

# Les coûts du nucléaire en France : secret, incertitude et spirale

Quand ils parlent des coûts du nucléaire, les pouvoirs publics français et l'industrie nucléaire ne manquent jamais l'occasion de rappeler que son coût actuel, estimé à 31 euros par MWh par la Commission de Régulation de l'Électricité, place notre pays dans une situation favorable par rapport à ses voisins. Mais ils oublient ce faisant que le coût du nucléaire à construire (par ex l'EPR) ou à réhabiliter et mettre aux normes (le parc existant dont la moyenne d'âge est de 25 ans et dont 20 réacteurs dépasseront 30 ans de vie fin 2011) est et sera très différent de cette valeur.

## Pour l'EPR

Avec une commande passée en Finlande et une en France, l'EPR (European Pressurized water Reactor), un réacteur de 1 600 MWe basé sur un concept français et allemand et vendu par AREVA, était le premier réacteur dont la construction a été amorcée en Europe occidentale depuis dix-sept ans (vingt-huit ans hors de France) et le premier de son espèce à être construit dans le monde. Ajoutons que ce réacteur n'est pas de 3<sup>ème</sup> génération comme le prétendent ses promoteurs, mais le premier exemplaire du dernier palier de puissance de la 2<sup>ème</sup> génération des réacteurs de puissance construits en France, à uranium enrichi et eau ordinaire pressurisée qui équipent toutes les centrales nucléaires actuellement en fonctionnement en France et dont les coûts d'investissement n'ont cessé d'augmenter au fil du temps et avec les augmentations de puissance (voir Gros Plan n° 2).

Du côté finlandais, la compagnie d'électricité TVO avait annoncé, pendant la phase de demande d'autorisation, un coût de 2,5 milliards d'euros pour cette nouvelle centrale (Olkiluoto 3) et une durée de construction de quatre ans. Avec le choix de l'EPR, le prix (fixe) est monté à 3,2 milliards d'Euros. A la mi-2008, deux ans et demie après le début des travaux, le total des coûts d'investissement était estimé à 5 milliards d'euros et la durée de construction à sept ans. En août 2010 Areva reconnaissait que son estimation du coût final atteignait 5,7 milliards d'euros<sup>1</sup>.

Du côté français, les premières estimations fournies en 2003 au gouvernement par son administration étaient un coût de l'ordre de 2 milliards d'euros d'investissement et 28,40 euros par MWh. Très vite d'ailleurs ces estimations « officielles » se sont interrompues au nom du « secret commercial<sup>2</sup> ». De façon plus réaliste, EDF prévoyait que le coût de production de son nouveau réacteur serait de 43 puis 46 euros 2004 par MWh, sur la base d'un coût d'investissement de 3,4 milliards d'euros (estimation de juillet 2008). En décembre 2008, EDF révisait ses estimations et annonçait un coût du MWh de 55 euros, sur la base d'un coût d'investissement de 4 milliards d'euros. Mais en juillet 2010 l'investissement était réévalué à 5 milliards d'euros selon l'AFP<sup>3</sup>. Quant au MWh du projet de Penly, quelque temps plus tard il était donné par la même EDF à 60 euros. De son côté, la compagnie allemande E.ON estime un investissement de 5 à 6 milliards d'euros pour un EPR<sup>4</sup>.

Les coûts d'investissement de Flamanville et du réacteur finlandais, qui subissent tous deux encore des retards de chantier et des difficultés majeures, dépasseront très certainement 3 500 euros/kW, alors qu'en 2000 encore le

1 - Steve Thomas « EPR Crisis » *Geenwich University*.

2 - Voir à ce sujet le n° 25 des cahiers de *Global Chance* « Nucléaire, la grande illusion » page 71-72.

3 - Agence France Presse EDF « 2 ans de retard et des augmentations de coût », July 30, 2010.

4 - Journal « Les Echos » du 3 décembre 2008.

rapport Charpin Dessus Pellat<sup>5</sup> retenait la valeur de 1 300 euros/kW proposée par les acteurs du nucléaire à cette époque pour une série de 10 EPR, sans même rappeler que la DIGEC en 2003 retenait pour son étude « coûts de référence de l'électricité » une valeur encore beaucoup plus faible, 1 050 euros/kW. L'inflation depuis cette époque (15 %) n'explique que moins de 5 % de cette escalade des coûts.

Mais depuis, les choses n'ont fait qu'empirer : remise en cause par les autorités de sûreté de France, de Finlande et de Grande Bretagne, de l'architecture de contrôle commande de la centrale et surtout catastrophe de Fukushima, au point que l'Autorité de sûreté songe à un moratoire pour l'EPR de Flamanville...

### **Au plan international : il n'y a pas de « prix du marché du nucléaire »**

De plus, n'y a pas de « prix de marché » du nucléaire. Historiquement, dans la plupart des pays qui ont développé le nucléaire, cela s'est fait dans le cadre d'une politique de l'État, le plus souvent en lien avec des programmes militaires qui ont d'ailleurs dicté les choix de type de réacteurs et de combustible. Une partie des coûts a été prise en charge par l'État (voir Gros Plan n° 2).

Du fait du très faible développement de la production d'électricité d'origine nucléaire dans le monde et en particulier dans les pays de l'OCDE depuis une vingtaine d'années, il n'existe pas de « prix de marché » pour les centrales nucléaires qui puisse être comparé au prix de marché des techniques largement développées comme les centrales à charbon, au gaz, hydrauliques et même éoliennes.

Sur la période 2003-2006 par exemple 10 GW de centrales nucléaires seulement ont été installées (2 % de la puissance totale installée) contre 203 GW de centrales à gaz, 182 de centrales à charbon, 71 d'hydraulique, 34 d'éolien, etc.

Enfin, en France le coût réel du nucléaire est devenu comme le rapport Roussely un secret de défense nationale...

Il ne faut donc pas s'étonner qu'on ne puisse pas aujourd'hui prévoir le coût du nucléaire à construire à près d'un facteur 2, entre 60 et plus de 100 euros/MWh.

### **Est ce mieux pour le parc existant ?**

Les premières estimations d'investissement de mise à niveau des centrales du parc existant par EDF tournaient autour de 45 milliards d'euros. En faisant l'hypothèse très optimiste qu'à cette seule condition, le parc pourrait être prolongé d'une quinzaine d'années supplémentaires sans risque majeur, le surcoût actualisé du MWh atteindrait déjà plus de 12 euros/MWh<sup>6</sup>. Mais on sait bien que Fukushima va entraîner de nouvelles contraintes pour le parc existant : renforcement de l'enceinte de confinement des réacteurs, confinement des piscines de stockage de combustibles des centrales et peut être de la Hague, etc. Il est plus que probable que l'addition double, au moins : le coût du MWh atteindra alors au moins 60 euros/MWh, un niveau à peine inférieur au niveau actuel de l'éolien terrestre (65-70 euros).

La demande insistante d'EDF auprès des pouvoirs publics d'une augmentation des tarifs de l'électricité de l'ordre de 30 % en quelques années, que l'entreprise justifie au nom de la réhabilitation du parc nucléaire existant confirme cette évaluation (voir Gros Plan n° 1).

Indépendamment même de l'ampleur des sommes à déboursier en investissement par les industriels et l'État, se pose enfin à l'évidence un problème de dynamique de ces investissements. Comment s'organiser pour mettre en chantier à très court terme la mise au norme de vingt ou trente réacteurs dans les cinq ans qui viennent alors que la génération des ingénieurs et des techniciens compétente est en train de prendre sa retraite ?

### **Des incertitudes majeures sur la fin du cycle nucléaire**

#### ***Démantèlement.***

Les démantèlements d'installations nucléaires en cours se révèlent plusieurs fois plus chères que prévu. D'autre part les États-Unis et la Grande Bretagne affichent des coûts de démantèlement de leurs centrales dans un rapport proche de 15 : alors que la NRC (Nuclear Regulatory Commission) américaine envisage des coûts de l'ordre de 210 millions d'euros par réacteur (une valeur proche de la valeur de 15 % de l'investissement initial que retenait la DIGEC dans ses calculs de coût de référence en 2003), la Grande Bretagne envisage, elle, un coût de l'ordre de 100 milliards d'euros pour l'ensemble du démantèlement de ses centrales, soit 2,9 milliard d'euros par centrale.

5 - *Étude économique prospective de la filière électrique nucléaire, JM Charpin, B Dessus, R Pellat, La documentation française 2000.*

6 - *sur la base d'un taux d'actualisation de 8 % et 15 ans de production. Pour une production cumulée actualisée de 400\* 9,2 TWh = 3680 TWh et 45 milliards d'euros d'investissement le surcoût au MWh est de 45109/368010<sup>6</sup> MWh = 12,2 Euros.*

### ***Stockage définitif.***

L'évaluation par l'Andra de l'investissement du stockage géologique est passé en quelques années de 15 à 35 milliards.

Ces incertitudes majeures sur les coûts futurs du démantèlement et du stockage peuvent avoir des conséquences très significatives sur le coût final du kWh.

### **Le coût du combustible ?**

Un seul élément a priori favorable : l'effet Fukushima, en gelant de nombreux projets nouveaux et en arrêtant de nombreux autres devrait détendre le marché de l'uranium dont la bulle spéculative en formation risque bien d'éclater en entraînant l'effondrement des cours. Mais la France n'en bénéficiera guère, engluée qu'elle est dans la poursuite du retraitement et l'usage du Mox, en particulier dans l'EPR, combustible dont la compétitivité par rapport à l'uranium enrichi, déjà contestée pour des cours élevés de l'uranium, va encore se dégrader.

Il n'est guère nécessaire d'aller plus loin pour se rendre compte de très grande fragilité économique de notre modèle de tout nucléaire. Contrairement aux propos répétés mais non démontrés d'un lobby nucléaire et d'une oligarchie politique à courte vue, l'incertitude économique est beaucoup plus forte pour la filière nucléaire que pour une filière comme l'éolien, pourtant tant décriée, et plus encore que pour le potentiel d'économie d'électricité majeur que recèle notre pays dans les 20 ans qui viennent<sup>7</sup>.

---

7 - Voir en particulier « Du gâchis à l'intelligence » *Les Cahiers de Global Chance* n° 27, janvier 2010.

## **Gros plan n° 1**

### **Le coût de l'électricité du parc nucléaire actuel et son évolution à moyen terme**

Le discours pro-nucléaire des pouvoirs publics s'appuie souvent sur le fait que l'électricité nationale grâce à l'énergie nucléaire est nettement moins chère pour les consommateurs français que pour ses voisins, par exemple d'un facteur deux par rapport à l'Allemagne.

Il faut tout d'abord prendre conscience qu'il ne faut en aucun cas confondre coûts de production et prix de l'électricité. Les prix de l'électricité sont le résultat de la somme des coûts de production, de transport, de distribution, auxquels s'ajoute les marges des entreprises et des taxes qui varient énormément d'un pays à l'autre. En Allemagne par exemple le prix plus élevé de l'électricité pour les particuliers résulte en partie d'une politique fiscale volontariste des pouvoirs publics allemands destinée à maîtriser la consommation d'électricité.

Dans un pays comme la France, le prix actuel de l'électricité pour un particulier se situe autour de 12 centimes d'euro par kWh. La part de la production électrique dans ce prix n'est que de l'ordre du quart de cette somme. Selon la Commission de Régulation de l'Électricité, le coût de production du nucléaire est de 3,1 centimes par kWh. Ce coût, effectivement assez faible, est associé à un parc nucléaire largement amorti puisque l'âge des centrales se distribue selon l'histogramme suivant : 6 % des réacteurs ont 31 à 33 ans, 34 % 26 à 30 ans, 40 % 21 à 25 ans 13 % 15 à 20 ans et seulement 7 % moins de 15 ans (en moyenne 25 ans). Mais on voit bien que près de 40 % des réacteurs atteignent leur limite d'âge de 30 ans aujourd'hui ou dans les quelques années qui viennent. Cette situation de coût n'est donc pas pérenne.

Depuis plusieurs années, et encore tout récemment, la direction d'EDF a essayé d'obtenir des pouvoirs publics l'autorisation d'augmenter ses tarifs de l'ordre de 30 % en 4 ou 5 ans, en justifiant cette demande par la nécessité d'investir lourdement dans la réhabilitation du parc nucléaire pour prolonger sa durée de vie moyenne de 30 à 40 ans, voire plus.

Pour un particulier cette augmentation se traduirait donc par un surcoût de l'ordre de 3,6 centimes d'euros justifiés par cette réhabilitation. Mais on voit du même coup que le coût du kWh nucléaire ainsi réhabilité passerait de 3,1 à plus de 6 centimes.

C'est donc une valeur de coût de cet ordre au minimum (sans tenir compte par exemple des nouvelles exigences de sûreté post Fukushima) qu'il serait raisonnable de prendre dans les comparaisons entre filières électriques pour les années qui viennent et non pas la valeur de coût actuelle qui ne concerne qu'un parc pratiquement obsolète.

## Gros plan n° 2 : Le coût d'édification du parc nucléaire français : Un exemple de « désapprentissage en marchant »

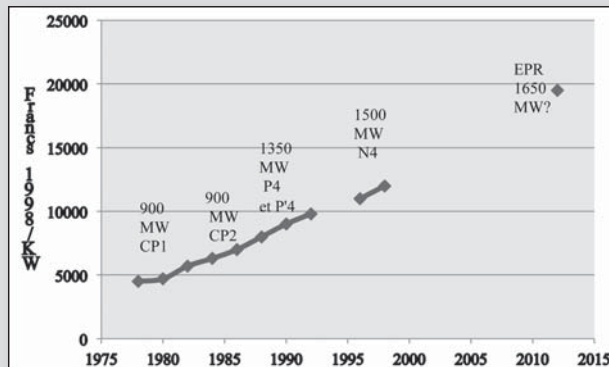
Arnulf Grubler (*International Institute for Applied Systems Analysis*),

Dans cet article Arnulf Grubler reconstitue le déroulement du programme nucléaire français de PWR, considéré unanimement comme le programme le plus réussi dans un pays industriel. Parmi les clés du succès, une centralisation complète des décisions, un degré élevé de standardisation, une stabilité institutionnelle remarquable et des délais relativement courts de construction. L'article s'intéresse principalement à l'évolution annuelle des coûts de ce programme. Le principal enseignement de cette étude est que, malgré ces conditions a priori idéales, ce programme se caractérise par des coûts d'investissement rapidement croissants au cours du temps. Par contre, les coûts de maintenance et d'opération du parc restent remarquablement constants malgré le handicap que constitue l'importance des moyens de base (75 %) qui se traduit par la nécessité de moduler la puissance nucléaire, affectant ainsi son facteur de charge.

L'exemple français montre bien que l'hypothèse d'un apprentissage industriel significatif supposé conduire à une réduction des coûts dans le temps dans ce domaine nucléaire aux unités très importantes et aux technologies complexes se révèle très inexacte. Les incertitudes concernant l'apprentissage industriel dans de telles technologies se révèlent bien supérieures à ce qu'on pouvait imaginer : les coûts spécifiques, au lieu de décroître avec l'accumulation d'expérience croissent significativement révélant ainsi un apprentissage négatif.

La courbe suivante illustre parfaitement cette situation paradoxale.

*Évolution du coût d'investissement au kW nucléaire au cours du temps depuis 1977 (en Francs 1998)*



On constate une croissance quasiment linéaire des coûts au kW depuis le début du programme des PWR avec une pente importante puisque les coûts d'investissement sont multipliés par 2,6 entre 1977 et 1998 en francs constants. On a placé sur cette courbe l'EPR de Flamanville en supposant qu'il soit réalisé en 2012 : on constate alors que son coût d'investissement serait de l'ordre de 20 000 francs 1998 le kW (3 500 euros 2010 le kW), ce qui est cohérent avec les coûts actuellement prévisibles de cette installation.

L'auteur tire de son étude une conclusion majeure : alors que l'industrie nucléaire a tendance à mettre en avant l'opposition du public et les errements administratifs pour expliquer l'augmentation des coûts, ne serait-il pas plus utile qu'elle se pose la question de savoir si cette tendance n'est pas intrinsèque à ce type de technologie qui se caractérise par une complexité croissante très difficilement gérable et qui vient contrarier les effets a priori positifs de la standardisation et de l'effet d'échelle ?

## Gros plan n° 3

# Un rapport américain qui en dit long sur la compétitivité du nucléaire aux États-Unis

## Nuclear Power : Still not Viable without Subsidies

*Doug Koplov, Union of Concerned Scientists 2011*

L'auteur montre que tout au long de son histoire l'industrie nucléaire a toujours prétendu que les subventions qu'elle recevait étaient de nature très provisoire. En 1954 General Electric affirmait « dans 5 ans, en tout cas avant 10 ans, les réacteurs nucléaires pourront être entièrement financés par le secteur privé sans aucune subvention gouvernementale ». Le rapport montre que ce jour n'est jamais arrivé et contrairement à ce que prétend l'industrie nucléaire, n'est pas près d'arriver.

Les plus grosses subventions à l'industrie nucléaire aux États-Unis n'apparaissent pas directement sous forme de cash. Elles consistent plutôt à faire transiter une partie des coûts de construction et les risques de fonctionnement des investisseurs vers les contribuables, en mettant à leur charge une série de risques qui vont des surcoûts de construction ou des conséquences d'accident éventuels, jusqu'à la gestion des déchets. « Ces pratiques qui sont restées remarquablement constantes au cours du temps distordent les choix du marché, qui sans cela se seraient fixés sur des opérations moins risquées. Même sans transfert d'argent, cela constitue évidemment une subvention dont les conséquences sont importantes aussi bien pour l'industrie nucléaire que pour le contribuable ».

Pour étayer leurs propos les auteurs ont reconstitué les différentes subventions dont a bénéficié l'industrie nucléaire au cours de son histoire aux États-Unis : rapportées au kWh produit, les subventions qu'ils définissent comme « héritées »<sup>1</sup> qui ont accompagné la construction des réacteurs des années 80, représentent de l'ordre de 140 % du prix de vente moyen de l'électricité nucléaire produite entre 1960 et 2008.

Autrement dit « les subventions ont été plus rentables pour l'industrie nucléaire que la vente d'électricité ».

En plus de ces subventions héritées, les propriétaires des centrales nucléaires en fonctionnement (104 réacteurs nucléaires) bénéficient actuellement de subventions qui diminuent le coût de l'uranium, de l'assurance, de la sûreté et de la sécurité, de l'eau de refroidissement, de la gestion des déchets, du démantèlement, etc.. Plus difficiles à estimer que les précédentes, elles sont évaluées par les auteurs entre 13 % et 98 % du prix de l'électricité produite. Cette fourchette très large s'explique d'une part par l'incertitude sur les coûts réels d'un accident éventuel, sur les pratiques d'amortissement favorables des réacteurs appartenant au secteur public, et sur les subventions diverses accordées aux possesseurs privés de centrales vieillissantes. Mais le bas de la fourchette de subvention, qui s'applique aux investisseurs privés, avec une subvention de 0,7 ct\$, représente déjà 35 % du coût de production nucléaire (coûts de fonctionnement de maintenance et de combustible, à l'exclusion des coûts d'investissement). Cela représente aussi 80 % de l'avantage relatif du coût de production nucléaire par rapport au charbon. Dans le cas de centrales appartenant à des organismes publics, les subventions sont deux fois plus fortes avec des conséquences proportionnelles sur la compétitivité réelle de l'électricité nucléaire.

Les auteurs analysent enfin le montant des subventions qui s'appliquent aux réacteurs actuellement en construction ou en projet. En effet, les subventions héritées ou actuelles sont des facteurs importants pour permettre de poursuivre sans pertes financières le fonctionnement des centrales existantes. Mais elles ne sont pas suffisantes pour attirer de nouveaux investissements dans le nucléaire.

Une fois de plus on constate que les subventions aux nouveaux réacteurs pourraient en fin de compte dépasser la valeur de la production d'électricité puisqu'elles se situent dans une fourchette de 4,2 à 11,4 ct\$, soit 70 à 200 % de la valeur marchande prévue pour l'électricité produite.

Les auteurs dressent enfin un tableau croisé qui indique les principales subventions dont ont bénéficié, bénéficient actuellement, ou bénéficieront les réacteurs, selon qu'ils appartiennent à des investisseurs publics ou privés.

*1 - Subventions « héritées » (legacy subsidies) : subventions accordées à l'industrie nucléaire dans sa phase de lancement et qui se sont poursuivies par la suite.*

**Subventions aux réacteurs existants et aux nouveaux réacteurs aux États-Unis**

En cts\$ par kWh Type de subvention	Subventions aux réacteurs existants			Subventions Nouveaux réacteurs	
	Héritées	Actuelles			
Bénéficiaire	Tous types de propriétaires	Privé	Public	Privé	Public
Facteurs de production (1)	7,2	0,06	0,96-1,94	3,51-6,58	3,73-5,22
Coûts intermédiaires (2)	0,10-0,24	0,29 -0,51	0,16-0,18	0,21-0,42	0,21-0,42
Subventions à la vente (3)	0	0	0	1,05-1,45	0
Gestion Sécurité et risques (4)	0,21-0,22	0,10-2,50	0,10-2,50	0,10-2,50	0,10-2,50
Démantèlement et déchets	Nd	0,29-1,09	0,31-1,15	0,13 - 0,48	0,16- 0,54
Total	7,50-7,66	0,74- 4,16	1,53-5,77	5,01-11,42	4,20-8,68
% du prix de vente (5)	139%-142%	13%-70%	26% -98%	84%-190%	70% -145%

(1) Facteurs de production : subventions réduisant le coût de l'investissement, de la main d'œuvre et du terrain.

(2) Coûts intermédiaires : subventions réduisant le coût de l'uranium, de l'enrichissement et de l'eau de refroidissement.

(3) Subvention proportionnelle au niveau des ventes.

(4) Subventions qui couvrent les risques de sûreté spécifiques au nucléaire.

(5) Coût de référence de l'électricité entre 1960 et 1990 = 5,4 ct\$, 5,9 ct\$ pour 2009 et au delà de 2009 5,7 ct\$.



## **Gros Plan n° 4 :**

### **Ne pas oublier l'ensemble des coûts, en particulier de fonctionnement.**

L'estimation économique de la production d'électricité d'origine nucléaire, passée ou future, doit prendre en compte l'ensemble des coûts sur une longue période de temps, ce qui est une caractéristique particulière de cette technologie, liée à la question de la gestion à long terme des déchets radioactifs. Il est très important de pouvoir estimer non seulement les coûts d'investissement mais aussi les coûts de fonctionnement sur la durée de vie de la centrale et bien au-delà.

Dans le cas de la France, une étude réalisée en 1999 pour le Premier ministre<sup>1</sup> a montré que, sur la durée de vie du programme français de centrales nucléaires (jusqu'à 2000), le coût d'investissement représente 25 % du coût total, le coût d'opération et de maintenance représente 43 % et le coût du combustible 32 % (20 % pour le combustible avant réacteur et 12 % pour le combustible après réacteur), avec de grandes incertitudes sur le coût réel du combustible après réacteur.

#### **Les coûts d'investissement**

- La centrale nucléaire elle-même et en particulier le réacteur nucléaire, en fonction du choix d'une industrialisation autonome ou de l'importation de la technologie.
- Les industries du combustible nucléaire, avec la même alternative (enrichissement de l'uranium, fabrication des combustibles).
- La gestion et le stockage des combustibles irradiés et, ou des déchets issus du retraitement, avec la nécessité dans tous les cas de capacités de stockage.
- Les équipements de Recherche et Développement.
- Un investissement souvent oublié : celui des lignes à très haute tension pour le transport de l'électricité à partir des centrales nucléaires de très grande puissance (de 1000 à 1500 MWe par unité ; en général une centrale comprend deux unités sur un même site).

Dans le cas du choix d'un développement autonome, les investissements sont très élevés. Dans le cas où l'essentiel de la technologie nucléaire est importée, le développement dépend d'une technologie et de prix fixés par le vendeur, sans bénéfice pour l'industrie et l'emploi locaux.

#### **Les coûts de fonctionnement**

- Combustible nucléaire (uranium naturel, uranium enrichi, éléments combustibles).
- Opération<sup>2</sup> et maintenance (remplacement des pièces) de la centrale nucléaire ;
- Gestion des combustibles irradiés et des déchets radioactifs.
- Déclassement et démantèlement des centrales nucléaires et des usines du combustible nucléaire.
- Coûts de fonctionnement de la Recherche et Développement.
- Suivi et contrôle de la sûreté nucléaire des centrales et des usines nucléaires (un très gros travail technique et administratif à la charge de l'État).

*1 - Étude commandée par Lionel Jospin et réalisée par J.-M. Charpin, Directeur du Commissariat au Plan, B. Dessus, Directeur au CNRS, R. Pellat, Haut Commissaire à l'Énergie Atomique, sur « L'évaluation économique de la filière nucléaire ».*

*2 - L'effectif du personnel de conduite (500 agents pour une unité de 1 500 MWe) est très supérieur à celui d'une centrale classique.*