

Le coût des investissements dans les centrales nucléaires

par Georg Woite

L'estimation du coût des investissements dans les centrales nucléaires est un des éléments les plus importants de la planification des systèmes énergétiques. On se propose ici d'exposer sommairement les observations et les estimations faites à ce sujet dans les Etats Membres, industrialisés ou en développement, et de fournir quelques indications qui faciliteront l'extrapolation des coûts.

La définition des coûts des investissements peut varier selon les organisations et selon les études. Cette diversité aboutit parfois à des différences du simple au double dans l'évaluation du coût d'installations identiques, ce qui risque d'entraîner de graves malentendus. Les coûts d'investissements dont il est question ici sont établis par référence à un jeu de définitions auquel l'AIEA fait appel pour les études à long terme sur l'expansion du réseau électrique d'un pays donné. Ces études [1-6] donnent la comparaison, pour une période de planification appropriée, entre les avantages respectifs offerts par les divers types d'installations nucléaires et traditionnelles pour l'expansion d'un réseau. A cet effet, le coût des investissements dans les centrales électriques est défini par la somme des coûts directs et indirects de l'installation achevée, y compris les dépenses accessoires d'établissement, les frais imprévus et les intérêts encourus pendant la construction. Ces coûts sont exprimés dans l'unité monétaire d'une année de référence, et sont relatifs à la production nette de courant électrique de l'installation. Ils ne comprennent pas l'alimentation initiale en combustible, l'eau lourde (le cas échéant), les impôts, les droits et les révisions de prix.

D'autres types d'études, notamment les études financières, doivent comporter les postes indiqués ci-dessus. Quand on connaît les règles particulières du pays ou du projet en question en matière de révision des prix, d'impôts et de droits, on peut faire l'estimation des coûts correspondants à partir de ceux qui sont exposés ici. Pour faciliter la comparaison des observations et des estimations provenant de diverses sources, on a fait figurer séparément les dépenses accessoires, les frais imprévus, et les intérêts encourus pendant la construction. Les coûts qui ne comprennent pas ces postes sont appelés coûts de base.

COÛTS D'INVESTISSEMENT OBSERVÉS

Lorsqu'on examine les coûts effectifs et les estimations des investissements dans les centrales nucléaires (tableaux 1 et 2), on constate entre eux des différences de nature à décourager toute tentative ultérieure d'estimation. La figure 1, établie d'après les séries complètes d'études effectuées pour l'USAEC et l'USERDA depuis 1967, illustre cette constatation peu rassurante. Tels qu'ils sont présentés, les investissements par unité (électrique) dans des installations à réacteurs à eau légère paraissent avoir sextuplé en huit ans. Comme ni les prix du matériel ni la quantité de main-d'œuvre nécessaire à la construction n'ont subi des augmentations de cette importance, il faut évidemment revoir la situation de plus près. La première chose à faire est de séparer les augmentations "comptables" dues à l'inflation des augmentations "réelles" résultant de nouvelles réglementations relatives aux licences ou d'autres raisons. Nous examinons ci-dessous les principales causes de l'augmentation des coûts de l'investissement.

M. Woite fait partie de la Section des études économiques de la Division de l'énergie d'origine nucléaire et des réacteurs.

Tableau 1: Coûts d'investissement observés¹

		1	1	3	4
Type d'installation		BWR	PHWR	PHWR	PWR
Production nette de courant électrique (MW(e))		640	320	207	626
Date de référence		1963	1968	1976	1975
Emplacement		Oyster Creek	Atucha	Rajasthan II	Angra
Pays/conditions d'octroi des licences		Etats-Unis	Argentine/Rép. féd. d'Allemagne	Inde	Brésil/ Etats-Unis
Source		Ref.[9]	Ref.[13]	Ref.[15]	Ref.[13]
Coûts en millions de dollars	Directs			58	271
	Indirects			22	54
	Sous-total (coûts de base)	60	70	80	325
	Frais accessoires	3	10	14	54
	Imprévus etc.	1	compris	compris	compris
	Intérêts	4	compris	30	132
	Total	68 ²	80 ²	124	511
Coût total en dollars par k W(e) net		106 ²	250 ²	600 ³	816
<p>¹ Les coûts sont en dollars de l'année de référence. Ils ne comprennent pas le combustible, l'eau lourde et les révisions de prix.</p> <p>² Coûts payés par le client.</p> <p>³ Taux de change: 9,12 roupies par dollar.</p>					

La réglementation: Les prescriptions en matière de sécurité et de protection de l'environnement ont pris des proportions qui n'étaient guère prévisibles dans les premières années de l'exploitation des centrales nucléaires. Ce fait est particulièrement manifeste aux Etats-Unis où il a pratiquement fallu doubler la quantité d'un nombre important de produits utilisés (notamment le béton, l'acier, les tubes, les câbles) pour se conformer aux règlements. Le nombre d'heures de main-d'œuvre par kW(e) consacré aux travaux de construction a augmenté en proportion. L'allongement des délais et la complexité croissante de la construction des installations nucléaires ont entraîné une augmentation des coûts indirects encore plus forte que celle des coûts directs. On a besoin d'un plus grand nombre de bâtiments provisoires pour emmagasiner, marquer et protéger les machines et les matériaux de construction. Il faut environ deux fois plus d'ingénieurs, etc., et pendant plus longtemps sur chaque chantier pour assurer la direction technique et administrative des travaux. Les exigences se sont également sensiblement aggravées en matière d'assurance et de contrôle de la qualité. Le

Tableau 2: Estimations récentes de coûts de centrales nucléaires¹

		1	2	3	4	5	6	7	8
Type d'installation		PWR	PWR	PWR	BWR	PWR	PWR	PHWR	PHWR
Production nette de courant électrique (MWe)		600	900	1139	1190	1100	1230	638	1100
Date de référence		1976	1976	1976	1976	1976	1977	1976	1976
Emplacement		Middletown, Etats-Unis			Ouest des Etats-Unis		non précisé	Ref.[12]	Middletown
Pays/conditions d'octroi des licences		Etats-Unis	Etats-Unis	Etats-Unis	Etats-Unis	Etats-Unis	Rép. féd. d'Allemagne	Canada	Etats-Unis
Source		Ref.[16]	Ref.[11] ²	Ref.[10]	Ref.[16]	Ref.[18]	Ref.[14]	Ref.[12]	Ref.[17]
Observations							Estimation haute	Clés en mains	
Coûts en millions de dollars	Directs	325	378	421	432			257	491
	Indirects	115	136	148	151			115	155
	Sous-total (coût de base)	440	514	569	583	655	820	372	646
	Frais accessoires ³	50	60	65	65	70	80	50	70
	Imprévus etc. ³	35	40	45	45	50	compris	30	50
	Intérêts	170	196	220	222	250	250	145	245
	Total	695	810	900	915	1025	1150	598	1011
Coût total net en dollars par kW(e)		1158	900	790	770	930	935 ⁴	937	920
¹ Les coûts sont en dollars de l'année de référence. Ils ne comprennent pas le combustible, l'eau lourde et les révisions de prix. ² Mis à jour par l'AIEA. ³ Estimés par l'AIEA lorsqu'ils n'ont pas été précisés. ⁴ Taux de change: 2,2 DM par dollar.									

nombre des normes applicables à la conception et à la construction d'une centrale nucléaire aux Etats-Unis a passé de 100 environ en 1970 à 1600 environ en 1976. Il ressort de l'étude des effets cumulés de la réglementation qu'ils ont doublé le coût des investissements dans les centrales nucléaires depuis les premières années de leur exploitation.

L'inflation et les intérêts encourus pendant la construction: Les taux annuels d'inflation ont considérablement augmenté dans les pays industrialisés depuis les débuts de l'énergie d'origine nucléaire, ce qui a également entraîné une hausse des taux d'intérêt nominaux. Si l'on y ajoute l'allongement des délais nécessaires à la conception et à la construction des installations, on constate que l'importance tant absolue que relative de l'inflation et des intérêts encourus pendant la construction a considérablement augmenté.

Considérations commerciales: Avant 1970, les fabricants de réacteurs et les ingénieurs constructeurs étaient disposés à courir de gros risques commerciaux pour pouvoir s'introduire sur un marché d'avenir. Des vendeurs qui avaient conclu des contrats à bas prix ont subi des pertes importantes. Le quadruplement des prix du pétrole en 1973 les a mis dans une position beaucoup plus avantageuse. Ils ont porté alors leurs prix à un niveau leur permettant de couvrir tous leurs risques commerciaux ordinaires. Plus récemment, l'opposition de l'opinion publique, le ralentissement de la croissance et de la demande d'électricité, les difficultés financières et autres ont eu pour effet de réduire sensiblement les programmes d'énergie d'origine nucléaire de nombreux pays depuis 1975. En conséquence, on peut s'attendre aujourd'hui et pour l'avenir immédiat à une intensification de la concurrence entre fabricants et entre ingénieurs constructeurs.

ESTIMATIONS ACTUELLES DU COUT DES INVESTISSEMENTS

Le tableau 2 récapitule quelques estimations actuelles des coûts des investissements. Celles des colonnes 1 à 4 et de la colonne 8 sont fondées sur les mêmes hypothèses en ce qui concerne les licences et la situation économique et elles postulent des conditions d'emplacement quasi-idéales. On voit que les estimations relatives à des installations de 1100 à 1200 MW(e) varient de 770 à 940 dollars par kW(e), selon l'étendue des besoins à pourvoir et les conditions économiques¹. L'estimation du coût des réacteurs à eau bouillante est à peu près la même que celle des réacteurs à eau sous pression (col. 3 et 4). Pour un emplacement et des conditions de licence identiques, les réacteurs à eau lourde devraient coûter environ 15% de plus que les réacteurs à eau légère (col. 3 et 8). Mais si l'on applique les conditions canadiennes de licence de 1976 à un réacteur à eau lourde de 600 MW(e) du type CANDU, et les conditions de licence des Etats-Unis de la même année à un réacteur à eau pressurisée de même importance, le réacteur à eau lourde CANDU devrait coûter beaucoup moins cher que le réacteur à eau pressurisée (col. 1 et 7).

Des estimations récentes mais encore inédites portant sur des installations de 600 MW(e) donnent un coût total² de 800 millions de dollars (1300 dollars/kW(e)) ou davantage, tant pour les réacteurs à eau légère que pour les réacteurs à eau lourde.

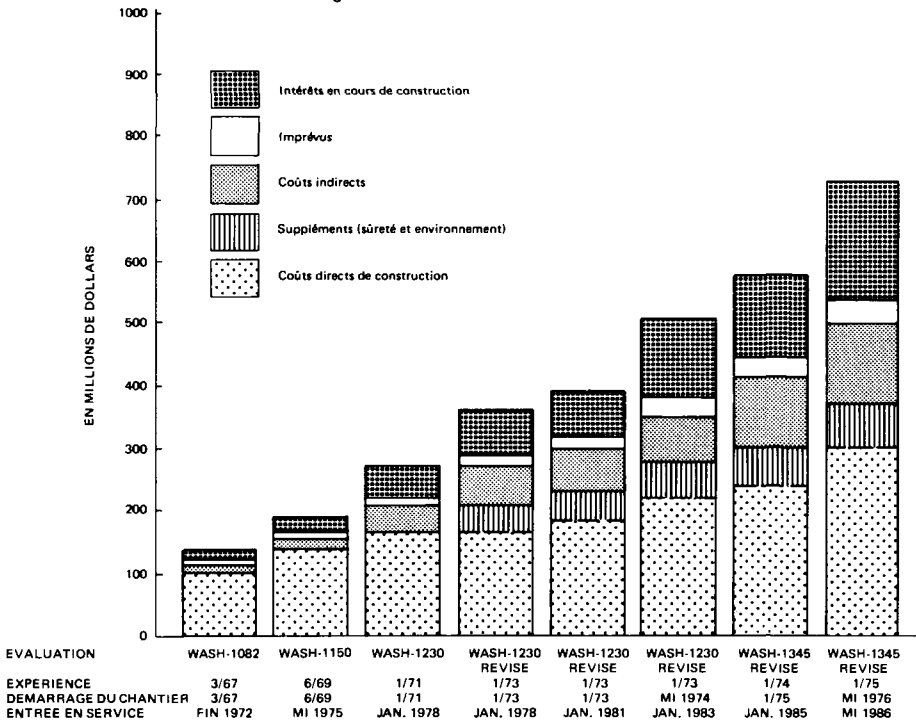
EXTRAPOLATION DES COUTS D'INVESTISSEMENT OBSERVES

Il est très difficile d'extrapoler le coût d'établissements futurs à partir de l'expérience des coûts de construction, parfois encourus dans d'autres pays, parce que les coûts subissent l'influence d'un grand nombre de facteurs dont certains ne sont guère prévisibles. On peut

¹ En dollars de 1976, y compris les dépenses accessoires, les frais imprévus et les intérêts en cours de construction; non compris le combustible, le D₂O et les révisions de prix.

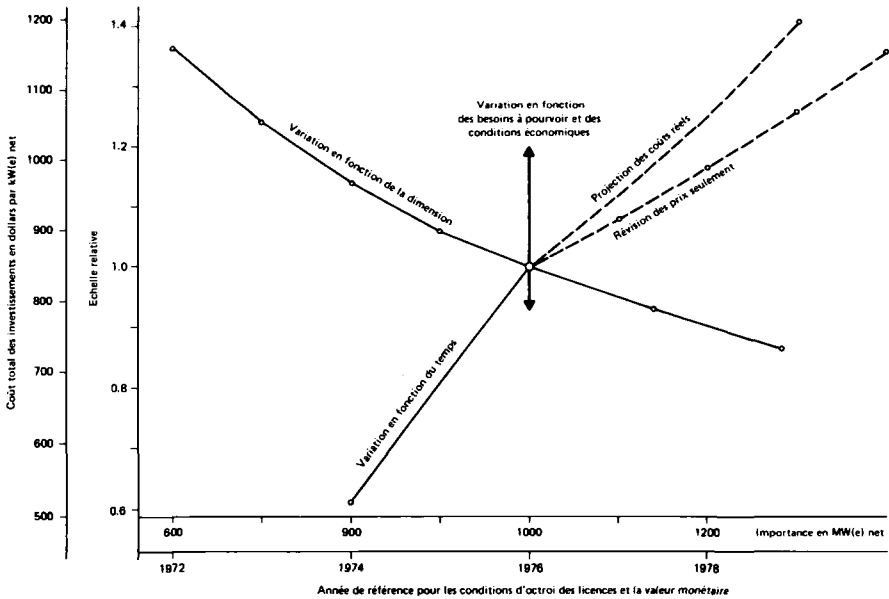
² En dollars de 1977, y compris et non compris les mêmes éléments que ci-dessus.

Figure 1: Estimation¹ des coûts d'investissement pour des centrales de 1000 MW(e) à réacteur à eau légère



¹ En dollars des Etats-Unis au démarrage du projet. Sources: Ref. [7, 8, 11].

Figure 2: Variation du coût d'une centrale nucléaire en fonction du temps et de la dimension¹



¹ La valeur de référence correspond au coût total de l'investissement (à l'exclusion du combustible et des révisions de prix) dans une centrale nucléaire de 1000 MW(e) net, à réacteur à eau pressurisée, aux Etats-Unis, pour des conditions d'emplacement quasi-idéales.

Tableau 3: Coefficients d'extrapolation¹ des coûts des centrales nucléaires

N°	Chapitre	Barèmes de coûts	
		1971-1975	1976-1977
21	Bâtiments	0,4	0,2
22	Installation du réacteur	0,6	
	Alimentation en vapeur nucléaire		0,3
	Autres éléments du réacteur		0,41
23	Turbine	0,8	0,75
24	Installation électrique	0,6	0,37
25	Divers	0,3	0,2
	Coûts de base	0,6	0,45

¹ Les coefficients N servent à extrapoler des coûts donnés C₀ (en millions de dollars) d'une installation de dimension S₀ (en MW(e)) pour obtenir ceux d'une installation de dimension S, en posant:

$$\frac{C}{C_0} = \left[\frac{S}{S_0} \right]^N$$

L'extrapolation ne doit pas être appliquée aux installations de moins de 600 MW(e).

toutefois faire état, en vue d'estimations approximatives nécessaires à la planification de l'énergie d'origine nucléaire, d'un certain nombre de facteurs principaux:

Importance de l'installation: Les conditions strictes actuellement posées à l'octroi des licences affectent relativement davantage les réacteurs petits et moyens que les grands (1000 MW(e) et au-dessus). Avant 1976, on estimait que le coût de base d'une installation nucléaire de 600 MW(e) était d'environ 26% inférieur à celui d'une installation de 1000 MW(e) (ou en d'autres termes que le kW(e) revenait environ 23% plus cher dans l'installation de 600 MW(e)). Depuis 1976, on estime que le coût de base d'une installation de 600 MW(e) n'est plus que de 20% inférieur à celui d'une installation de 1000 MW(e), ce qui revient à dire que le kW(e) coûte 33% plus cher dans l'installation de 600 MW(e). Ainsi les barèmes d'extrapolation du tableau 3 font apparaître pour 1976/77 des coefficients plus faibles que pour 1971-1975, ce qui montre que les coûts varient moins en fonction de l'importance de l'installation. En appliquant le barème d'extrapolation de 1976/77 on obtient la variation de coûts en fonction de la puissance électrique qu'illustre la figure 2.

Le temps: Les coûts de la construction des centrales nucléaires subissent l'inflation générale continue, et sont également affectés par l'aggravation croissante des prescriptions en matière de sécurité et de protection de l'environnement, ce qui, avec l'allongement des délais de construction et la hausse des taux d'intérêt, a entraîné depuis quelques années une hausse brutale du coût total des installations. Enfin, la mise au point de critères d'octroi des licences est toujours en cours. Mais la baisse des taux d'intérêt qui a lieu dans certains pays, la concurrence de plus en plus âpre entre les constructeurs, et la normalisation (espérée) devraient empêcher les coûts des centrales nucléaires de monter autant que par le passé.

La figure 2 donne, à titre indicatif, la projection des coûts de 1976 dans l'hypothèse d'une croissance annuelle de 8% (le taux global d'inflation) ou de 12% (effet cumulé possible de l'inflation, des critères d'octroi des licences et des autres facteurs examinés plus haut).

Etendue des besoins techniques à pourvoir: Les besoins à pourvoir pour la construction d'une centrale dépendent de la situation des lieux, des conditions posées à l'octroi de la licence et des spécifications techniques du client. Le tableau 4 fait état de quelques postes qui s'écartent parfois de la norme des besoins à pourvoir, et donne des estimations approximatives des coûts.

Dans les pays en développement, la construction pourra comporter des coûts supplémentaires, par exemple pour la création ou le perfectionnement des installations de transport et de déchargement, l'amélioration du système des télécommunications, l'alimentation du site en courant électrique et en eau, et l'établissement d'un camp (ou des indemnités de transport au personnel du chantier). De plus, dans les pays en développement, le fonctionnement des services publics nécessite en général une plus grande autonomie en matière d'entretien et de réparations que dans les pays industrialisés. En effet, il faut éviter les temps morts prolongés nécessaires au transport des instruments spéciaux, du matériel d'essai et d'inspection, ou des pièces de rechange que l'on ne peut se procurer que dans le pays du constructeur.

Conditions économiques: Nous avons examiné plus haut les taux d'intérêt et d'inflation ainsi que les autres facteurs qui sont fonction du temps. Il y a aussi les prix des terrains, du matériel de la centrale, des matériaux de construction, et les taux de salaires qui peuvent varier selon les pays, voire selon les emplacements. On peut évaluer les effets de ces variations notamment au moyen des programmes d'ordinateurs CONCEPT/19 ou ORCOST/20 que l'AIEA peut mettre à la disposition des pays membres.

Il faut toutefois faire observer que l'on a souvent surestimé les économies réalisables, en particulier sur les frais de construction imputables aux coûts de main-d'œuvre directs et indirects (études techniques, services de construction, etc.). L'expérience enseigne que l'effet des bas salaires est en grande partie compensé par une faible productivité du travail. De plus, les taux de salaires sur les chantiers de construction des centrales nucléaires sont souvent supérieurs à la moyenne du pays. Enfin, les travaux à effectuer par des spécialistes étrangers coûtent sensiblement plus cher que dans leurs pays d'origine. Les autres paramètres susceptibles d'exercer une influence décisive sur la comparaison entre les diverses offres soumises sortent du cadre du présent article: il s'agit entre autres du montant et des conditions des emprunts, taux de change entre la monnaie locale et monnaie étrangère et de leurs fluctuations.

L'ENERGIE D'ORIGINE NUCLEAIRE EST-ELLE CONCURRENTIELLE?

De nombreuses préoccupations se sont manifestées dans les pays industrialisés au sujet du danger possible que présentent les centrales nucléaires et de leur impact sur l'environnement et sur la société. Ces préoccupations ont soulevé des problèmes juridiques auxquels on a souvent répondu en renforçant l'équipement de sécurité et de protection de l'environnement. Cette évolution a contribué, avec d'autres facteurs, à faire monter en flèche les coûts des investissements dans les centrales nucléaires. Les prix de l'uranium et de certains services du cycle du combustible nucléaire ont également subi des augmentations spectaculaires. Il en est résulté que les hausses de coût de l'électricité d'origine nucléaire ont été supérieures au taux général d'inflation. Mais comme la même évolution s'est produite dans le domaine des combustibles fossiles, le courant d'origine nucléaire a tout de même conservé un avantage économique sur le courant à base de combustibles fossiles dans la plupart des pays industrialisés. En voici les raisons:

- L'énergie d'origine nucléaire exige un gros investissement initial, difficile à réaliser dans la plupart des pays en développement.
- Des considérations relatives à la stabilité du réseau électrique s'opposent à la création d'installations de 1000 MW(e) ou davantage dans la plupart des pays en développement. Or, le coût des investissements spécifiques (en \$ par kW(e)) dans des installations plus petites est plus élevé.
- Les centrales nucléaires coûtent généralement plus cher dans les pays en développement que dans les pays industrialisés.
- Dans de nombreux pays en développement, la réglementation relative à l'environnement est moins stricte et permet d'y construire des centrales chauffées au mazout ou au charbon sans les équiper de systèmes d'élimination du SO_x. Les investissements et les frais d'exploitation seront donc moindres que dans les pays industrialisés où cela n'est pas possible.

Et les installations nucléaires ne peuvent malheureusement pas bénéficier de ces réductions de coûts, car elles sont conçues pour répondre aux conditions posées à l'octroi des licences dans le pays du constructeur. Toutefois, les grandes centrales électriques sont généralement installées au voisinage des centres de consommation. Vu la pollution croissante de l'air dans ces zones industrialisées et fortement peuplées des pays en développement, on peut supposer que ces derniers seront de plus en plus nombreux à exiger l'équipement des installations de 600 MW(e) et au-delà en dispositifs d'élimination du SO_x. Dans ces conditions, on ne saurait sans risque d'erreur supposer que la compétitivité économique des centrales nucléaires est fonction, dans les pays en développement, du montant des investissements nécessaires pour une centrale nucléaire équipée de tous les dispositifs de sécurité et de protection de l'environnement et de ceux qu'exige la construction de centrales chauffées au mazout ou au charbon ne possédant pas de tels équipements. C'est dans chaque cas d'espèce et dans chaque pays qu'il y a lieu de comparer les compétitivités respectives de la centrale nucléaire et de la centrale thermique traditionnelle.

Bien que la compétitivité commerciale constitue un élément très important de la décision lorsqu'il s'agit de gros investissements, il peut y avoir des considérations stratégiques qui justifient la construction d'une centrale nucléaire même lorsqu'elle n'est pas entièrement concurrentielle du point de vue strictement économique:

- La construction d'une centrale nucléaire peut contribuer au développement de l'industrie locale.
- On prévoit une accélération de la hausse des prix des autres sources d'énergie.
- La centrale nucléaire peut rendre le pays moins dépendant des importations de pétrole.

D'autres considérations stratégiques peuvent constituer des contre-indications, notamment dans les pays en développement:

- Le souci de la non-prolifération a entraîné des restrictions à l'exportation du matériel, des matières et des compétences nucléaires.
- La création d'un cycle complet du combustible nucléaire dépasse les moyens de la plupart des pays. Certains ne s'affranchiront de la servitude des importations de pétrole que pour tomber dans celle des importations de combustibles et de services nucléaires.

Ces dernières considérations pourraient inciter les responsables à différer la décision de construire une centrale nucléaire même si elle devait être concurrentielle sur le plan de la production d'électricité.

CONCLUSIONS

Les coûts des centrales nucléaires ont dépassé de très loin les estimations primitives, ce qui a entraîné de graves difficultés, des déceptions, des controverses et même l'annulation de

Tableau 4: Variations caractéristiques des coûts de centrales nucléaires

A) Variations des besoins à pourvoir¹				
N° de compte	Désignation des postes	Variations de coût en millions de dollars		
		Minimum	Maximum	Exemple
Coûts directs				
20	Etude du site (y compris l'examen détaillé de la structure du sol, la mesure de la radioactivité naturelle, la faune, la flore, la météorologie)	3	6	4
21	Ouverture du site (eau, électricité, voie d'accès ² , télécommunications)	2	10	3
	Aménagement du site (excavation en terrain rocheux ou fondations en terrain meuble, drainage etc.)	2	20	5
	Arrivée et évacuation des eaux	-5 ³	20	0
	Protection contre les crues ou la mer	0	10	2
	Protection sismique ⁴	0	20	0
	Protection contre les tornades et les explosions de nuages de gaz	-15 ³	0	0
	Stockage supplémentaire de combustible épuisé et de déchets	5	10	5
	Dispositions permettant des installations ultérieures sur le même site	5	10	0
SOUS-TOTAL des comptes 20-21¹⁰				19
22	Protection contre les chutes d'aéronefs	10	15	0
23	Système supplémentaire de déviation ⁵ et appareils de contrôle pour faciliter l'exploitation et l'entretien	5	10	5
25	Installations d'inspection et de réparation du matériel contaminé ⁶	2	5	2
	Pièces de rechange ^{6,7}	2	8	3
	Frais de transport ⁶	10	15	10
SOUS-TOTAL des coûts directs (Comptes 20 à 25)				39

(Suite du tableau 4)

N° de compte	Désignation des postes	Variations de coût en millions de dollars		
		Minimum	Maximum	Exemple
Coûts indirects				
92	Direction technique et administrative de la construction, y compris la surveillance de l'exécution et les consultations spéciales ⁶	10	20	10
93	Formation du personnel	3	5	5
93	Camp de construction ⁶ (logement et installations sociales) y compris les frais d'entretien pendant la construction; ou indemnités de transport du personnel	5	20	6
93	Autres frais accessoires (assurance de la qualité à la charge du propriétaire, nouvelle rédaction et traduction de documents, frais généraux et administratifs, centre public d'information)	20	25	20
SOUS-TOTAL des coûts indirects				41
Dépenses avant le démarrage de la construction				
	Etudes préparatoires, planification, études techniques préliminaires des services publics ou des consultants, études de possibilité d'exécution	2	4	2
	Levé topographique du site, pré-sélection des sites	1	2	1
	Appel d'offres, examen des offres, du contrat	1	4 ⁸	3
Dépenses pour installations extérieures à la centrales				
	Construction ou perfectionnement d'installations de transport hors de l'enceinte de la centrale (routes, voies ferrées, ports)	4	10 ⁹	10
	Péniches, remorques	1	2	2

(Suite du tableau 4)

N° de compte	Désignation des postes	Variations de coût en millions de dollars		
		Minimum	Maximum	Exemple
Dépenses pour installations extérieures à la centrale (suite)				
	Transformateur principal	3	4	3
	Gare de triage	6	10	6
SOUS-TOTAL des dépenses avant le démarrage de la construction ou hors de l'enceinte de la centrale				27
TOTAL des variations des besoins à pourvoir ¹⁰				107
B) Variations des conditions économiques				
20	Terrains et droits fonciers ¹¹	-0,9	5	0
21-25	Matériel ¹²	0	40	20
21-25	Matériaux ¹²	-10	10	0
21-25	Main-d'œuvre ¹³	-40	0	-10
91-93	Frais indirects relatifs à la main-d'œuvre ¹³	-20	20	10
TOTAL des variations des conditions économiques				20

¹ Variations de l'étendue des besoins à pourvoir par comparaison avec la référence 10. (Les besoins de base correspondent aux conditions d'octroi des licences aux Etats-Unis au début de 1976 et à des conditions d'emplacement idéales). Il ne s'agit pas de minima ni de maxima absolus, mais plutôt de valeurs caractéristiques. Les estimations de variation de coût sont exprimées en dollars au début de 1977. Elles s'appliquent à des installations nucléaires de 600 MW(e); nombre d'entre elles ne varient guère en fonction de l'importance de l'installation.

² A l'intérieur de l'enceinte de la centrale.

³ Pour des conditions d'octroi des licences moins rigoureuses que celles qui sont en vigueur aux Etats-Unis.

⁴ Y compris la protection contre la liquéfaction sismique des terrains sableux; Les conditions à l'octroi des licences appliquées aux Etats-Unis comprennent la protection sismique jusqu'à une accélération horizontale de 0,25 g. La variation de coût "maximum" correspond à une protection contre 0,4 g.

⁵ Pour un flux de vapeur de 100% évitant la turbine.

⁶ S'applique particulièrement aux pays en développement.

⁷ Les besoins normaux aux Etats-Unis sont considérés comme entraînant une dépense de deux millions de dollars pour les pièces de rechange.

⁸ L'évaluation poussée d'un système complet comprenant tous les éléments comporte probablement des dépenses plus élevées.

⁹ Augmentation probable de ce poste en cas de construction de ponts.

¹⁰ On n'a pas fait figurer les sous-totaux des variations maximales et minimales parce qu'il est peu probable qu'elles soient toutes de l'une ou l'autre catégorie.

¹¹ Le prix du terrain est évalué en moyenne à un million de dollars; la variation "maximale" vise les zones très peuplées où le prix des terrains est élevé.

¹² Variations de prix du matériel et des matériaux de construction.

¹³ Variations des traitements, salaires et frais généraux; il est peu probable que l'on puisse réaliser des économies importantes sur les coûts de main-d'œuvre dans un premier projet nucléaire.

certaines projets. Cela s'est produit même dans les pays et les entreprises possédant une certaine expérience du nucléaire. Les pays et les entreprises dépourvus de cette expérience auront encore plus de difficultés à rester maîtres des coûts d'un projet nucléaire, à moins d'acheter une installation normalisée à un fournisseur compétent, auquel cas la participation des industries et des capacités locales sera très faible.

Les retards dans la construction et la mise en route sont au nombre des principales causes de la hausse des coûts: ils aggravent les révisions de prix, la charge des intérêts en cours de construction et entraînent soit des frais supplémentaires pour assurer une production de remplacement, soit une pénurie de courant, sinon à l'échelon des entreprises productrices, du moins à celui de l'économie générale du pays. Un des meilleurs moyens de limiter les coûts est donc de veiller à l'observation des délais en soignant la planification et en contrôlant les travaux. Il faut aussi prendre en temps utile les décisions de principe et les dispositions contractuelles suivantes:

- Un pays qui décide de se doter de l'énergie d'origine nucléaire doit prendre de bonne heure les décisions relatives au développement de l'industrie locale. Toute surestimation des possibilités de cette industrie, notamment en matière de normes de qualité, risque de se traduire ultérieurement par de graves difficultés. Il faut donc procéder très tôt à une étude approfondie des possibilités locales.
- Il faut choisir de bonne heure entre la production à bon compte d'électricité d'origine nucléaire et le transfert à l'industrie nationale de la technologie nucléaire. Un contrat pour une "centrale d'instruction" comportant un maximum de participation locale revient probablement plus cher que l'achat d'une installation qui n'en comporte qu'un minimum, et ne permet pas toujours de produire du courant à des conditions compétitives. Mais, s'il est bien aménagé, il peut permettre une participation locale croissante aux projets consécutifs, ce qui présente un avantage à long terme pour les pays où la demande d'énergie d'origine nucléaire a des chances de se développer.
- Il y a lieu d'établir une liste de pointage des principales décisions nécessaires en matière de sécurité et d'environnement et au sujet du développement de l'infrastructure technique. En prenant trop tard des décisions sur la réglementation, sur l'augmentation du voltage du système de transport de force, ou sur le développement du réseau de transports terrestres ou par eau, on risque de retarder considérablement l'exécution d'un projet nucléaire.
- Il faut absolument préciser les codes et les normes applicables à un projet de centrale nucléaire. La solution idéale serait qu'il n'y ait qu'un seul pays fournisseur et que ses codes et ses normes soient les mêmes que ceux du pays destinataire. La participation des industries mécaniques et électriques locales s'en trouvera facilitée.
- Il faut le plus possible faire appel à des modèles normalisés de centrales nucléaires. S'en écarter coûte généralement cher. En renonçant à tel ou tel élément, on n'économise pas beaucoup d'argent mais on risque de compromettre la sécurité et le rendement du modèle modifié.
- Il est essentiel de désigner pour chaque projet une installation de référence dont on suivra les modalités de conception et le rapport d'analyse de la sûreté. Il y a également lieu d'adopter les autres éléments "logiciels" tels que le programme de construction et l'organisation du chantier, dans la mesure où ils sont compatibles avec les conditions du pays d'accueil.
- Le contrat technique doit définir avec la plus grande précision possible l'étendue des besoins à pourvoir. Il faut, dès le début, y inclure les pièces de rechange, les instruments spéciaux d'inspection et d'entretien, les services du combustible nucléaire, etc. Les modifications coûtent plus cher lorsqu'elles sont introduites après coup.

L'Agence est disposée à aider les Etats Membres pour la planification et la mise en œuvre des projets de centrales nucléaires. Elle a publié des guides (21, 22) et organise des cours internationaux et des séminaires régionaux de formation nucléaire. Sur demande, elle envoie aux Etats Membres des missions de consultants et d'assistance technique. Ces missions peuvent contribuer à évaluer les coûts des projets nucléaires, à les limiter, et à faire respecter les délais d'exécution.

Bibliographie

- [1] Market Survey for Nuclear Power in Developing Countries, 1973–74.
- [2] AIEA, Nuclear Power Planning Study for Pakistan, 1975.
- [3] AIEA, Nuclear Power Planning Study for Bangladesh, 1975.
- [4] AIEA, Nuclear Power Planning Study for Indonesia, 1976.
- [5] AIEA, Nuclear Power Planning Study for Hong Kong, 1977.
- [6] AIEA, Nuclear Power Planning Study for Venezuela, à paraître en 1978.
- [7] United Engineers & Constructors Inc./USAEC, 1000 MWe Central Station Power Plants, Investment Cost Study, WASH-1230, 1–5, 1972–73.
- [8] USAEC/USERDA, Power Plant Capital Costs, Current Trends and Sensitivity to Economic Parameters, WASH-1345, 1974.
- [9] Jersey Central Power & Light Co., Report on Economic Analyses for Oyster Creek, 1964.
- [10] United Engineers & Constructors Inc./USNRC/USERDA, Capital Cost: Pressurized Water Reactor Plant, NUREG-0241, 1, 2 juin 1977.
- [11] Crowley, J.H., communication particulière.
- [12] CANATOM Limited, Investment Cost Study for CANDU 600, décembre 1976, annexe I.
- [13] Informations présentées à une réunion de consultants de l'AIEA sur l'extrapolation de l'expérience des coûts d'investissement, 1976.
- [14] Michaelis, H., Ist Kernenergie wirtschaftlich? (L'énergie d'origine nucléaire est-elle économique?) Conférence de la République fédérale d'Allemagne sur les réacteurs, mars 1977.
- [15] Sethna, H.N., Srinivasan, M.R., India's Nuclear Power Programme and Constraints Encountered in its Implementation, IAEA-CN-36/385, mai 1977.
- [16] Crowley, J.H., Informations présentées à une réunion d'un groupe consultatif de l'AIEA sur les réacteurs de faible et moyenne puissance, octobre 1977.
- [17] UE&C/USNRC/USERDA, Capital cost: Pressurized Heavy-Water Reactor Plant, à paraître en 1978.
- [18] Rudasill, C.L., Comparing Coal and Nuclear Generating Costs, EPRI Journal, octobre 1977.
- [19] USERDA, CONCEPT IV, ERDA-108, 1975.
- [20] USERDA, ORCOST II, 1976.
- [21] AIEA, Steps to Nuclear Power – A Guidebook, Technical Report Series N° 164, 1975.
- [22] AIEA, Economic Evaluations of Bids for Nuclear Power Plants, 1976.