qui ont une capacité de 50 MWe ou moins. La capacité de la flotte actuellement en exploitation va de moins de 100 à 1 500 MWe. En 2006, la capacité moyenne des réacteurs en exploitation était de 850 MWe.

Tableau B-3. Répartition actuelle des types de réacteurs

Pays	REP		REB		RRG		RELP		REOG		SGR		Total	
	N°	MWe	N°	MWe	N°	MWe	N°	MWe	N°	MWe	N°	MWe	N°	MWe
AFRIQUE DU SUD	2	1800											2	1800
ALLEMAGNE	11	13973	6	6457									17	20430
ARGENTINE							2	935					2	935
ARMÉNIE	1	376											1	376
BELGIQUE	7	5824											7	5824
BRÉSIL	2	1795											2	1795
BULGARIE	2	1906											2	1906
CANADA							18	12610					18	12610
CHINE	9	7272					2	1300					11	8572
ESPAGNE	6	5940	2	1510									8	7450
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	69	66697	35	33885									104	100582
FINLANDE	2	976	2	1720									4	2696
FRANCE	58	63130									1	130	59	63260
HONGRIE	4	1829											4	1829
INDE			2	300			15	3482					17	3782
JAPON	23	18420	32	29167									55	47587
LITUANIE									1	1185			1	1185
MEXIQUE			2	1360									2	1360
PAKISTAN	1	300					1	125					2	425
PAYS-BAS	1	482											1	482
RÉP. DE CORÉE	16	14824					4	2627					20	17451
RÉP. TCHÈQUE	6	3619											6	3619
ROUMANIE							2	1305					2	1305
ROYAUME-UNI	1	1188			18	9034							19	10222
RUSSIE	15	10964							15	10219	1	560	31	21743
SLOVAQUIE	5	2034											5	2034
SLOVÉNIE	1	666											1	666
SUÈDE	3	2819	7	6215									10	9034
SUISSE	3	1700	2	1520									5	3220
UKRAINE	15	13107											15	13107
TOTAL	265	243421	94	85275	18	9034	44	22384	16	11404	2	690	439	372208

Le total inclut six tranches, 4 921 MWe pour Taiwan (Chine).

En 2007, trois réacteurs (1 852 MWe) ont été nouvellement connectés au réseau.

REP : réacteurs à eau sous pression

REB : réacteurs à eau bouillante

RRG : réacteurs refroidis par gaz

RELP : réacteurs à eau lourde sous pression

REOG : réacteurs refroidis par eau ordinaire et modérés par graphite

SGR : réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides.

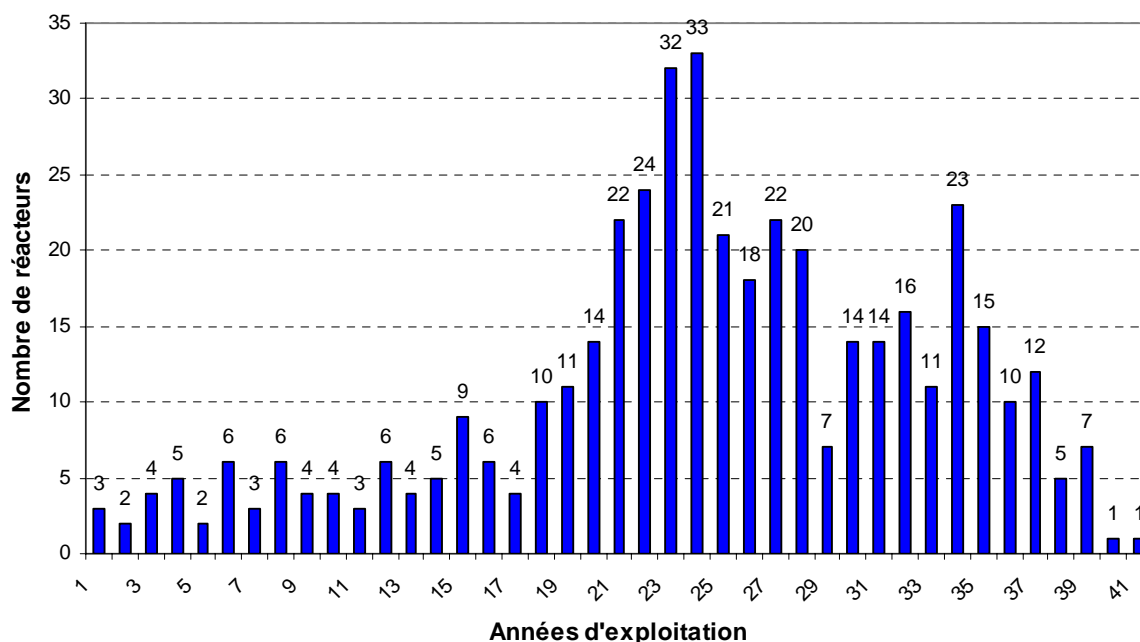


FIG. B-3. Nombre de centrales nucléaires en exploitation dans le monde en janvier 2008 en fonction de leur âge (l'âge d'un réacteur est déterminé par la date à laquelle il a été connecté pour la première fois à un réseau)

34. La technologie des réacteurs disponibles pour utilisation de nos jours est fondamentalement basée sur les modèles précédents et tient compte des caractéristiques de conception suivantes :

- Durée de vie de 60 ans
- Maintenance simplifiée – en ligne ou pendant l'arrêt
- Construction plus facile et plus rapide
- Inclusion de considérations de sûreté et de fiabilité aux premiers stades de la conception
- Technologies modernes dans le contrôle numérique et l'interface homme-machine
- Conception du système de sûreté guidée par l'évaluation des risques
- Simplicité grâce à la réduction du nombre de composants rotatifs
- Importance accrue des systèmes passifs (gravité, circulation naturelle, pression accumulée, etc.)
- Addition de matériel d'atténuation des accidents graves
- Modèles complets et normalisés pour préautorisation.

35. Bien que l'industrie ait historiquement et très largement recherché les économies d'échelle, l'introduction de réacteurs de faible (moins de 300 MWe) et de moyenne (entre 300 MWe et 700 MWe) puissance se poursuit. Les réacteurs de faible ou moyenne puissance (RFMP) permettent des investissements progressifs. Ils sont élaborés a) pour utilisation dans de petits réseaux ayant des interconnexions limitées, comme il en existe dans certains pays en développement ; b) comme source d'électricité ou d'énergie polyvalente dans des zones isolées ; et c) pour des investissements progressifs afin d'éviter les risques financiers.

B.3. Ressources humaines

36. Bien que ni l'Agence ni aucune autre organisation internationale ne rassemblent des statistiques exhaustives, on estime que les centrales nucléaires en exploitation dans le monde employaient au total plus de 250 000 personnes en 2007, année au cours de laquelle plus d'un million de personnes ont effectué des activités visant à appuyer l'industrie nucléaire dans le monde. Elles étaient employées dans la construction de nouvelles centrales nucléaires, l'appui en ingénierie et dans le domaine technique, la formation théorique et pratique, les organismes de réglementation, les ministères gouvernementaux, la recherche-développement, la gestion des déchets radioactifs, la radioprotection, la conception et la fabrication, l'appui en période d'arrêt, l'approvisionnement en combustible, ainsi que dans d'autres services et à travers la sous-traitance de l'approvisionnement. Le personnel actuel de l'industrie nucléaire prend de l'âge, et de nombreux secteurs manquent d'agents expérimentés, et perdent des connaissances et de l'expérience en raison des départs à la retraite, même dans les pays ayant des programmes nucléaires établis.

37. Au vu de ce qui précède, la préservation des connaissances et le recrutement pour l'industrie et les organismes de réglementation sont des questions importantes. Compte tenu de sa complexité, la technologie nucléaire nécessite un personnel bien formé et hautement spécialisé. Ces dernières années ont été marquées par une tendance à promouvoir la formation théorique et pratique dans l'industrie nucléaire même si les sources d'une telle formation spécialisée sont limitées, et qu'il faut jusqu'à 10 ans pour une formation appropriée à certains postes dans l'industrie. Dans certains pays, le gouvernement a introduit des incitations pour élaborer des programmes académiques et recruter des étudiants dans les domaines nucléaires. Des réseaux régionaux pour le partage de l'information ont en outre été établis, et la création de réseaux d'exploitants s'est développée. Ces efforts visent, entre autres, à combler le déficit d'expérience à mesure que l'effectif se renouvelle et augmente.

B.4. Activités du cycle du combustible

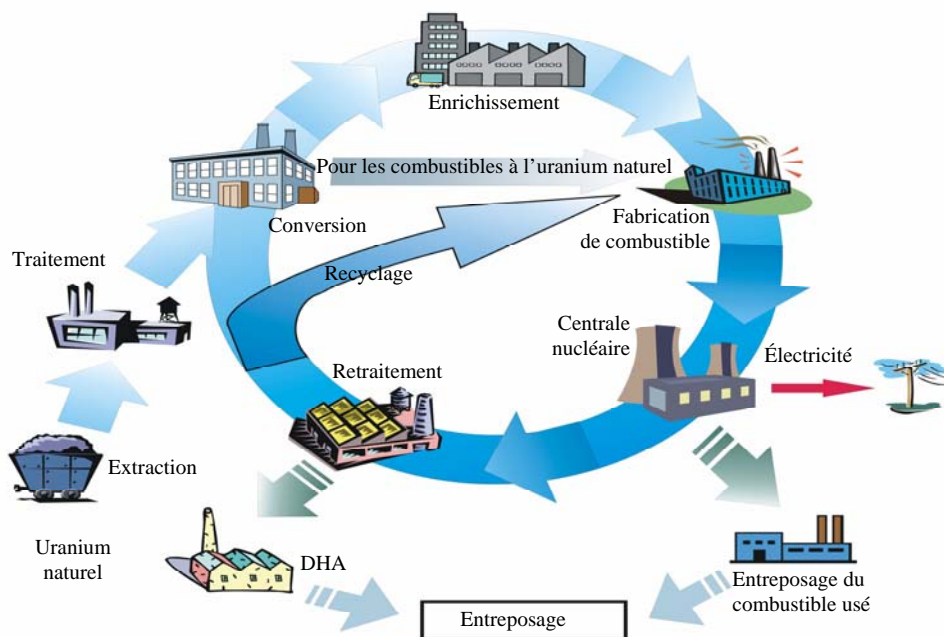


FIG. B-4. Cycle du combustible

38. La fabrication de combustible pour les réacteurs et la gestion du combustible après utilisation (cycle du combustible) nécessitent plusieurs étapes comme le montre la figure B-4. Elles sont normalement divisées d'une part en activités de la partie initiale (extraction, conversion, enrichissement et fabrication du combustible) destinées à produire des assemblages combustibles⁷ à insérer dans le réacteur, d'autre part en activités de la partie terminale ayant trait à la gestion du combustible usé (y compris l'entreposage, le retraitement et le stockage définitif des déchets).

Partie initiale

39. Il y a un marché établi et efficace pour les différents services de la partie initiale. La plupart des activités sont effectuées dans le cadre de contrats à long terme mais il y a aussi un marché libre.

40. L'uranium est extrait dans 18 pays dont sept⁸ concentrent 90 % de la capacité mondiale. À l'heure actuelle, 40 % des besoins en uranium sont couverts par des sources d'approvisionnement secondaires – uranium entreposé ou matières précédemment à usage militaire – et des matières recyclées. Cela a contribué à maintenir le prix de l'uranium à un bas niveau, mais, récemment, il a considérablement augmenté (il a été multiplié par 10 fois cinq ans) en prévision de la hausse de la demande et de la baisse des approvisionnements secondaires. L'accroissement des prix stimule aussi les augmentations des capacités des mines et la prospection d'uranium, avec pour effet potentiel une baisse des prix. Les ressources déterminées dans les minerais sont adéquates pour répondre à la demande actuelle pendant presque 100 ans.

41. L'uranium extrait est transformé en matières chimiques d'alimentation pour le reste de l'industrie, généralement de l'UF₆ à travers un processus appelé conversion. Plus de 90 % de la capacité mondiale se concentre dans six pays⁹ et la capacité mondiale actuelle de conversion est environ le double de celle nécessaire. L'UF₆ faiblement enrichi, qui est approprié pour la fabrication de combustible, est traité comme produit de base sur le marché.

42. La capacité actuelle d'enrichissement est suffisante pour répondre à la demande au cours de la prochaine décennie. Les centrales nucléaires plus anciennes basées sur la technologie de la diffusion gazeuse sont en train d'être remplacées par des centrales basées sur la centrifugation, technologie moins gourmande en énergie. En préparation à la hausse attendue de la demande, des centrales nucléaires sont en cours de construction en France et aux États-Unis d'Amérique.

43. Principal composant de production d'énergie des réacteurs, l'assemblage combustible, produit hautement spécifique sur le plan technologique, est caractérisé par une importante propriété intellectuelle. En outre, il est lui-même un composant de la sûreté générale de la centrale nucléaire et nécessite un processus extensif d'approbation de licence. Les assemblages combustibles de différents fournisseurs ne sont pas facilement interchangeables, mais de nombreuses compagnies d'électricité changent périodiquement de fournisseur pour maintenir la compétition. Les principaux fabricants de combustible sont aussi les principaux fournisseurs de centrales nucléaires ou sont étroitement liés à ces derniers. Les plus grandes capacités de fabrication de combustible se trouvent en Allemagne, en Fédération de Russie, en France et aux États-Unis, mais les combustibles sont fabriqués dans au moins sept autres pays, souvent sous licence d'un des principaux fournisseurs.

⁷ La plupart des réacteurs utilisent de l'uranium faiblement enrichi dont le taux varie de 2 à 5 %. Quelques-uns d'entre eux (RELP) n'utilisent pas d'uranium enrichi.

⁸ Australie, Canada, Fédération de Russie, Kazakhstan, Namibie, Niger, et Ouzbékistan.

⁹ Canada, Chine, États-Unis d'Amérique, France, Russie et Royaume-Uni.

Partie terminale

44. Alors que certains pays considèrent le combustible usé comme des déchets à stocker en tant que des déchets de haute activité (DHA), d'autres y voient des ressources qui peuvent être retraitées et réutilisées. Il y a actuellement un marché pour le retraitement et la fabrication de combustible à mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium (MOX) mais pas pour l'entreposage ou le stockage définitif.

45. Pour l'une et l'autre stratégies, le combustible usé est d'abord entreposé dans la piscine du réacteur puis dans des entrepôts séparés sur le site du réacteur ou dans une installation centrale. Alors que la plus grande partie du combustible est entreposée dans des piscines, la méthode de plus en plus fréquente actuellement consiste à utiliser des installations modulaires d'entreposage comme des châteaux de transport ou des casemates. La durée d'entreposage prévue dépend du moment où le combustible peut être transféré pour le retraitement ou le stockage définitif. On prévoit des durées d'entreposage de plusieurs décennies dans la plupart des pays.

46. À l'heure actuelle, environ 15 % de tout le combustible usé est retraité pour récupérer et recycler l'uranium et le plutonium. Le retraitement est effectué en Fédération de Russie, en France, au Japon et au Royaume-Uni, et des quantités limitées de combustible de RELP sont retraitées en Inde. Seule environ 50 % de la capacité actuelle de retraitement est utilisée compte tenu des incertitudes qui planent sur l'utilisation future des matières retraitées. L'uranium et le plutonium sont surtout réutilisés (sous forme de MOX) dans les REO, mais la mise en œuvre de réacteurs rapides ou d'autres systèmes avancés est en train d'être activement examinée dans un certain nombre de pays pour permettre d'utiliser au maximum les ressources d'uranium à travers un cycle du combustible fermé. Les cycles du combustible fermés peuvent aussi entraîner une baisse de la radiotoxicité des déchets. Pour l'heure, la plupart des matières retraitées sont conservées en entreposage.

47. Que le combustible soit retraité ou non, il restera des déchets de haute activité à longue période qu'il faudra entreposer de manière sécurisée. Après retraitement, les déchets sont, dans de nombreux cas, rapatriés dans le pays où le combustible a été utilisé. À l'heure actuelle, ces matières sont entreposées, à l'instar du combustible usé.

B.5. Gestion des déchets radioactifs et déclassé

48. Les déchets radioactifs sont produits à différents stades du cycle du combustible, et peuvent prendre la forme de liquides, de gaz ou de solides radioactifs avec des niveaux d'activité extrêmement variés. Ils sont classés en déchets de faible, moyenne ou haute activité selon leur niveau d'activité et la stratégie future de gestion et de stockage définitif. Le traitement, le conditionnement et l'entreposage à long terme de toutes les sortes de déchets sont des technologies mûres normalement mises en œuvre dans les installations nucléaires où les déchets ont été produits. Des périodes de stockage de 50 ans ou plus ne sont pas inhabituelles. Cela permet de la souplesse pour les décisions relatives au stockage définitif.

49. Les déchets de faible ou moyenne activité sont stockés à l'échelle industrielle dans plusieurs États Membres et la plupart des experts techniques estiment que les technologies utilisées sont conformes aux prescriptions de sûreté. Toutefois, plusieurs pays qui exploitent des centrales nucléaires ne sont pas encore en mesure de choisir le site et de construire des installations de stockage définitif de ce type de déchets, essentiellement parce que l'idée n'est acceptée ni sur le plan politique ni par le public.

50. La plupart des experts techniques estiment qu'il faudra probablement stocker les DHA et le combustible usé dans des dépôts en formations géologiques profondes. Il n'y en a pas encore, mais les États-Unis d'Amérique, la Finlande, la France et la Suède sont très avancés dans leur élaboration.

L'expérience indique qu'il faudra plusieurs décennies pour choisir le site et mettre en place ce type de dépôt, et aucun n'entrera probablement en exploitation avant 2020.

51. Les réacteurs de puissance doivent être déclassés lorsqu'ils arrivent à la fin de leur cycle de vie. Étant donné que certaines de leurs parties sont contaminées par la radioactivité, il faudra démanteler ces réacteurs de manière contrôlée et prendre soin des déchets radioactifs. Le moment du démantèlement dépend de plusieurs facteurs, y compris les considérations de radioprotection, la disponibilité du financement et d'installations de stockage définitif. Il ressort des données de l'Agence que 117 réacteurs de puissance ont été jusque-là mis à l'arrêt. Dix d'entre eux ont été complètement démantelés et leurs sites ont été libérés pour un usage public sans restriction, et 32 sont en cours de démantèlement avant la libération éventuelle du site. Dix-sept ont été partiellement démantelés et mis en attente sûre pour un entreposage à long terme et 34 autres sont en train d'être démantelés avant d'être mis en attente sûre de longue durée. Le reste est en train d'être préparé pour le démantèlement, y compris le retrait du combustible usé et la décontamination. Les déchets radioactifs provenant du déclassement sont de faible ou moyenne activité et peuvent être manipulés et stockés en tenant compte de ce facteur. Des méthodes spéciales, telles que le stockage intact, ont été utilisées avec succès pour certains composants de très grande taille.

B.6. Capacité industrielle

52. Le nombre de centrales nucléaires en construction a atteint un maximum en 1979, soit 233, contre 30 à 40 pour les 15 dernières années (voir la figure B-6 ci-dessous). L'industrie des approvisionnements nucléaires s'est adaptée au cours des 25 dernières années à travers des regroupements. La question s'est posée de savoir si la capacité disponible permettra de répondre à la demande à court terme au cas où les projections de forte croissance de l'électronucléaire se vérifieraient.

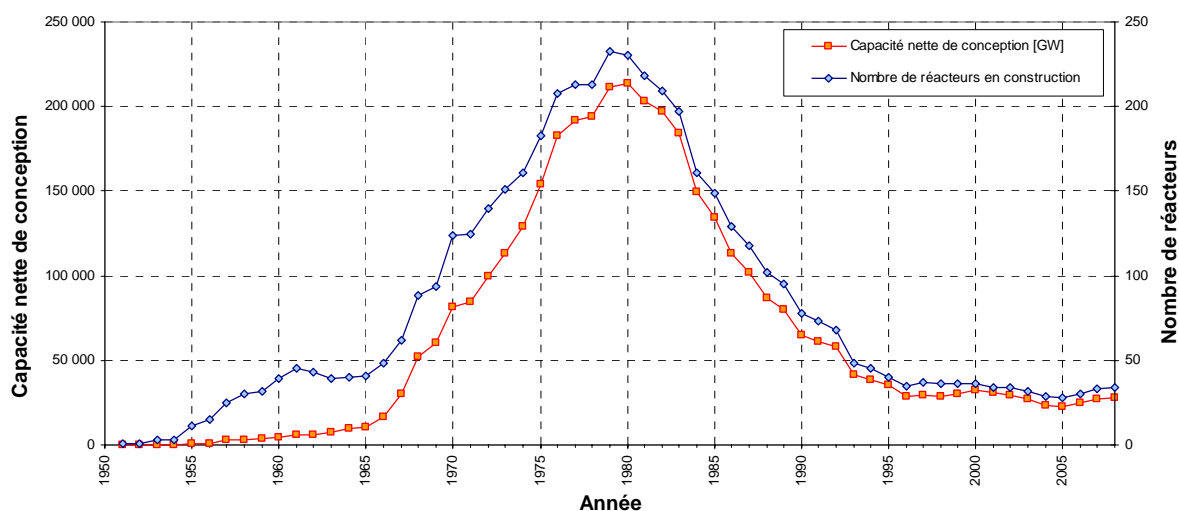


FIG. B-5. Nombre de réacteurs, et capacité totale des réacteurs, en construction de 1951 à 2008.

53. Au cours de la période du pic de construction, il y avait de grandes sociétés de fourniture de systèmes nucléaires dans les pays suivants : Allemagne, Canada, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, France, Japon, Royaume-Uni, Suède et Suisse. Les fournisseurs de systèmes nucléaires sont aujourd'hui dans les pays suivants : Canada, Chine, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, France, Inde, Japon et République de Corée. D'autres fournisseurs potentiels comme l'Argentine et

l'Afrique du Sud sont en train d'élaborer des modèles, mais les concepteurs des circuits d'alimentation en vapeur nucléaire disponibles actuellement sont réduits à un petit groupe qui travaille de plus en plus étroitement, par exemple à travers la collaboration entre Areva et Mitsubishi, GE et Hitachi, et Toshiba et Westinghouse.

54. Un changement similaire s'est opéré parmi les ingénieurs architectes¹⁰. Le nombre de sociétés ayant une expérience récente dans la gestion de la construction d'une centrale nucléaire complète a diminué faute de commandes, en particulier en Amérique du Nord et en Europe. Nombre de sociétés qui étaient des organisations influentes dans l'industrie nucléaire en 1980 s'en sont aujourd'hui complètement retirées, ont fusionné avec d'autres dans le domaine nucléaire ou ont recentré leurs méthodes de travail sur les activités liées au déclassement et à la gestion des déchets, secteurs en expansion ces dernières années. Cela s'est traduit par la diminution du nombre de sociétés, et de leurs pays d'accueil, capables de gérer la construction d'une centrale nucléaire complète. Inversement, compte tenu de la croissance de leur capacité nucléaire à travers la disponibilité de nombreuses compétences et capacités, la Chine, l'Inde et la République de Corée pourraient contribuer davantage à la satisfaction des besoins mondiaux dans les compétences de construction nucléaire.

55. Certains faits montrent qu'il y a des doutes en ce qui concerne la capacité de l'industrie de répondre à la demande de composants clés (tels que les cuves sous pression et les principales pièces forgées) qui peuvent être fournies par des installations en place dans les pays suivants : Chine, Fédération de Russie, France, Japon, République de Corée et République tchèque. Par exemple, des compagnies d'électricité des États-Unis d'Amérique ont déjà commandé des composants clés pour des centrales nucléaires qui n'ont pas encore été approuvées pour éviter que des retards de livraison de ces composants ne compromettent le calendrier de construction. La capacité de fabrication devra augmenter pour que les attentes croissantes concernant l'augmentation du nombre de nouvelles centrales nucléaires puissent être comblées. C'est peut-être ce qui est déjà en train de se passer. La Chine a annoncé qu'elle avait la capacité de produire du matériel lourd pour six grands réacteurs par an, même si cela permettra surtout de répondre à ses propres besoins nationaux.

B.7. Applications non électriques

56. L'énergie consommée dans le monde sert surtout au chauffage et aux transports. L'énergie nucléaire n'est actuellement que très peu utilisée pour des applications non électriques. Le dessalement de l'eau de mer grâce à l'énergie nucléaire a été démontrée et presque 200 années-réacteur d'expérience d'exploitation ont été accumulées dans le monde. Le chauffage urbain met en jeu le chauffage des locaux et de l'eau à travers un système de distribution habituellement fourni en mode de cogénération dans lequel la chaleur résiduelle de la production d'énergie sert de source. Le chauffage urbain est assuré par la chaleur des centrales nucléaires dans plusieurs pays (Bulgarie, Hongrie, Roumanie, Fédération de Russie, Slovaquie, Suède, Suisse et Ukraine). En ce qui concerne la production d'hydrogène, le Japon, les États-Unis d'Amérique et d'autres pays ont des programmes de recherche-développement, mais il n'y a pas d'exploitation commerciale.

¹⁰ Un ingénieur architecte est normalement responsable de la gestion du projet, des achats, de l'ingénierie du projet, de l'installation, du déclassement, du contrôle de la qualité, ainsi que du calendrier et du contrôle des coûts pendant la construction et le démarrage.

C. Perspectives des applications futures de l'énergie nucléaire

57. Les applications de l'énergie nucléaire suscitent ces dernières années des attentes croissantes dans de nombreux pays. On peut examiner les perspectives en considérant les pays qui possèdent actuellement des centrales nucléaires en exploitation, ou ceux qui envisagent d'introduire l'électronucléaire. Les facteurs qui peuvent influencer les positions nationales sur les applications de l'énergie nucléaire, les projections internationales de son utilisation future, et ses possibilités d'applications non électriques sont en outre examinés ci-dessous.

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

58. Dans 30 pays ayant des centrales nucléaires en exploitation, celles-ci assurent de 78 % de la consommation nationale d'électricité en France à 3 % en Inde et 2 % en Chine. On s'attend à ce que l'expansion future de l'électronucléaire dans le monde dépende essentiellement de ces pays. Comme discuté plus loin, la différence entre les projections basse et haute de l'Agence s'explique à la fois par la capacité totale installée dans ces 30 pays et l'augmentation du nombre de pays qui utilisent l'électronucléaire. En termes de capacité installée, l'accroissement total de la projection haute est essentiellement dû aux augmentations enregistrées dans ces 30 pays, en particulier l'Inde, la Chine et d'autres pays d'Extrême-Orient, plus la Fédération de Russie et des pays d'Europe et d'Amérique du Nord.

59. Le tableau C-1 présente un examen des informations disponibles pour donner une idée de l'évolution probable de la situation en ce qui concerne ces 30 pays. Ces informations comprennent des données figurant dans les exposés présentés par les États Membres à la Conférence générale de 2007 et dans d'autres déclarations publiques de leurs positions. Il en ressort que l'expansion des programmes nucléaires actuels est aujourd'hui largement concentrée en Asie où l'on devrait également enregistrer la plus forte hausse des besoins énergétiques. On s'attend en outre à ce que de nombreux pays d'Europe et l'Amérique du Nord développent leurs programmes nucléaires, même si peu de nouvelles constructions ont démarré.

60. Chacun des 30 pays a été rangé dans l'un des groupes du tableau C-1, ce qui donne une indication de leurs intentions futures attendues.

Tableau C-1. Positions des pays ayant des centrales nucléaires en exploitation

Description du groupe	Nombre de pays
Pays qui envisagent d'abandonner progressivement les centrales nucléaires à mesure que celles actuellement en exploitation arrivent à la fin de leur cycle de vie ou atteignent une production cumulative d'énergie convenue	6
Pays qui envisagent d'autoriser la proposition de nouvelles centrales nucléaires, mais sans incitation à cet effet	5
Pays qui envisagent d'appuyer l'introduction de nouvelles centrales nucléaires	6
Pays qui appuient la construction d'une nouvelle centrale nucléaire	4
Pays qui appuient la mise en place d'un nouveau programme de centrales nucléaires	9

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

61. Comme le montre le tableau C-2, quelque 43 États Membres ont exprimé au cours des deux dernières années à l'AIEA, à travers des demandes de participation à des projets de coopération technique, leur intérêt pour l'examen de l'introduction de l'électronucléaire¹¹.

Tableau C-2. Positions des pays sans centrale nucléaire en exploitation

Description du groupe	Nombre de pays
Pays qui n'envisagent pas d'introduire de centrale nucléaire, mais sont intéressés par l'examen des questions liées aux programmes électronucléaires	16
Pays qui envisagent un programme nucléaire pour répondre à des besoins énergétiques déterminés avec une forte indication de l'intention d'aller de l'avant	14
Pays qui se préparent activement pour un possible programme électronucléaire sans décision finale	7
Pays qui ont décidé d'introduire l'électronucléaire et commencé à préparer l'infrastructure appropriée	4
Pays qui ont préparé un appel d'offres pour la fourniture d'une centrale nucléaire	1
Pays qui ont commandé une nouvelle centrale nucléaire	
Pays où une nouvelle centrale nucléaire est en construction	1

62. Un pays, la République islamique d'Iran, est en train de construire sa première centrale nucléaire. Douze pays se préparent activement pour l'électronucléaire, et 38 autres ont indiqué leur intérêt pour la possible introduction d'une centrale nucléaire.

63. Sur les 51 pays qui expriment de l'intérêt pour l'introduction de l'électronucléaire, 17 sont dans la région Asie et Pacifique (du Moyen-Orient au Pacifique), 13 dans la région Afrique, 11 en Europe et neuf en Amérique latine.

64. Les données des tableaux C-1 et C-2 sont globalement en harmonie avec les tendances des projections basse et haute de l'Agence décrites plus bas, à savoir que d'importantes incertitudes persistent dans les projections concernant l'électronucléaire, que l'augmentation attendue dans l'utilisation de cette forme d'énergie sera plus due à l'expansion dans les pays possédant déjà l'électronucléaire que dans ceux qui se lancent dans des programmes électronucléaires, et qu'une vingtaine de nouveaux pays pourraient avoir leurs premières centrales nucléaires à l'horizon 2030 dans la projection haute contre environ cinq dans la projection basse.

¹¹ En outre, une dizaine d'autres pays avaient précédemment indiqué leur intérêt pour l'introduction de l'électronucléaire mais n'ont pas fait de demande officielle d'assistance de coopération technique.

C.3. Collaboration régionale

65. Des actions de coopération sur l'introduction de nouvelles centrales nucléaires sont envisagées dans certaines régions. Les États baltes prévoient un projet régional au site d'Ignalia en Lituanie. Ceux du Conseil de coopération du Golfe étudient la possibilité d'une approche régionale pour l'introduction d'un programme nucléaire. L'Argentine et le Brésil, qui possèdent tous deux déjà des programmes électronucléaires, envisagent d'accroître la coopération dans le domaine nucléaire, y compris en élaborant le concept d'un modèle de centrale nucléaire pour les deux pays et, si possible, pour d'autres pays de la région.

C.4. Facteurs potentiels de l'introduction de l'électronucléaire

66. L'expression « attentes croissantes » est la plus appropriée pour décrire les perspectives actuelles de l'électronucléaire, dans un monde confronté aux problèmes de la forte augmentation de la demande énergétique, de la hausse des prix de l'énergie, des préoccupations concernant la sécurité des approvisionnements énergétiques et des pressions croissantes en matière d'environnement. Plusieurs facteurs sont à l'origine de ces attentes croissantes concernant l'électronucléaire, dont notamment :

- L'augmentation des besoins énergétiques
- La sécurité de l'approvisionnement énergétique
- Les préoccupations et les contraintes relatives à l'environnement
- La hausse et l'instabilité des prix des combustibles fossiles
- L'amélioration de la compétitivité économique relative de l'électronucléaire
- L'expérience accrue et la bonne performance de l'électronucléaire
- L'intérêt que suscitent les applications avancées de l'énergie nucléaire.

67. La présente section examine ces facteurs potentiels de la croissance de l'électronucléaire en général, étant entendu que l'attrait relatif de celle-ci par rapport aux autres formes d'énergie dépend des situations. D'une manière générale, l'électronucléaire est plus attrayante lorsque la demande énergétique croît rapidement, que les autres formes d'énergie sont rares ou chères, que la sécurité de l'approvisionnement énergétique est une priorité, que la réduction de la pollution et des gaz à effet de serre est une priorité, ou que le financement peut paraître à plus long terme.

Prix des combustibles fossiles

68. D'après la publication *Perspectives énergétiques mondiales 2007* de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), en 2005, 40 % de l'électricité mondiale était produite par le charbon, 20 % par le gaz naturel, 16 % par l'énergie hydraulique, 15 % par l'énergie nucléaire, 7 % par le pétrole et 2 % par des sources renouvelables autres qu'hydrauliques. On s'attend à voir la part du pétrole dans cette production baisser, et celles du charbon et du gaz naturel augmenter. Ces derniers seront les principales sources d'énergie de substitution de l'électronucléaire à court et à moyen terme. Les prix du charbon sont instables et ont augmenté dans différentes régions du monde de 50 à 125 % entre 2003 et 2006. De même, ceux du gaz ont augmenté de jusqu'à 130 % au cours de la même période. Ces changements font partie des facteurs à l'origine des attentes croissantes concernant l'électronucléaire. Les prix de l'uranium ont aussi augmenté et ont été instables ces dernières années. La différence toutefois est que les coûts de l'uranium représentent une part plus faible des coûts généraux de production que les prix du gaz et du charbon. Un doublement des prix des combustibles

augmente de 35 à 45 % les coûts de production de l'électricité produite par le charbon et de 70 à 80 % ceux de l'électricité produite par le gaz naturel. En revanche, un doublement des prix de l'uranium augmente les coûts de la production électronucléaire d'environ 5 à 10 %.

Sécurité de l'approvisionnement énergétique

69. Les préoccupations concernant la sécurité de l'approvisionnement énergétique étaient importantes dans les programmes d'expansion du nucléaire de la France et du Japon au moment des chocs pétroliers des années 1970. Elles constituent l'un des arguments avancés aujourd'hui dans les pays qui envisagent l'option électronucléaire. Au Royaume-Uni par exemple, la sécurité de l'approvisionnement énergétique était une question majeure dans la réévaluation de la situation énergétique nationale et un facteur essentiel dans le changement d'approche en ce qui concerne l'électronucléaire au cours des deux dernières années.

70. Qui plus est, l'électronucléaire a deux caractéristiques qui, d'une manière générale, augmentent encore la résilience. Le combustible de base, l'uranium, est disponible dans plusieurs pays producteurs, et les quantités nécessaires sont faibles, ce qui facilite la constitution de réserves stratégiques. Dans la pratique, la tendance ces dernières années est caractérisée 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. Mais pour les pays qui jugent important d'établir, à un coût relativement faible, des réserves stratégiques permettant d'entreposer suffisamment de combustible pour plusieurs années d'exploitation de centrales nucléaires, cette option reste disponible.

Environnement

71. Au point de production d'électricité, l'électronucléaire ne produit pas d'émissions qui dégradent la qualité de l'air local, causent une acidification régionale ou contribuent aux changements climatiques. Sa chaîne complète de production, de l'extraction des ressources au stockage définitif des déchets, en passant par la construction des réacteurs et des installations, rejette la même quantité d'équivalent carbone par kilowattheure que la production d'énergie éolienne et hydraulique. L'électronucléaire est de plus en plus citée comme alternative technologique positive aux sources d'énergie qui émettent des gaz à effet de serre. Une valeur économique concrète a été attribuée à ses faibles émissions de gaz à effet de serre avec l'entrée en vigueur du Protocole de Kyoto en février 2005. Sur les neuf technologies d'atténuation des effets de la production d'électricité évaluée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), l'électronucléaire a de loin le plus grand potentiel d'atténuation et la deuxième plus faible fourchette de réduction des coûts d'atténuation (après l'énergie hydraulique). Il convient toutefois de noter que même avec les programmes les plus ambitieux d'expansion nucléaire mondiale, la croissance de l'électronucléaire ne suffira pas à elle seule pour stabiliser les émissions de gaz à effet de serre.

Bilans de performance et de sûreté

72. Ces dernières années, la performance et les bilans de sûreté se sont considérablement améliorés et restent élevés¹², et les centrales nucléaires bien gérées se sont révélées assez rentables. L'amélioration du facteur mondial moyen de disponibilité énergétique et la réduction du nombre d'arrêts de réacteur non programmés reflètent cette réalité¹³. Toutefois, de nombreux exploitants peuvent encore mieux faire dans ces deux domaines, ce qui devrait améliorer encore la situation. Les bons bilans de sûreté et de performance enregistrés au cours des deux dernières décennies, la rentabilité accrue qui en est

¹² Rapport d'ensemble sur la sûreté nucléaire pour l'année 2007 (GOV/2008/2), 22 janvier 2008.

¹³ Association mondiale des exploitants nucléaires (WANO), *Indicateurs de performance WANO en 2006, 2007*.

résultée et les espoirs d'amélioration accrue contribuent tous aux attentes croissantes concernant l'électronucléaire.

C.5. Projections de la croissance électronucléaire

73. L'augmentation générale des projections concernant l'électronucléaire publiées régulièrement ces dernières années par plusieurs organisations s'explique par les raisons ci-dessus.

74. Depuis 1981, l'Agence publie chaque année des projections sur l'utilisation, de l'énergie, de l'électricité et de l'électronucléaire dans le monde¹⁴. Les estimations sont élaborées en étroite collaboration avec plusieurs organisations internationales, régionales et nationales et des experts internationaux dans les domaines des statistiques et des projections relatives à l'énergie. Le tableau C-3 présente les projections actualisées les plus récentes de la capacité de production électronucléaire, selon les régions du monde. Dans la projection basse, la capacité mondiale augmente de 372 GWe en 2007 à 473 GWe en 2030. Dans la projection haute, elle augmente pour atteindre 748 GWe.

Tableau C-3. Estimations de la capacité de production d'électricité d'origine nucléaire (GWe)

Région	2007	2010		2020		2030	
		Basse	Haute	Basse	Hausse	Basse	Hausse
Amérique du Nord	113,2	113,5	114,5	121,4	127,8	131,3	174,6
Amérique latine	4,1	4,1	4,1	6,9	7,9	9,6	20,4
Europe occidentale	122,6	119,7	121,3	92,1	129,5	73,9	150,1
Europe orientale	47,8	48,2	48,3	72,1	94,7	81,2	119,4
Afrique	1,8	1,8	1,8	3,1	4,5	4,5	14,3
Moyen-Orient et Asie du Sud	4,2	7,6	10,1	12,5	24,3	15,9	41,5
Asie du Sud-Est et Pacifique	0	0	0	0	1,2	1,2	7,4
Extrême-Orient	78,5	81,3	83,1	129,2	151,8	155,7	219,9
Total mondial	372,2	376,3	383,1	437,4	541,6	473,2	747,5

75. Il ressort du tableau C-3 que la plus grande expansion de la capacité nucléaire sera celle de l'Extrême-Orient. Une importante expansion est aussi prévue pour le Moyen-Orient et l'Asie du Sud, région qui inclut l'Inde. La région où l'incertitude est la plus grande, c'est-à-dire avec la plus grande différence entre les projections basse et haute, est l'Europe occidentale. Bien qu'une vingtaine de nouveaux pays aient été pris en compte pour 2030, l'accroissement mondial de la projection haute est essentiellement due aux augmentations dans les 30 pays qui possèdent déjà l'électronucléaire. La projection basse inclut aussi quelque cinq nouveaux pays qui pourraient avoir leurs premières centrales nucléaires en exploitation à l'horizon 2030.

76. Les projections de l'Agence ont changé ces dernières années. En particulier, la projection hausse du taux d'augmentation de la capacité installée des centrales nucléaires entre 2020 et 2030 a doublé par rapport aux projections de 2001, ce qui reflète un optimisme accru en ce qui concerne l'électronucléaire dans certaines régions. La projection basse de 2001 montre une baisse de la capacité installée dans la mesure où les centrales nucléaires étaient mises hors service sans être remplacées. Aujourd'hui, même la projection basse prévoit une faible croissance continue de cette capacité.

¹⁴ Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) – *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030*, collection Données de référence n° 1, 2008.

77. D'autres études prévoient aussi une augmentation de la capacité installée des centrales nucléaires.

78. Les *Perspectives énergétiques mondiales* publiées par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'OCDE donnent aussi des projections régulièrement actualisées sur l'électronucléaire. Elles présentent toujours un scénario de référence, plutôt que des projections basse et haute comme le fait l'Agence. Des scénarios alternatifs sont aussi souvent examinés. Le scénario de référence prévoit l'évolution de la demande et de l'offre d'énergie dans l'hypothèse de la poursuite des politiques actuelles. Pour l'électronucléaire, cette projection est donc généralement proche de la projection basse de l'Agence. Elle a légèrement augmenté ces dernières années, et le dernier « scénario alternatif » de l'AIE, qui est basé sur l'hypothèse de la mise en place de mesures supplémentaires pour tenir compte des préoccupations relatives à la sécurité énergétique et aux changements climatiques, prévoit une augmentation de 25 % de la production électronucléaire en 2030 par rapport au scénario de référence¹⁵.

79. D'autres prévisions font état d'une très large fourchette en ce qui concerne l'utilisation future de l'énergie nucléaire. L'Association nucléaire mondiale publie tous les deux ans des scénarios pour les projections haute, basse et de référence de la capacité nucléaire. Dans sa mise à jour de 2007, la fourchette, qui va de 285 GWe en 2030 à 730 GWe, est supérieure à la différence entre les projections basse et haute de l'AIEA, ce qui indique une baisse ou un doublement de la production électronucléaire.

80. Le GIEC a publié en 2000 une série de 40 scénarios d'émissions mondiales de gaz à effet de serre jusqu'en 2100. Ceux-ci présentent un nombre extrêmement varié de destinées possibles pour l'électronucléaire. La part de celle-ci dans l'approvisionnement mondial en énergie primaire augmente dans la plupart de ces scénarios de 6 à 7 % aujourd'hui à 10 à 40 %. Le rapport du GIEC conclut aussi que la contribution potentielle de l'énergie d'origine nucléaire au bouquet énergétique mondial pourrait atteindre 18 % en 2030, chiffre comparable à la projection haute de l'Agence pour cette année.

Incertitudes dans les projections

81. Comme on peut le voir ci-dessus, la fourchette des prévisions de l'utilisation future de l'énergie d'origine nucléaire reste importante. Plusieurs facteurs influencent la mise en œuvre future des programmes électronucléaires et donc la précision des projections de l'utilisation de cette forme d'énergie.

- L'électronucléaire a déclenché plus de passions politiques que les autres options. Celles-ci – gaz naturel, charbon, énergie hydraulique, pétrole, énergies renouvelables – n'ont rien de comparable aux interdictions et aux politiques d'abandon progressif adoptées par plusieurs pays pour l'électronucléaire.
- Étant donné la très forte concentration des coûts dans la partie initiale des projets de centrales nucléaires, les taux d'intérêt élevés ou les incertitudes qui les entourent affaibliront plus l'étude de rentabilité de ces projets que celle des projets ayant trait aux autres options.
- Cette structure des coûts signifie en outre que les retards liés à la réglementation, au cours de la construction, coûteront plus cher pour l'énergie nucléaire que pour les autres options. Dans les pays où les processus d'autorisation ont été relativement peu testés ces dernières années, les investisseurs courent dans ce domaine des risques potentiellement plus onéreux avec l'électronucléaire qu'avec ces autres.

¹⁵ Agence internationale de l'énergie (AIE), *Perspectives énergétiques mondiales 2007*, Paris, 2007.

- La fermeté, l'étendue et la durabilité des engagements en faveur de la réduction des émissions de gaz à effet de serre influenceront aussi sur la croissance de la production électronucléaire.
- L'industrie nucléaire est une industrie mondiale avec une bonne coopération internationale et les conséquences d'un accident, où qu'il survienne, y seront ressenties partout dans le monde.
- De même, un acte de terrorisme nucléaire *pourrait* avoir un impact plus important qu'un acte de terrorisme comparable dirigé contre les autres combustibles.
- Alors qu'une centrale nucléaire en elle-même ne contribue pas beaucoup au risque de prolifération, les craintes de prolifération peuvent influencer l'acceptation publique et politique de l'électronucléaire.
- Les déchets radioactifs de haute activité sont une caractéristique unique de l'électronucléaire par rapport aux autres sources d'énergie. L'industrie électronucléaire pourrait ressentir un impact disproportionné si des problèmes graves surviennent dans l'un des programmes de dépôt les plus avancés (c'est-à-dire aux États-Unis, en Finlande, en France et en Suède).

C.6. Attentes et potentialités des applications non électriques

82. L'électronucléaire peut aussi fournir de la chaleur (ou une combinaison de chaleur et d'électricité) pour une variété de processus industriels (fabrication de papier, de produits chimiques ou d'engrais, et raffineries), pour la production d'un transporteur d'énergie (hydrogène) ou pour améliorer l'accès aux combustibles fossiles (à travers la liquéfaction du charbon ou l'extraction de pétrole de sables asphaltiques). Toutefois, comme le montre la figure C-1, la plupart des réacteurs (REO) ne produisent pas de vapeur ou de chaleur disponible à des températures qui permettraient d'introduire certaines de ses applications supplémentaires. En particulier, il faut utiliser des réacteurs à haute température et des matériaux appropriés, lesquels sont en train d'être élaborés comme indiqué plus loin à la section F.

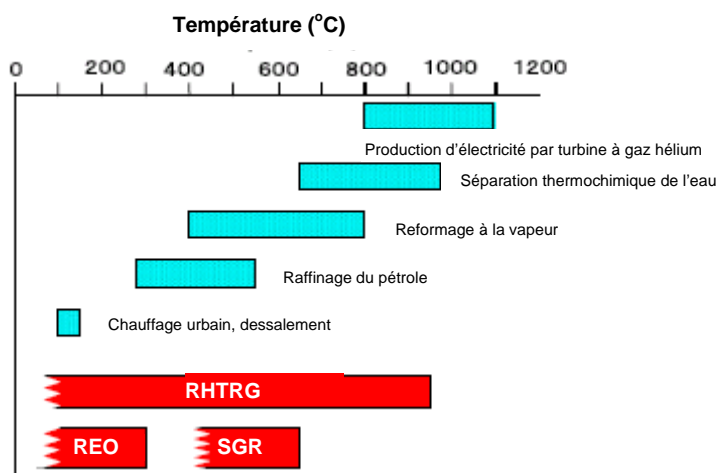


FIG. C-1. Amplitude des températures de fonctionnement et besoins en matière de chaleur industrielle
Dessalement

83. Le dessalement nucléaire est aujourd'hui utilisé dans un nombre très limité de pays. Les projections du *Rapport sur la mise en valeur des ressources en eau de la planète* des Nations Unies indiquent que le nombre de victimes du stress hydrique et de la rareté de l'eau augmentera pour atteindre 3,5 milliards de personnes d'ici 2025. En conséquence, les besoins pour les systèmes de dessalement pourraient contribuer à l'extension de l'électronucléaire aux pays du Moyen-Orient ou d'Afrique qui manquent d'eau potable. Le Japon exploite actuellement des usines de dessalement pour

produire de l'eau d'appoint dans 10 centrales nucléaires, plusieurs projets de démonstration sont en cours en Inde, et le Pakistan, la République de Corée et la Fédération de Russie travaillent sur des projets de modèles et de démonstration. D'autres pays étudient la viabilité technique et économique de différents processus.

Transport

84. Le transport contribue largement aux émissions de gaz à effet de serre. Le recours accru à l'énergie nucléaire dans ce secteur pourrait influencer la situation de manière notable. L'électronucléaire peut contribuer plus largement à la production d'électricité pour les véhicules hybrides ou électriques ou les transports publics, et à travers la production d'hydrogène (voir la section E.3 ci-dessous).

D. Enjeux d'une expansion du nucléaire

D.1. Questions clés et tendances en ce qui concerne une expansion du nucléaire à court terme

D.1.1. Sûreté et fiabilité

85. La sûreté et la fiabilité sont essentielles pour un programme électronucléaire efficace. Il faut maintenir la diligence et la vigilance en ce qui concerne l'exploitation des centrales nucléaires et la préparation de la construction de nouvelles centrales. Tout endommagement d'une centrale, tout retard important d'un projet ou toute réduction des normes, que ce soit dans les pays qui exploitent des centrales nucléaires ou dans les pays qui envisagent d'en construire à l'avenir, peut avoir un effet très important sur l'expansion de l'utilisation de l'énergie nucléaire dans le monde. Les efforts visant à réduire les coûts et les délais de construction, évoqués à la section E.1.1, seront donc importants.

D.1.2. Compétitivité économique et financement

86. Les centrales nucléaires sont à plus forte intensité de capital que les autres grandes centrales électriques. Dans le coût total de production de l'électricité d'origine nucléaire, le coût du capital est compensé par un coût plus faible et plus stable du combustible pendant l'exploitation. Les investissements représentent en général quelque 60 % du coût total de production de l'électricité d'origine nucléaire. Comme il faut payer les intérêts sur le capital pendant la construction, la compétitivité de l'électronucléaire est influencée par les retards de construction liés au processus d'autorisation, à des problèmes juridiques ou techniques, ou à la disponibilité d'experts, d'équipements et de composants.

87. Un autre problème à court terme qui affecte la compétitivité économique de l'électronucléaire est le coût des matériaux. Depuis le début de 2007, les coûts des matériaux essentiels comme l'acier et les métaux non ferreux ont augmenté de 50 à 100 % selon l'emplacement, la qualité et la quantité. Les économies asiatiques en croissance rapide consomment des matières premières et poussent à la hausse les prix de l'acier, du béton et d'autres matériaux. Il est vrai que les autres types de centrales font face aux mêmes contraintes, mais le nucléaire pourrait en subir des effets disproportionnés car les coûts sont concentrés dans la phase initiale. D'autres problèmes à court terme affectant la compétitivité économique de l'électronucléaire dans certains pays sont la sensibilité aux retards alors que de nouvelles procédures réglementaires de délivrance de licences intégrées sont appliquées et que l'industrie se remet de décennies de stagnation. D'autres risques économiques sont associés à la phase

d'exploitation, notamment le coût du combustible, le degré de réglementation du marché de l'électricité, et la fiabilité et la performance des centrales.

88. L'économie de l'électronucléaire dépend des situations nationales. La compétitivité économique dépend du coût des investissements, de l'environnement réglementaire, de la disponibilité et du coût de sources de remplacement et des coûts de l'énergie, ainsi que des arguments en faveur de tel ou tel projet. Les coûts de production estimés pour les nouvelles centrales nucléaires (y compris la gestion et l'exploitation de la centrale et le combustible) varient largement, d'un facteur deux, d'un pays à l'autre, allant d'environ 30 \$/MW·h à près de 70 \$/MW·h. À titre de comparaison, les coûts de production pour le gaz vont d'environ 40 \$/MW·h à 65 \$/MW·h. Dans la plupart des pays qui exploitent actuellement des centrales nucléaires, les coûts de production futurs estimatifs pour le nucléaire sont inférieurs à ceux du gaz ou du charbon. Les projections de l'AEN concernant les coûts de production d'électricité montrent que le nucléaire devrait être meilleur marché que le charbon de 10 % ou plus dans sept des dix pays étudiés, et meilleur marché que le gaz de 10 % ou plus dans neuf pays¹⁶.

89. Une caractéristique de l'électronucléaire est que des dépenses considérables sont nécessaires après l'arrêt de la production d'énergie et de revenus pour financer le déclassement des réacteurs et la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs. On estime que le déclassement représente 10 à 15 % des dépenses d'investissement des centrales nucléaires. Les coûts totaux de la gestion des déchets jusqu'au stockage définitif dans un dépôt en service sont du même ordre de grandeur. L'industrie nucléaire utilise des mécanismes et des dispositifs très variés pour s'assurer que ces coûts sont évalués et que les fonds nécessaires sont disponibles le moment venu. En général, ces coûts sont considérés comme des dépenses de fonctionnement et les fonds sont collectés par les exploitants pendant que la centrale produit de l'électricité. Un financement assuré des programmes de gestion des déchets et du combustible usé est un aspect important de l'économie de la production électronucléaire et de la sûreté et de la sécurité d'ensemble du programme nucléaire.

90. L'avantage externe de l'électronucléaire, à savoir des émissions très faibles de gaz à effet de serre, n'a, pour l'heure, que peu de valeur économique pour les investisseurs, mais cela pourrait changer si le nucléaire était inclus dans les mécanismes qui imposent des restrictions ou des taxes sur ces émissions. La compétitivité économique de l'électronucléaire serait améliorée à court terme si le nucléaire était inclus dans le système mondial d'échange de quotas d'émission visant à réduire les gaz à effet de serre.

D.1.3. Perception du public

91. La perception de l'électronucléaire par le public est fortement influencée par les préoccupations touchant à la sûreté, la prolifération et la gestion des déchets. Après les accidents nucléaires de Three Mile Island et de Tchernobyl, le public s'est inquiété non seulement des dangers des rayonnements pour les personnes et l'environnement, mais aussi de la rapidité et de la précision de l'information fournie. Les questions de prolifération et de terrorisme nucléaire continuent de jouer un rôle dans la perception que le public a de l'électronucléaire.

92. La perception du public dépend aussi de nombreux facteurs propres à une société donnée, comme la situation énergétique locale, l'expérience nationale dans le secteur nucléaire et les perceptions nationales des questions d'environnement. L'évolution de la perception de l'électronucléaire par le public est due en partie aux bonnes performances de l'énergie nucléaire au cours des 20 dernières années et en partie au fait que l'énergie nucléaire est perçue comme pouvant

¹⁶ Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN), *Coûts prévisionnels de production de l'électricité : Mise à jour 2005*, Paris (2005).

apporter une précieuse contribution à la réduction du réchauffement global. Le bon déroulement des activités de déclasserment et de gestion des déchets peut aussi accroître la confiance du public. Dans certains pays, la perception du public peut être fortement influencée par le manque de solutions de remplacement concrètes d'un coût raisonnable, et par l'observation de la contribution de l'électronucléaire à l'élévation du niveau de vie dans d'autres pays.

93. Pour tout pays qui envisage ou qui utilise l'électronucléaire, une communication ouverte avec toutes les parties prenantes (décideurs, public, médias et pays voisins) sur toutes les questions relatives à l'électronucléaire (avantages, risques, engagements et obligations) est essentielle pour instaurer et maintenir la confiance dans le programme électronucléaire.

D.1.4. Ressources humaines

94. La disponibilité de ressources humaines est un enjeu crucial pour l'expansion et la croissance de l'électronucléaire. L'industrie nucléaire doit recruter et former un grand nombre de personnes qualifiées simplement pour remplacer les personnes très expérimentées qui partent à la retraite. Davantage de ressources humaines seront nécessaires pour appuyer l'expansion prévue ou le lancement de nouveaux programmes électronucléaires. Ensemble, ces enjeux sont considérables.

95. Pour les pays qui lancent un programme nucléaire, un moyen éprouvé de faire en sorte que ceux qui seront chargés du fonctionnement et de la maintenance des premières centrales obtiennent les compétences requises est de leur faire acquérir de l'expérience dans des installations utilisant la même technologie. C'est grâce à cette formation pratique et à cette expérience que sont transférées les compétences et la culture de sûreté indispensables dans l'industrie électronucléaire. Le grand nombre des départs en retraite coïncidant avec les projets d'expansion, disposer de suffisamment de personnel ayant l'expérience requise pour procéder à ces tâches peut constituer un défi majeur.

96. La plupart des responsables du secteur nucléaire reconnaissent que la formation du personnel doit être soigneusement planifiée. Toutefois, il n'est pas essentiel de disposer de l'ensemble du personnel avant le début de la construction, car les délais de construction d'une centrale, qui se mesurent en années, laissent le temps de former la plupart des spécialistes non nucléaires.

D.1.5. Gestion du combustible utilisé et des déchets

97. La gestion du combustible nucléaire utilisé et des déchets de faible ou moyenne activité (DFMA) nouveaux ou supplémentaires doit être prise en considération au moment de la planification de l'expansion ou de l'introduction de l'électronucléaire, et une politique et une stratégie de mise en œuvre et de financement doivent être élaborées.

98. La gestion du combustible utilisé et le stockage définitif des déchets radioactifs sont régulièrement présentés comme des défis pour l'expansion de l'électronucléaire. Bien que, d'un point de vue technique, le combustible utilisé et les DFMA puissent être entreposés en toute sûreté pendant longtemps, certains pays peuvent exiger que soit arrêtée une solution permanente pour les déchets avant de décider de l'expansion de l'électronucléaire. Le traitement des DFMA et l'entreposage de longue durée des DFMA et du combustible utilisé sont des techniques éprouvées, tout comme l'est le stockage définitif des DFMA. Néanmoins, l'expérience montre que l'on peut rencontrer des difficultés à faire accepter par le public la construction d'une nouvelle installation de stockage définitif de DFMA.

99. Le combustible nucléaire utilisé est soit retraité en vue de sa réutilisation soit considéré comme un déchet selon les conditions économiques. Le retraitement consiste à séparer le plutonium et l'uranium des déchets pour les recycler en tant que combustible à mélange d'oxydes (MOX). Les déchets de haute activité (DHA) restants doivent être mis en stockage définitif sécurisé. À l'heure actuelle, seuls quelques pays retraitent et recyclent leur combustible (cycle du combustible fermé). D'autres pays ont

décidé de ne pas retraiter pour des raisons économiques ou pour des motifs liés à la prolifération ou aux préoccupations environnementales que soulève la séparation du plutonium. Dans ces pays, le combustible sera entreposé dans des dépôts géologiques après environ 30 à 40 ans d'entreposage intermédiaire (cycle du combustible à passage unique). Toutefois, la plupart des pays ayant des centrales nucléaires ont adopté une position d'attente. Récemment, l'intérêt pour le cycle du combustible fermé a augmenté dans le monde entier pour des raisons de durabilité (meilleure utilisation des ressources). Un retraitement avancé peut aussi simplifier le stockage définitif des DHA restants.

100. Des approches internationales ou multinationales de la partie terminale du cycle du combustible sont aussi à l'étude afin d'accroître l'efficacité et de réduire les craintes liées à la prolifération. Il s'agit notamment de dépôts multinationaux, de mécanismes de location et de reprise de combustible et de services de retraitement.

101. En outre, il faut aussi prendre en considération le futur déclassement des réacteurs nucléaires et la gestion des déchets radioactifs en résultant. La technologie du déclassement est disponible et éprouvée.

D.1.6. Transport

102. Une augmentation du nombre des pays avec des réacteurs en service dans le monde entraînerait une augmentation du volume global d'uranium, de combustible neuf et usé et de déchets transportés. S'agissant du combustible neuf, l'augmentation serait proportionnelle à la croissance de la production d'électricité, environ 20 % de plus d'ici à 2030 selon la projection basse de l'Agence et 85 % de plus selon la projection haute. L'augmentation du volume de combustible usé et de déchets transportés est plus difficile à estimer, car elle dépend des politiques nationales en matière de retraitement et d'autres facteurs. À court terme, le nombre de transports internationaux de combustible usé sera probablement inférieur à ce qu'il était dans les années 90, avec la mise en service de l'usine de retraitement de Rokkasho (Japon) et la fin des contrats de retraitement de combustible étranger au Royaume-Uni et en France. À plus long terme, ces transports augmenteront probablement avec le développement du retraitement et du recyclage.

103. Au cours des dernières années, l'Agence a pris note de la multiplication des refus d'expéditions de matières radioactives, essentiellement de sources radioactives destinées à des applications médicales ou industrielles, mais aussi d'uranium et de combustible nucléaire neuf, quel que soit le mode de transport. L'Agence rassemble des informations supplémentaires à cet égard et a créé un comité directeur pour étudier l'impact de cette tendance. Le transport de combustible usé et de déchets, qui se fait normalement sous forme d'envois spéciaux, n'a pas été affecté par ces refus, mais il a fait l'objet de protestations du public liées à l'opposition à l'énergie nucléaire.

D.1.7. Risques de prolifération et sécurité nucléaire

104. Bien que les centrales nucléaires civiles par elles-mêmes n'augmentent pas le risque de prolifération, l'augmentation des quantités de matières nucléaires utilisées peut accroître le risque de détournement vers des utilisations non pacifiques ou des actes de terrorisme. La diffusion de la technologie nucléaire et l'existence de terroristes internationaux peuvent donner l'impression que le risque augmente.

105. En conséquence, la communauté internationale peut avoir à prendre en considération les enjeux associés à l'amélioration des contrôles sur les parties sensibles du cycle du combustible nucléaire (comme la mise en œuvre d'approches multinationales du cycle du combustible), à la confirmation des engagements internationaux de soutien au système des garanties renforcées de l'Agence, et au développement de la mise en commun des mesures de sécurité internationale.

106. La croissance de l'électronucléaire exigera des activités supplémentaires de garanties, mais il est peu probable que le travail de vérification de l'Agence augmente proportionnellement si les États acceptent une plus grande transparence. Les activités de vérification seront de plus en plus basées sur l'information. L'augmentation du nombre des installations approchant de la fin de leur durée de vie constitue un enjeu de vérification de plus en plus présent pendant les phases de mise à l'arrêt et de déclassement. La charge liée à la vérification de réacteurs de nouvelle technologie et de nouveaux types d'installations du cycle du combustible peut être réduite par la mise au point et l'intégration de techniques facilitant l'application des garanties qui permettent une vérification efficace et efficace.

107. La vulnérabilité des matières en transit est un aspect qui pourrait nécessiter d'autres mesures si le volume des expéditions de combustible pour réacteurs augmente. À cet égard, il faudra réviser le document INFCIRC/225, *La protection physique des matières et installations nucléaires*, pour y inclure des dispositions supplémentaires sur le transport.

D.1.8. Création d'infrastructures dans les nouveaux pays nucléaires

108. La mise en place d'une infrastructure appropriée pour traiter toutes les questions pertinentes au moment de l'introduction de l'électronucléaire est une préoccupation fondamentale, notamment pour les pays qui planifient leur première centrale nucléaire. L'infrastructure comprend les éléments d'appui en matière gouvernementale, législative, réglementaire, administrative et technologique et en ce qui concerne les ressources humaines et autres requis par le programmes nucléaire pendant toute sa durée. Les aspects couverts sont très variés : livraison physique de l'électricité, transport des matières et des fournitures sur le site, site lui-même, et installations spéciales pour la manipulation des déchets radioactifs, cadre législatif et réglementaire, et ressources humaines et financières. Autrement dit, tel qu'il est utilisé ici, le mot infrastructure désigne toutes les activités et dispositions nécessaires pour la mise en place et le fonctionnement d'un programme nucléaire¹⁷. Ceci est applicable que l'objectif du programme nucléaire soit la production d'électricité, le dessalement de l'eau de mer ou toute autre fin pacifique.

109. Les organismes gouvernementaux, les producteurs d'électricité, les industriels et les organismes de réglementation d'un pays qui lance ou développe un programme électronucléaire jouent tous un rôle dans la mise en place de l'infrastructure nucléaire nationale. Les gouvernements exportateurs et les fournisseurs peuvent aussi jouer un rôle en tant que parties prenantes pour déterminer si l'infrastructure nationale est adéquate avant la fourniture des équipements et des matières nucléaires. Le développement des compétences de ces organismes est un élément clé qui doit être établi au début de la préparation d'un programme électronucléaire.

110. La mise en place de tous les éléments d'une infrastructure nucléaire nationale devrait être soigneusement planifiée. Toutefois, il n'est pas essentiel que l'ensemble de l'infrastructure soit en place avant le début de la préparation du programme électronucléaire car l'infrastructure devrait être développée en phase avec l'évolution du programme.

D.1.9. Relations entre les réseaux de distribution et la technologie des réacteurs

111. La taille, la qualité, la stabilité et l'interconnexion des réseaux sont des questions à prendre en considération par les pays qui utilisent l'électronucléaire, mais spécialement par les nouveaux venus. Il est généralement admis qu'une nouvelle tranche, quel qu'en soit le type, ajoutée à un réseau ne doit pas avoir une capacité supérieure à 10 % de la capacité du réseau pour éviter des problèmes

¹⁷ La publication de l'Agence *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power* (collection Énergie nucléaire, n° NG-G-3.1 de l'AIEA) énumère 19 questions à prendre en compte pour la mise en place d'une infrastructure nationale.

d'interface. Avec les réseaux interconnectés, la capacité globale augmente. Des systèmes de protection isolant des parties du réseau en cas de transitoires peuvent réduire le risque d'instabilité.

112. De nombreux pays envisageant de recourir à l'électronucléaire ont de petits réseaux isolés. Vingt de ces pays ont des réseaux de moins de 5 GWe, trop petits, selon la règle des 10 %, pour n'importe lequel des modèles de réacteurs actuellement disponibles. Les problèmes de réseau pourraient limiter les options technologiques pour les 28 pays dont les réseaux ont une capacité inférieure à 10 GWe. En dessous de 600 MWe, il y a peu de modèles commercialement disponibles, même si beaucoup sont à l'étude. Un progrès technologique des réacteurs de faible puissance ayant pour effet d'améliorer la disponibilité commerciale et de diminuer l'influence de la stabilité et de la fiabilité du réseau élargirait le choix pour les pays ayant de petits réseaux. Des réacteurs de très faible puissance dotés de caractéristiques leur permettant d'être totalement indépendants d'un réseau pourraient aussi être intéressants pour des applications dans des endroits isolés.

D.2. Questions clés pour une utilisation à long terme

113. Une évolution conceptuelle tant pour les réacteurs que pour les cycles du combustible est nécessaire pour une augmentation de la contribution à long terme de l'énergie nucléaire au développement durable. L'objectif du développement durable est de parvenir à l'équité dans et entre les pays, de même qu'entre les générations, en intégrant la croissance, la protection de l'environnement et le bien-être social. La durabilité peut être considérée de quatre points de vue différents mais liés : social, économique, environnemental et institutionnel. Pour y parvenir dans un système d'énergie nucléaire, des améliorations de la durabilité sont prises en considération dans le contexte de développements dans les domaines de la sûreté, de l'économie, de la résistance à la prolifération, des déchets, de l'environnement, de l'utilisation des ressources, de la sécurité et de l'infrastructure.

D.2.1. Utilisation efficace des ressources disponibles

114. D'après les dernières estimations des ressources mondiales en uranium publiées par l'AEN et l'AIEA en 2008, les ressources classiques identifiées sont de 5,5 millions de tonnes d'uranium (MtU). Ceci correspond à près d'un siècle de consommation au rythme actuel. C'est là un chiffre important, par comparaison avec les autres ressources minières, mais l'enjeu est surtout d'améliorer l'utilisation des ressources, c'est-à-dire d'accroître l'énergie produite par tonne d'uranium extraite. Parallèlement, on peut compter qu'avec une prospection accrue de nouvelles ressources seront découvertes.

115. Certaines améliorations (allant jusqu'au doublement de l'énergie produite) peuvent être obtenues avec l'actuelle génération de réacteurs en réduisant la fraction d'uranium 235 dans les résidus des usines d'enrichissement, en réutilisant l'uranium et le plutonium extraits du combustible utilisé et en augmentant le taux de combustion.

116. L'une des mesures permettant d'améliorer l'efficacité d'utilisation des ressources serait l'introduction des réacteurs à neutrons rapides et des cycles du combustible associés. Avec un recyclage multiple, l'énergie produite par tonne d'uranium peut être accrue d'environ 60 fois par rapport aux actuels réacteurs à eau ordinaire. Des réacteurs innovants utilisant du combustible au thorium pourraient aussi être mis au point, ce qui augmenterait les sources mondiales de combustible nucléaire.

117. Outre l'utilisation efficace de l'uranium et du thorium, il faut aussi chercher à utiliser efficacement les matériaux de structure comme l'acier. Plusieurs modèles de réacteurs évolutifs proposent des solutions techniques qui permettent directement ou indirectement d'économiser des matériaux pour accroître la compétitivité. Il s'agit notamment d'allonger la durée de vie nominale, d'accroître l'efficacité thermique du cycle de conversion de l'énergie, de réduire la consommation

d'acier et de concevoir des installations plus compactes. À plus long terme, le recyclage des matériaux de structure radioactifs provenant du déclassé des réacteurs pourrait aussi contribuer à l'utilisation efficace des ressources.

D.2.2. Innovations dans la conception des réacteurs

118. La deuxième question clé pour une utilisation à long terme concerne les innovations dans la conception des réacteurs. Pour les réacteurs de forte puissance, les innovations sont examinées à la section E.1.2. Les innovations visant à étendre l'utilisation des centrales nucléaires comprennent des augmentations des températures de fonctionnement, et donc de sortie. À cette fin, on cherche à mettre au point des réacteurs à haute température refroidis par gaz et à accroître la température de sortie des réacteurs à eau, et à mettre au point des réacteurs à eau supercritique. Les innovations visant à répondre à l'intérêt accru pour des applications de l'électronucléaire exigeant des réacteurs de faible puissance sont axées sur la mise au point de réacteurs pouvant être exploités dans de petits réseaux ou hors réseau. Si l'intérêt qu'ils suscitent augmente clairement, on ne peut pas dire avec certitude ce que sera le marché pour les réacteurs de ce genre. En outre, on étudie aussi des réacteurs transportables ou mobiles pour utilisation dans des endroits isolés.

D.2.3. Innovations concernant le cycle du combustible

119. Parallèlement aux réacteurs innovants, il faut mettre au point à long terme les installations du cycle du combustible associées. Il s'agit d'installations de retraitement avancées pouvant traiter le combustible des réacteurs innovants et séparer le plutonium et les actinides mineurs pour recyclage, et des technologies de fabrication pour ces combustibles.

120. Avec l'introduction de réacteurs innovants et le développement du recyclage, la quantité de matières sensibles du point de vue de la prolifération manipulées augmentera, ce qui pourrait accroître les besoins en termes de garanties. Plusieurs approches innovantes ont été proposées à cet égard, dont la multilatéralisation des installations sensibles (enrichissement et retraitement) du cycle du combustible. Parmi les autres solutions possibles, certains pays pourraient à la fois fournir le combustible neuf pour les réacteurs et reprendre le combustible usé à titre de service. Le combustible repris constituerait une ressource pour recyclage dans des réacteurs à neutrons rapides et pourrait à plus long terme avoir une valeur positive. L'utilisation de matières recyclées pourrait aussi accroître les problèmes de sûreté et de sécurité pendant le transport.

121. Le recours accru aux cycles du combustible fermés pourrait aussi changer la situation en ce qui concerne le stockage définitif des déchets de haute activité (DHA). Avec l'élimination du plutonium et des actinides mineurs, la radiotoxicité et la charge thermique des DHA seront réduites, ce qui permettra d'accroître la capacité des dépôts en rapprochant les colis de déchets. Les avantages potentiels de dépôts internationaux ou régionaux sont aussi discutés ; toutefois, cette solution continue de se heurter à des difficultés politiques ou d'acceptation par le public.

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

E.1. Évolution des réacteurs nucléaires et de la technologie associée

122. La plupart des modèles de réacteurs nucléaires avancés disponibles aujourd'hui représentent des évolutions de modèles antérieurs. Ceci a l'avantage de conserver des caractéristiques éprouvées et donc de réduire les risques technologiques. Ces modèles évolutifs ne nécessitent généralement que peu d'activités complémentaires de recherche-développement ou d'essais de confirmation.

123. Les modèles innovants, par contre, incorporent des changements radicaux de conception ou de configuration des systèmes par rapport aux modèles précédents. Ils exigeront probablement plus d'investissements en termes de recherche-développement et la construction d'un prototype ou d'une centrale de démonstration.

E.1.1. Modèles évolutifs

124. La croissance de l'électronucléaire à court terme reposera surtout sur les modèles évolutifs. Ceux-ci tirent parti de l'expérience d'exploitation en ce qui concerne l'interface homme-machine, la fiabilité des composants, l'amélioration des aspects économiques et la sûreté. Comme une partie du système est déjà éprouvée, ces modèles nécessitent au plus des essais techniques de confirmation. On peut donner comme exemples d'éléments communément utilisés dans les modèles évolutifs pour améliorer les aspects économiques :

- Une conception simplifiée (voir la figure E-1 : exemple d'un REB)
- L'augmentation de la puissance
- Le raccourcissement des temps de construction, ce qui réduit les charges financières qui s'accumulent sans production de revenus
- La normalisation et la construction en série, permettant de répartir les frais fixes sur plusieurs tranches
- Les gains de productivité dans la fabrication des équipements, l'ingénierie de terrain et la construction
- La construction de plusieurs tranches sur un même site
- L'autonomie et la participation locale.

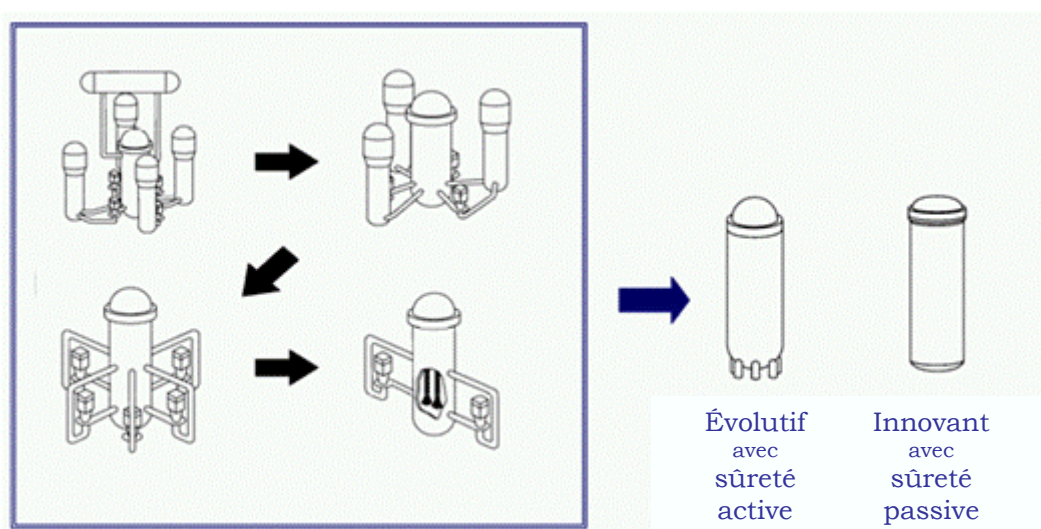


Fig. E-1. Exemple d'évolution d'un modèle de REB

125. Outre l'amélioration des aspects économiques, plusieurs moyens sont habituellement mis en œuvre pour améliorer la sûreté et la fiabilité des modèles évolutifs en accordant une attention accrue aux risques externes et aux progrès en matière d'essais et d'inspection, et en recourant aux études probabilistes de sûreté (EPS). Les modèles évolutifs font aussi une place accrue à l'interface homme-machine, avec notamment l'amélioration de la conception de la salle de commande et une conception visant à faciliter la maintenance. Les systèmes de contrôle-commande sont aussi modernisés pour y inclure des composants numériques.

Réacteurs à eau ordinaire (REO)

126. Des modèles de REO avancés sont à l'étude dans plusieurs pays.

127. En Chine, un modèle local de REP de 1 000 MWe a été conçu. Cette tranche de 1 000 MWe devrait être achevée en 2013.

128. En France et en Allemagne, AREVA a conçu le réacteur européen à eau sous pression (EPR) de 1 600 MWe, qui répond aux besoins des producteurs européens. Le premier EPR, Olkiluoto-3 en Finlande, est en construction et sa mise en service commerciale est prévue pour 2012. Par ailleurs, Électricité de France a commencé la construction d'un EPR à Flamanville, qui devrait être achevé en 2012. AREVA a signé un contrat de fourniture de deux EPR pour le site de Taishan (Chine), qui devraient entrer en service en 2014. AREVA étudie aussi une version de l'EPR pour les États-Unis.

129. Le Japon continue de déployer des réacteurs avancés à eau bouillante (RAEB) de 1 356 à 1 385 MWe, y compris la version exclusivement MOX à Ohma. La demande de licence pour un nouveau réacteur avancé à eau sous pression (RAEP) de 1 538 MWe, destiné à Tsuruga-3 et 4, est en cours d'examen.

130. En République de Corée, une version améliorée de la centrale nucléaire coréenne standard (KNSP), le réacteur de puissance optimisé (OPR) de 1 000 MWe, est en construction à Shin-Kori 1 et 2, la mise en service étant prévue en 2010 et 2011. Les premières tranches de l'APR-1400 de 1 450 MWe de la Compagnie coréenne d'énergie hydroélectrique et nucléaire (KHNP), basé sur la KNSP, mais avec une puissance plus élevée, sont en construction pour Shin-Kori 3 et 4, avec une mise en service prévue pour 2013 et 2014.

131. En Fédération de Russie, Atomenergoproekt transforme aussi le VVER-1000 en VVER-1200 et VVER-1500. Deux tranches VVER-1000 sont en construction en Inde, l'exploitation commerciale étant prévue pour 2009. La Compagnie nationale d'électricité (NEK) de Bulgarie a signé un contrat avec Atomstroyexport (Fédération de Russie) pour deux VVER-1000 sur le site de Belene. La Fédération de Russie prévoit de construire 17 VVER-1200 d'ici à 2020.

132. Le Bureau d'études pour la construction de machines (OKBM) russe a conçu une centrale nucléaire de cogénération flottante ou terrestre. La construction du premier prototype de centrale de cogénération montée sur barge avec deux réacteurs KLT-40S (70 MWe et chaleur) a commencé en avril 2007 et devrait être achevée en 2010.

133. Aux États-Unis, les modèles AP-1000 et RAEB ont été certifiés par la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) et le réacteur à eau bouillante simplifié économique (ESBWR) (1 520 MWe), l'US-EPR (1 600 MWe) et l'US-APWR (1 700 MWe) sont à l'étude. Des demandes de licences combinées (COL) concernant tous ces modèles avancés à l'exception de l'US-APWR sont en cours d'examen par la NRC. Westinghouse a signé un contrat avec la Corporation nationale de la technologie de l'énergie nucléaire (SNPTC) chinoise pour la fourniture de quatre tranches AP-1000 (deux à Sanmen et deux à Haiyang), avec une mise en service prévue pour la fin 2013.

134. Parmi les autres REO de faible ou moyenne puissance, typiquement évolutifs, on peut citer : l'AP-600 et l'IRIS intégré de Westinghouse (États-Unis) ; le VVER-640 d'Atomenergoproekt et Gidropress, le PAES-600 d'OKBM et le VK-300 de l'Institut de recherche-développement pour l'ingénierie électrique (NIKIET) russe ; le REB simplifié d'Hitachi (HSBWR) et le RAEB d'Hitachi (HABWR) au Japon et le NP-300 de Technicatome en France. De nombreux autres modèles ont été proposés, la plupart de type évolutif, mais dont certains contiennent des caractéristiques innovantes. Toutefois, aucun de ceux-ci n'a dépassé à ce jour la phase des études.

Réacteurs à eau lourde (REL)

135. Au Canada, l'Énergie atomique du Canada limitée (EACL) met au point un réacteur CANDU avancé qui fonctionne à l'uranium légèrement enrichi pour compenser l'utilisation d'eau ordinaire comme caloporteur primaire.

136. Le REL de 540 MWe de l'Inde est basé sur l'expérience acquise avec les réacteurs de 220 MWe de conception locale, et les deux tranches de 540 MWe de Tarapur sont entrées en service commercial. L'Inde étudie aussi un REL évolutif de 700 MWe et un REL avancé avec de l'eau lourde comme modérateur et de l'eau ordinaire bouillante comme caloporteur dans des tubes verticaux sous pression, optimisé pour l'utilisation de thorium et doté de systèmes de sûreté passive.

Réacteurs refroidis par gaz (RRG)

137. Dans plusieurs pays, des RRG prototypes et de démonstration refroidis à l'hélium utilisant le cycle de Rankine pour la production d'électricité ont été construits. En Afrique du Sud, aux États-Unis, en Fédération de Russie, en France et au Japon, des efforts considérables sont consacrés au réacteur à haute température à turbine à gaz à cycle direct, qui promet une grande efficacité thermique et de faibles coûts de production. En Afrique du Sud, la conception du réacteur modulaire à lit de boulets (PBMR) de démonstration de 165 MWe a été achevée et la construction devrait commencer en 2009. En Chine, le réacteur modulaire à lit de boulets à haute température refroidi par gaz (HTR-PM) de 200 MWe avec cycle (turbine à vapeur) indirect entre dans la phase de conception de base, l'objectif étant de construire une installation de démonstration vers 2013.

Réacteurs refroidis par métal liquide

138. Il y a eu une série de réacteurs à neutrons rapides expérimentaux et prototypes dès le début de la mise au point de réacteurs nucléaires (le premier réacteur à neutrons rapides, Clémentine, a divergé en 1946). La conception et l'exploitation de réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, tels que le réacteur rapide prototype (PFR) de 270 MWe au Royaume-Uni, le prototype Phénix en France, le BN-350 au Kazakhstan, le BN-600 de démonstration en Fédération de Russie, le réacteur Monju au Japon et le réacteur de taille industrielle Superphénix en France (pour ne nommer que les principaux), ont permis d'accumuler une expérience de plus de 300 années-réacteur. L'évolution des réacteurs à neutrons rapides refroidis par métal liquide se poursuit avec la construction par l'Inde d'un réacteur refroidi au sodium de 500 MWe à Kalpakkam, qui doit être achevé en 2010. L'Inde prévoit de construire quatre autres réacteurs de même puissance. La Fédération de Russie poursuit aussi la construction du BN-800, qui doit être achevée en 2012.

139. Pour d'autres détails sur la situation des réacteurs à neutrons rapides, voir le supplément correspondant du *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2008*.

E.1.2. Innovations futures

140. Les principaux facteurs qui influenceront la mise au point de systèmes d'énergie nucléaire de nouvelle génération au XXI^e siècle seront les suivants : économie, sûreté, résistance à la prolifération et protection de l'environnement, y compris l'amélioration de l'utilisation des ressources et la

réduction de la production de déchets. De nombreuses innovations futures concernent les systèmes à neutrons rapides qui peuvent produire davantage de matières fissiles sous forme de plutonium 239 qu'ils n'en consomment. Les neutrons rapides dans ces réacteurs permettent aussi d'utiliser ou de transmuter certains radio-isotopes à longue période, ce qui réduit la charge environnementale de la gestion des déchets de haute activité. La complexité de ces caractéristiques est une indication de la raison pour laquelle ces systèmes sont à l'étude depuis plus de 50 ans et continuent d'évoluer en bénéficiant de concepts innovants.

141. Outre les progrès que permettent les innovations visant à améliorer l'efficacité du combustible, d'autres questions appellent des solutions innovantes. Il s'agit notamment des applications de la haute température et des modèles pour emplacements isolés.

142. Les approches innovantes spécifiques qui pourraient conduire à des améliorations de l'efficacité, de la sûreté et de la résistance à la prolifération, entre autres avantages, comprennent :

- L'allongement de la durée de vie du combustible avec un taux de combustion très élevé
- L'amélioration du gainage et des matériaux composant le combustible
- D'autres caloporteurs pour améliorer la sûreté et l'efficacité
- Des systèmes robustes et tolérant les fautes
- Une conversion d'énergie par cycle de Brayton à haute température
- Le combustible au thorium.

143. De telles innovations exigent d'importantes activités de recherche-développement et de nombreux essais. Comme il est à forte intensité de ressources, le travail d'innovation se fait actuellement dans le cadre d'une coopération internationale ou bilatérale.

E.2. Cycle du combustible nucléaire et progrès technologiques associés

E.2.1. Évolution de la technologie du cycle du combustible

144. La technologie actuelle du cycle du combustible est adéquate et pleinement adaptée aux opérations actuelles de production d'électricité d'origine nucléaire. Néanmoins, comme dans tous les domaines techniques, de nouveaux progrès sont en cours, à toutes les étapes du cycle du combustible, pour améliorer encore la compétitivité économique et réduire les risques liés à la sûreté, à la sécurité et à la prolifération et les préoccupations environnementales, par exemple une technologie d'enrichissement plus efficace et consommant moins d'énergie.

145. Le combustible utilisé dans les réacteurs actuels fait l'objet de progrès constants pour une meilleure performance dans le réacteur et une augmentation du taux de combustion, c'est-à-dire une meilleure utilisation de l'uranium. Le recyclage de l'uranium retraité et, en particulier, du plutonium en tant que combustible MOX requiert des techniques de fabrication avec télémanipulation et suppose une augmentation des doses reçues par les travailleurs, et nécessite donc un renforcement de la protection radiologique.

146. Pour la technologie du retraitement, élaborée dans les années 60, on est en train de mettre au point des équipements qui accroissent la pureté des produits, réduisent la production de déchets et augmentent la maîtrise de la prolifération. On étudie des procédés avec lesquels il n'y a pas de séparation de plutonium pur pour recyclage, mais dans lesquels le plutonium est toujours mêlé à d'autres matières (uranium ou produits de fission), ce qui accroît la résistance à la prolifération.

147. Les principes de stockage définitif des DHA et du combustible usé, y compris leur mise en place dans des dépôts géologiques profonds entourés de barrières multiples, sont bien acceptés au niveau international. Des travaux sont en cours pour trouver des sites adaptés, réaliser des évaluations de la sûreté et appliquer la technologie d'enrobage et de stockage définitif.

E.2.2. Innovations futures

148. Les différentes tendances concernant la mise au point de réacteurs innovants ont été présentées à la section E.1.2. Chacun de ces systèmes nécessitera une approche spécifique du cycle du combustible. Des types de réacteurs spécifiques nécessiteront un combustible spécial, pour lequel il faudra mettre au point une technologie et des procédures de fabrication particulières, avec par exemple des concentrations plus élevées de plutonium.

149. L'introduction de réacteurs à neutrons rapides exige un retraitement et un recyclage. Les techniques de retraitement sont en cours d'amélioration pour les adapter aux intensités de rayonnements plus élevées du combustible de réacteurs à neutrons rapides et à des temps de refroidissement plus courts. Il s'agit notamment de procédés avancés par voie humide basés sur la technologie actuelle et de nouveaux procédés par voie sèche, comme le traitement pyrochimique.

150. Pour réduire la radiotoxicité à long terme et la charge thermique des DHA restant après le retraitement, de nouveaux procédés sont à l'étude pour séparer une partie des radionucléides à longue période, par exemple les actinides mineurs comme l'américium et le curium. Les matières séparées peuvent être détruites par transmutation dans le combustible d'un réacteur à neutrons rapides. On étudie aussi la séparation du césium et du strontium pour réduire la charge thermique des déchets. D'autres informations sur la mise au point de systèmes de retraitement avancés sont données dans le supplément correspondant du *Rapport d'ensemble sur la technologie nucléaire 2008*.

151. L'introduction de systèmes de recyclage avancés aura aussi un impact important sur le stockage définitif des DHA. Un stockage géologique profond continuera probablement d'être nécessaire, mais la charge thermique peut être réduite, ce qui accroît la capacité des dépôts puisque dans la plupart des cas la densité de stockage dépend de la charge thermique. Par ailleurs la radiotoxicité à long terme sera réduite, ce qui pourrait simplifier la conception des dépôts et accroître l'acceptation par le public.

E.3. Applications non électriques

Dessalement de l'eau de mer et chauffage urbain

152. La demande d'eau potable augmente. L'électricité ou la vapeur provenant d'une centrale nucléaire peut déjà être utilisée pour le dessalement et une application plus large ne nécessite pas d'autres études importantes.

Production d'hydrogène et chaleur industrielle

153. Le Japon, les États-Unis et d'autres pays étudient comment produire de l'hydrogène à partir de l'eau par des procédés électrolytiques, thermochimiques et hybrides. La plupart des travaux ont porté sur des procédés à haute température qui requièrent des températures plus élevées (> 750°C) que ce que permettent les réacteurs à eau. Des réacteurs avancés, comme le réacteur à très haute température refroidi par gaz (RTHTRG) peuvent produire de la chaleur à ces températures. La première démonstration de production d'hydrogène avec un réacteur refroidi par gaz ne devrait avoir lieu que vers 2015 au Japon et vers 2020 aux États-Unis. La vapeur à haute température pourrait aussi être utilisée pour des processus industriels qui consomment des quantités considérables de chaleur. La faisabilité des applications concernant l'hydrogène et la chaleur industrielle dépendra des progrès des réacteurs pour l'obtention de températures de vapeur élevées, et aussi de la compétitivité économique des solutions de remplacement. La situation à long terme est actuellement incertaine.

F. Coopération concernant l'expansion du recours à l'énergie nucléaire et le développement technologique

154. Le Forum international Génération IV (GIF) est un groupe de 11 membres¹⁸ mettant au point des systèmes d'énergie nucléaire de nouvelle génération qui présentent des avantages sur les plans de l'économie, de la sûreté, de la fiabilité et de la durabilité et qui pourraient entrer en service commercial d'ici à 2030. Six systèmes ont été sélectionnés et une feuille de route technologique a été préparée pour orienter les activités de recherche-développement. Les systèmes sont les suivants :

- Réacteur à neutrons rapides refroidi par gaz
- Réacteur refroidi par alliage de plomb liquide
- Réacteur refroidi par sodium liquide
- Réacteur à eau supercritique
- Réacteur à très haute température refroidi par gaz
- Réacteur à sels fondus.

155. Les États-Unis ont lancé le Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (GNEP) pour favoriser l'expansion de l'énergie nucléaire tout en renforçant la sécurité et la non-prolifération. Le GNEP a une composante technologique axée sur le cycle du combustible fermé utilisant le retraitement sans séparation du plutonium, et une composante internationale, avec la création de groupes de travail sur le développement des infrastructures et de services du combustible fiables. En mai 2008, le GNEP comptait 21 partenaires et 3 organisations internationales ayant le statut d'observateurs¹⁹. En outre, 9 pays participent comme observateurs.

156. En 2006, la Fédération de Russie a annoncé une initiative visant à mettre en place une infrastructure électronucléaire mondiale, dont la première étape est la création du Centre international d'enrichissement d'uranium à Angarsk. L'Arménie et le Kazakhstan en sont partenaires. Cette initiative vise à assurer aux pays intéressés un accès aux avantages de l'énergie nucléaire dans le respect des engagements de non-prolifération.

157. En ce qui concerne la sûreté, des améliorations de l'efficacité du processus de certification de la conception ont commencé dans le cadre d'un projet pilote de partage des informations sur la certification de la conception au titre du Programme multinational d'évaluation des conceptions (MDEP). À l'avenir, le MDEP visera la convergence des codes, normes de sûreté et objectifs entre les organismes de réglementation des principaux pays exploitant l'électronucléaire. Un processus international de certification de la conception, en vertu duquel un organisme de réglementation suivant des normes acceptées pourrait délivrer un certificat qui permettrait à un pays acheteur d'avoir confiance dans le modèle et sa performance, favoriserait l'expansion de l'électronucléaire.

¹⁸ Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, États-Unis, France, Japon, République de Corée, Royaume-Uni, Suisse et Euratom.

¹⁹ Les partenaires du GNEP sont l'Australie, la Bulgarie, le Canada, la Chine, les États-Unis d'Amérique, la Fédération de Russie, la France, le Ghana, la Hongrie, l'Italie, le Japon, la Jordanie, le Kazakhstan, la Lituanie, la Pologne, la République de Corée, la Roumanie, le Royaume-Uni, le Sénégal, la Slovaquie et l'Ukraine. L'AIEA, l'AIEA et le GIF ont le statut d'observateurs permanents.