MAPPE MONDE
60 2000.4

CENTRALES NUCLÉAIRES ET URANIUM DANS LE MONDE

Roger Brunet *

RÉSUMÉ. *L'énergie nucléaire, produite en 200 lieux de la planète, ne fournit encore que 20 % de l'électricité mondiale ; sa part dans les consommations d'énergie devrait s'accroître. La production d'uranium s'est au contraire fortement concentrée, en attendant un nouvel élan.*

ABSTRACT. *Nuclear energy, produced in 200 places on the planet, currently provides only 20% of the world's electricity. Its share in energy consumption is expected to increase. In contrast, uranium production has concentrated strongly, while awaiting a new boost.*

RESUMEN. *La energia nuclear, producida en 200 sitios en el planeta, suministra solamente 20 % de la electricidad mundial. Su participación en los suministros energéticos deberia aumentar. Al contrario, la producción de uranio se ha fuertemente concentrado, en la espera de un nuevo desarrollo.*

• ÉLECTRICITÉ • ÉNERGIE NUCLÉAIRE • MONDE • URANIUM.

• ELECTRICITY • ENERGY • NUCLEAR • URANIUM • WORLD

• ELECTRICIDAD • ENERGÍA NUCLEAR • MUNDO • URANIO

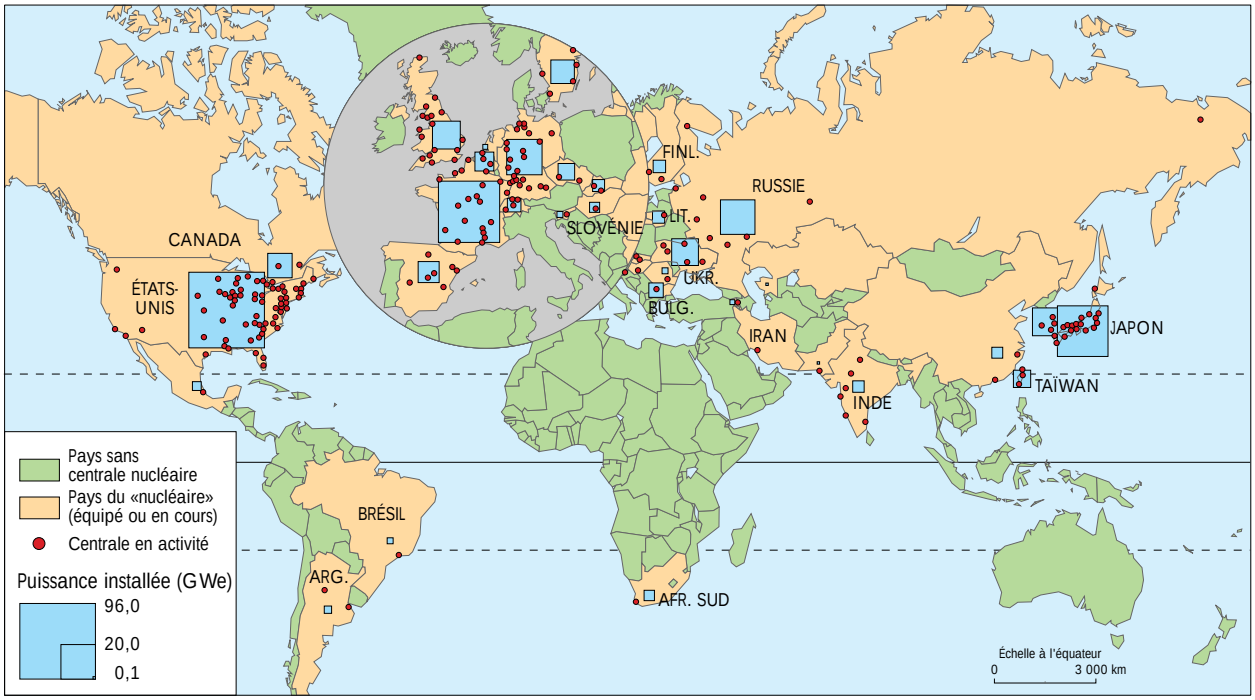
Dans 201 lieux du monde répartis en 31 États, 442 réacteurs nucléaires fonctionnent en ce moment. Ils fournissent 20 % de l'électricité utilisée sur la planète, soit 7 % (1/14) de la consommation totale d'énergie. Cela montre à la fois que l'énergie nucléaire à usage civil s'est largement diffusée et, surtout, que l'on est encore très loin de ce qu'il faudrait pour limiter le fameux effet de serre, que les centrales thermiques au charbon, au pétrole et au gaz contribuent si efficacement à augmenter par leurs rejets, tout en brûlant des ressources non renouvelables.

Les pays du nucléaire civil

Trois puissances dominent la production, dont elles fournissent près de 60 % à elles trois, avec la moitié des réacteurs : les États-Unis, la France et le Japon, les premiers égalant à peu près la somme des deux autres. Viennent ensuite l'Allemagne, la Russie, la Corée du Sud et le Royaume-Uni, suivis par la Suède, le Canada, l'Ukraine, l'Espagne et la Belgique. On voit que ce classement n'est pas très éloigné de celui de la performance économique générale : la Triade (Amérique du Nord, Union européenne, Japon-Corée) est fort bien représentée, avec plus des trois quarts des réacteurs du monde (339 sur 442), Union européenne en tête (145) ; seule manque l'Italie, qui par crainte des séismes a très tôt renoncé au nucléaire et fermé les quatre sites qu'elle avait équipés ou engagés ; à un autre niveau, l'abstention de l'Australie se remarque (fig. 1).

Cependant, la place du nucléaire dans la fourniture d'électricité présente un tout autre classement. Au palmarès des pays les plus écologiques, les plus respectueux de la biosphère, y auraient-ils été contraints par le manque de sources d'énergie locales, se trouve nettement en tête la France, qui tire du nucléaire 75 % de son électricité. Parmi ceux dont les scores sont encore honorables, figurent la Belgique (58 %), la Suède (47), la Corée du Sud (43), puis

* Brunet@mgm.fr



1. Les centrales nucléaires dans le monde

le Japon et la Suisse (36), l'Espagne et l'Allemagne (31), la Finlande (30) ; et, par accident, la Lituanie (73) qui a hérité d'une centrale du système soviétique trop grande pour elle, ainsi que la Bulgarie (42) et la Slovaquie (45) pour des raisons voisines. À l'autre bout sont la plupart des pays du Tiers Monde, et bien sûr l'Italie et l'Australie. Malheureusement, la Suède et l'Allemagne ont officiellement décidé de les rejoindre ; il est vrai que c'est avec une sage lenteur : pour le moment, le nucléaire y est encore très actif (tableau).

On peut observer que la production par unité de puissance des réacteurs varie assez nettement d'un pays à l'autre. Elle résulte principalement du nombre d'heures de fonctionnement ouvertes sur le réseau ; mais certains découplages sont subis, d'autres voulus : incidents de marche d'un côté, état de la demande et restrictions volontaires de l'autre. C'est ainsi que le Canada n'a utilisé ses capacités qu'à 57 % du nombre d'heures annuelles en 1999, la Russie à 69 % et l'Ukraine à 68 %, mais pour des raisons différentes. La France était à 71 % seulement, alors que les États-Unis et la Suède faisaient tourner leurs centrales nucléaires à haut régime (88 %), l'Allemagne à 87 %, le Royaume-Uni, le Japon, et la Corée du Sud à 83 %. La moyenne mondiale est de 7 033 heures/an, soit 80 %.

Compte tenu de l'harmonisation relative des techniques et des modèles de réacteurs, les États ont toutefois à peu près le même classement pour les équipements que pour les productions (fig. 1). Le parc de réacteurs a beaucoup évolué : 568 ont déjà été construits, dont 126 ont été arrêtés, soit un quart ; une trentaine sont en chantier, mais les projets sont bien plus nombreux, faisant apparaître de nouveaux pays.

2. La centrale de Temelin : dernière née, la seconde centrale tchèque a été mise en service le 9 octobre 2000, en dépit de protestations autrichiennes (le site est à 60 km de la frontière des deux pays)

Pays	MWe	2	3	4	5	6	7
Afrique du Sud	1844	1	2			14	7
Allemagne	22341	16	19		17	170	31
Argentine	935	2	2			7	9
Arménie	376	1	1		2	2	36
Belgique	5713	2	7		1	49	58
Brésil	626	1	1	1		15	1
Bulgarie	3538	1	6			16	42
Canada	14937	6	21		4	74	13
Chine	2100	2	3	7		4	1
Corée du Nord				2			
Corée du Sud	12937	4	16	4		94	43
Espagne	7472	7	9		1	59	31
États-Unis	98106	65	104		47	759	20
Finlande	2840	2	4			23	30
France	63183	20	59		12	394	75
Hongrie	1740	1	4			14	38
Inde	2305	6	13	4		13	3
Iran				1			
Italie					4		
Japon	43509	18	53	2	3	318	36
Kazakhstan					1		
Lituanie	2760	1	2			10	73
Mexique	1308	1	2			10	5
Pakistan	128	1	1		1	ε	ε
Pays-Bas	459	1	1		1	4	4
R. Tchèque	1632	1	4		2	13	21
Roumanie	660	1	1			5	10
Royaume-Uni	12926	13	35		10	94	28
Russie	19843	9	29	3	13	120	14
Slovaquie	2408	2	6		1	13	45
Slovénie	620	1	1			4	37
Suède	9460	4	11		2	73	46
Suisse	3077	4	5		1	25	35
Taïwan	4884	3	6	1		38	26
Ukraine	12120	5	14	2	3	72	44
Total	**356599**	**201**	**442**	**27**	**126**	**2508**	**20**

3. Centrales nucléaires dans le Monde (janvier 2000)
Colonne 1 : puissance installée en millions de watts ; **2** : nombre de sites ; **3** : nombre de réacteurs en fonction ; **4** : nombre de réacteurs en chantier ; **5** : nombre de réacteurs retirés du réseau ; **6** : production d'électricité d'origine nucléaire en 1998, en GkWh ; **7** : part du nucléaire dans la production d'électricité, 1998, en %. Le signe ε indique une quantité inférieure à l'unité ; l'absence de nombre équivaut à zéro.

Les principaux chantiers en cours sont en Asie : Chine, Inde, Iran, Corées.

Les États-Unis, le Royaume-Uni, la Russie ont arrêté plus de 30 % des réacteurs qu'ils ont installés. Cela tient en partie à l'ancienneté du parc, en partie à la politique énergétique : le Royaume-Uni a conservé de fort anciennes centrales. Rappelons que le premier couplage d'un réacteur au réseau remonte au 20 décembre 1951 aux États-Unis (EBR-1, supprimé en 1963), au 27 juin 1954 en Russie (Obninsk, arrêté en 1988), au 27 août 1956 au Royaume-Uni (Calder Hall, toujours en activité) et au 28 septembre 1956 en France (Marcoule G-1, fermé en 1968). L'Allemagne s'y est mise en 1961, le Japon en 1963. Les derniers venus sont la Chine (1991) et la Roumanie (1996).

L'avenir des réacteurs et de la filière dépend en partie de leurs rendements, en partie de leur sécurité. Or il s'agit moins de données d'ordre scientifique ou technique que de mesures indirectes. Certes, les caractéristiques techniques diffèrent et évoluent : on sait qu'une filière russe à eau-graphite, dite RBMK, celle de Tchernobyl, présente plus de risques et moins d'efficacité que la plupart des autres (1) ; mais de nos jours la majorité des réacteurs sont à eau ordinaire, soit sous pression (256 réacteurs sur 442) soit bouillante (91) ; les autres sont à eau lourde (39), au graphite-gaz (34), à eau-graphite (18). En revanche, les prix du kilowatt-heure produits ne peuvent être jugés que par comparaison avec l'état général du marché, et la sécurité est largement affaire de perception : c'est une interprétation à la fois intégriste et partielle du « principe de précaution » qui amène certains pays à remettre en cause l'emploi de l'énergie nucléaire, quitte à enfler le nombre de centrales thermiques, dont la nocivité est pourtant établie (2).

Pour le moment, en France par exemple, il semble que le prix de revient du kilowatt-heure d'origine nucléaire (19 centimes) soit inférieur à celui des centrales classiques, alors que, contrairement à celles-ci, il inclut les coûts de sécurité et de remise en état des sites. L'hydraulique peut progresser dans certains pays, mais plafonne en France, où d'ailleurs elle attire tout autant de fureurs sous prétexte d'écologisme. Les autres sources d'énergie (éolienne, etc.) sont plus coûteuses, pour des installations qui restent de faible puissance. En fait, les années 1998-2001 apparaissent en position de charnière. Le mouvement de construction de centrales nucléaires avait été ralenti par la baisse des prix du pétrole, bien plus efficacement que par l'écologisme. Des programmes ont été remis en cause. Or la production continue à croître (+ 3 % en 1999) et l'année 1999 a vu connecter quatre centrales nouvelles,

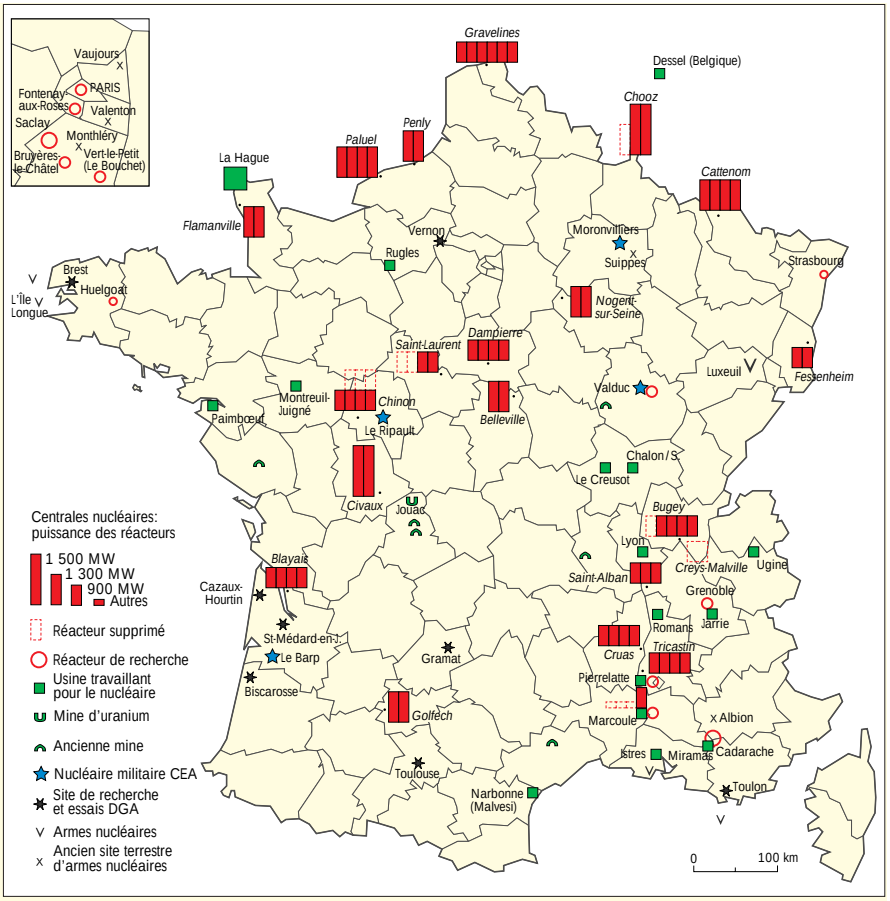
contre deux arrêts définitifs. La remontée des cours du pétrole et la poursuite de la « mondialisation » pourraient bien amener le nucléaire civil à prendre un nouvel élan dans les prochaines années. Les experts envisagent une croissance continue au moins jusqu'en 2012.

Les mines d'uranium

La variation de l'extraction de l'uranium, combustible de l'énergie nucléaire, est sensible à ces tendances, ainsi qu'à la réduction des armements nucléaires chez les grandes puissances. Mais elle l'est aussi à l'évolution des techniques : selon la place qui sera attribuée à l'enrichissement et au recyclage de l'uranium des centrales, à la récupération du plutonium, aux nouveaux combustibles dits mélanges d'oxydes (mox), toutes techniques où la France est en pointe, le recours aux mines sera plus ou moins intense.

La production minière s'avère très mobile : des gisements et même des villes en pleine actualité voici moins de dix

4. Le nucléaire civil et militaire en France

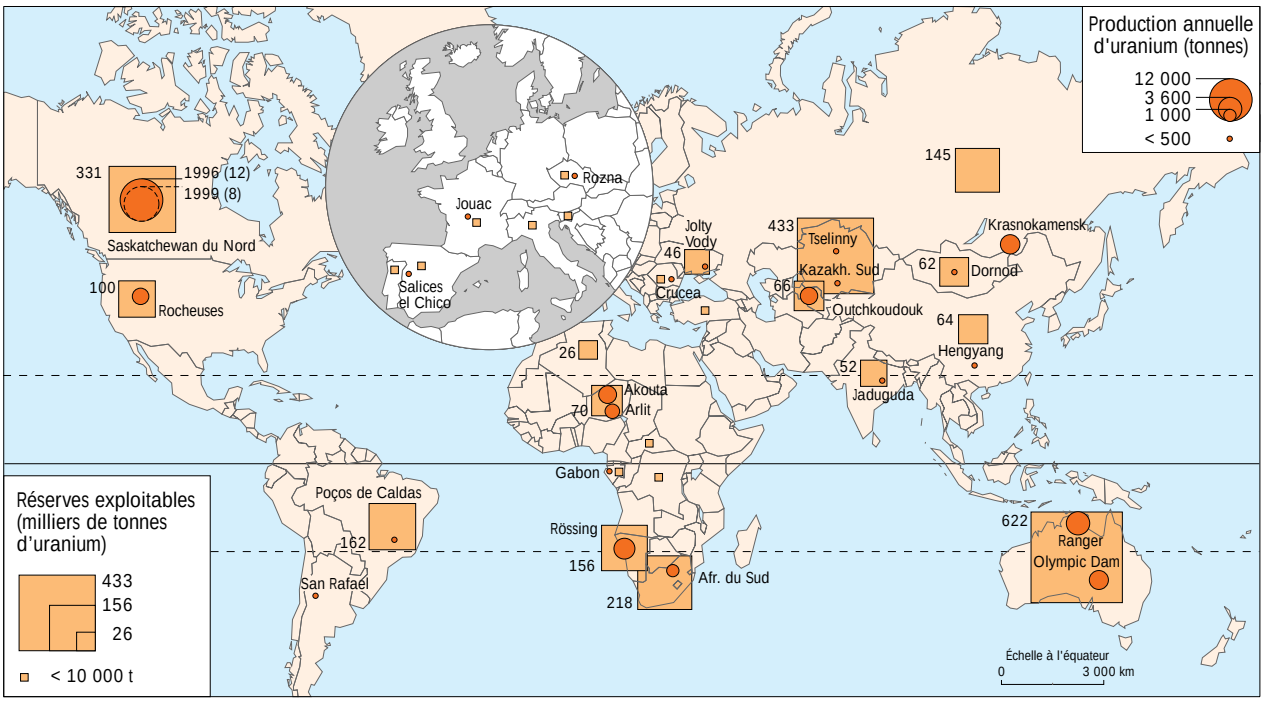


La France compte cinq opérateurs principaux de la filière nucléaire : EDF pour les centrales ; la Cogéma pour l'uranium, ses traitements et retraitements et pour des recherches sur les combustibles, les applications et la sécurité ; le CEA (Commissariat à l'énergie atomique) pour les recherches fondamentales et appliquées (y compris dans le domaine militaire) ; Framatome pour l'ingénierie (construction de centrales en particulier) ; la DGA (Direction générale de l'armement) du ministère de la Défense pour les armes. Les engagements internationaux de la France limitent son arsenal d'armes à 450 fusées à tête nucléaire (3e du Monde) dont 45 sur les avions des bases de Luxeuil et Istres, 20 sur les Super-Étendard du porte-avion *Foch*, tout le reste sur les deux sous-marins opérationnels. Les silos et réserves de Suippes (missiles Hadès) et d'Albion ont été fermés. Le montage et le démontage des ogives sont assurés par le CEA à Valduc (1 000 emplois), dans les forêts de la Côte-d'Or à l'ouest d'Is-sur-Tille. Certains centres de recherche et d'essais sur les missiles et leurs effets ont également à traiter en partie de l'arme nucléaire (région bordelaise, dont 1 200 personnes à Biscarosse ; Gramat ; Toulouse, Toulon, Brest, Vernon).

L'interdiction des essais et la réduction des armements ont amené à fermer le centre d'essais du Pacifique à Mururoa-Fangataufa, ainsi que les laboratoires de Vaujours et Valenton en banlieue parisienne. En remplacement, ont été installés de coûteux équipements de simulation au centre CEA du Barp (Gironde, 800 salariés) et dans le camp militaire de Moronvilliers à l'est de Reims. Le CEA a un autre centre technique au Ripault (Mont-sur-Gesnes, au sud de Tours, 800 salariés).

Les grands centres de recherche, munis de réacteurs spécialisés, sont à Paris et en banlieue parisienne (Saclay surtout), Marcoule, Cadarache et Grenoble. Les principales installations de préparation et de traitement des combustibles nucléaires sont dans le Sud-Est, à Pierrelatte (enrichissement de l'uranium), Romans (fabrication de combustible), Marcoule (qui produit notamment du plutonium et dispose du réacteur prototype Phénix), Cadarache, Miramas et Narbonne, tandis que La Hague assure le retraitement des combustibles après usage. Enfin, Framatome et ses filiales ont dispersé les fabrications de chaudières pour centrales nucléaires (surtout Chalon-sur-Saône et Le Creusot) et de gaines pour les barres d'uranium (Ugine, Jarrie, Rugles, Paimbœuf, Montreuil-Juigné).

Il en résulte une carte remarquablement diffuse, ce qui divise les risques tout en les reportant en partie sur les transports.



5. Les mines d'uranium en activité

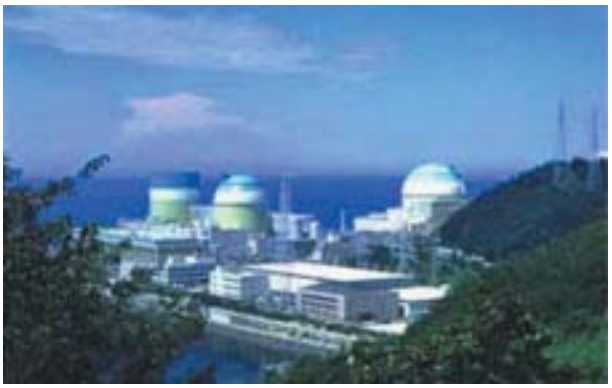
ans sont déjà abandonnés. Les principales firmes prennent encore aujourd'hui de nombreuses options, jusque dans des régions peu accessibles du globe ; il n'est pas certain qu'elles seront suivies d'extractions. Les ressources sont très dispersées, tant dans le socle que dans les sédiments qui en sont issus. Les teneurs des minerais sont extraordinairement variables : de 0,03 % à Rössing (Namibie) à 13 % à Cigar Lake (Saskatchewan), soit de 1 à 433, ce qui pèse sur les prix de revient. En l'état actuel des connaissances et des coûts, c'est l'Australie qui semble détenir les réserves les plus étendues : 622 000 t récupérables à un coût maximum de 80 dollars le kg, sur un total mondial estimé à 2 700 000 t selon les mêmes critères ; elle est suivie du Kazakhstan (439 000 t) et du Canada (331 000). Ces réserves connues et accessibles représentent 75 fois la production annuelle mondiale record, évaluée à 35 700 t en 1994-1995, et descendue à 31 400 en 1999.

Un petit nombre de mines fournit la plus grande partie du marché : les quatre premières en couvrent à elles seules la moitié. Le plus gros producteur est le Canada, pourtant en baisse en raison de l'état du marché : 8 000 t en 1999 contre 12 000 en 1997. Tout est concentré dans un seul ensemble, au nord du Saskatchewan, où se trouvent les deux plus grandes mines du monde : Key Lake (5 400 t/an à son maximum) et Rabbit Lake (4 600) sous le règne de la firme publique Cameco ; la Cogéma vient d'y fermer la mine de Cluff Lake (6e en 1996) mais se reporte sur les nouvelles Cigar Lake et MacArthur. Toutes ces mines sont proches du lac Wollaston ; c'est déjà un peu loin de l'« ancienne » et pionnière Uranium City, qui se reconvertit en station touristique sur la rive nord du lac Athabasca. Le deuxième producteur est l'Australie, en deux lieux distincts : Ranger, 3e du monde, 4 100 t/an, tout au nord des Territoires du Nord ; Olympic Dam, 7e du monde (1 400 t/an en 1997, mais qui tend vers 2 800), en Australie du Sud ; le reste est fermé, y compris Radium Hill, jadis célèbre ; les ressources sont abondantes, repérées, et les projets sont nombreux.

Viennent ensuite la Namibie, avec une seule mine à Rössing, tout près du port de Swakopmund (4e, 2 900 t/an) ; le Niger, qui a deux sites sous autorité de la Cogéma, Akouta (5e, 2 100 t) et Arlit (8e, 1 400 t) à la bordure occidentale de l'Aïr au nord d'Agadès. L'Afrique du Sud extrait l'uranium de ses mines d'or et fournit 1 000 t/an (Vaal Reefs). On exploite encore une mine au Gabon, mais la production est tombée à 300 t/an.

La Russie n'a plus que le gisement du bassin de l'Argoun dans la région de Tchita (Sibérie), traité dans l'usine

6. La centrale nucléaire de Sellafield et la mer d'Irlande



7. La centrale nucléaire d'Ikata au Japon

ex-secrète de Krasnokamensk (2000 t); l'Ouzbékistan est à 2000 t (surtout Outchkoudouk dans le Kyzyl Koum, avec traitement à Navoï); le Kazakhstan est descendu à 1300 t (de part et d'autre du Karataou dans les régions du Sud et de Kyzylorda). La production de la Chine est évaluée à 500 t seulement (gisements dispersés, usine à Hengyang au Hunan); celle de l'Inde ne semble pas excéder 200 t; celle de la Mongolie devrait commencer prochainement (gisement de Dornod).

L'Europe et les États-Unis ont un rôle effacé. Ces derniers extraient 1800 t/an dans des gisements assez dispersés des Rocheuses (Wyoming surtout). Il reste provisoirement cinq ou six sites exploités en Europe : Salices el Chico en Espagne, 250 t (Salamanque), Jouac en France (Haute-Vienne, 400 t), Rozna en République Tchèque (500 t), Crucea en Roumanie (100 t, usine à Feldioara près de Brasov), les environs de Jolty Vody en Ukraine. Aux prix de revient actuels, la plupart doivent fermer (Jouac et Rozna en 2001, mais celle-ci a demandé un sursis).

Conclusion. — Les perspectives de la filière nucléaire, production d'uranium comprise, sont très larges. Le souci de la bonne santé de l'écoumène a deux exigences dans ce domaine. D'une part, prendre toutes les précautions nécessaires, non seulement pour la sécurité des centrales mais pour le confinement et le traitement des déblais et effluents miniers, car les gisements n'ont que trop longtemps été sauvagement exploités. D'autre part, loin des irrationalités et des intoxications *new age*, accroître le rôle civil de cette forme d'énergie, qui a fait jusqu'ici bien moins de victimes que les mines de charbon et les guerres pétrolières, et qui provoque bien moins de dégâts dans l'atmosphère.

(1) Cette filière, jugée plus dangereuse que les autres depuis l'accident de Tchernobyl en 1986, est présente dans six sites : Ignalina en Lituanie (2 réacteurs), Tchernobyl en Ukraine (il y reste un réacteur sur quatre, censé s'arrêter en décembre 2000), Bilibino dans l'Arctique tchouktche (4 très petites unités) et trois en Russie occidentale : Sosnovy Bor (région de Laningrad, sur la Baltique, 4 réacteurs), Desnogorsk (région de Smolensk, 3), Kourtchatov (région de Koursk, 4).

(2) Les faits nouveaux de 1999 sont la mise en service de nouveaux réacteurs à Wolsong (Corée, n° 4), Civaux (France, n° 2), Mochovce (Slovaquie, n° 2) et Kaïga (Inde); ont été arrêtés définitivement le site d'Aktaou au Kazakhstan et le réacteur n° 1 de Berseback (Suède), où le n° 2 reste en activité.

(3) Remarquons à l'occasion que les comportements prennent parfois de la distance avec les déclarations : de 1998 à 1999, les États-Unis (et la Russie) ont augmenté leur production tandis que la France et le Japon la réduisaient.

Sources. La plupart des données récentes ont été recueillies sur Internet. Trois gisements sont particulièrement riches : celui de l'Institut de l'Uranium de Londres, **www.uilondon.com**; celui du Wise (World Information Service on Energy), **www.antenna.nl/~wise/uranium/index.html** (mises à jour de juillet 2000); celui du Centre international pour la sécurité nucléaire, tenu par le laboratoire Argonne du US Department of Energy, **www.insc.anl.gov/**.

Le site NNI (No Nukes Inforesource) **www.ecology.at/db/nni/links.htm** donne un vaste ensemble de liens, tant du côté des groupes anti-nucléaires que des instances professionnelles et des institutions scientifiques.

Indications utiles aussi sur les sites du Commissariat à l'énergie atomique (**www.cea.fr** ainsi que **paprika.saclay. cea.fr/actu/html/**), de Cogéma (**www.cogema. com**), Framatome (**www.framatome.com**), de la DGA (**www.defense.gouv.fr/dga/fr/**). La brochure annuelle *Elecnuc* du CEA donne de nombreuses informations sur les centrales nucléaires dans le monde et peut être obtenue auprès de **claudette.tailland@cea.fr**. Des rapports détaillés sur le nucléaire militaire français sont consultables, par exemple sur le site du Sénat (**www.senat.fr/rap/**).