

PREMIER MINISTRE

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

13.2

PROBLEMES TECHNIQUES ET ECONOMIQUES
LIES AU DEVELOPPEMENT
DES METHODES DE TRAITEMENT
ET D'UTILISATION DES DECHETS RADIOACTIFS

par

Lucien THIRIET, Jean SAUTERON, Claude OGER

DIRECTION DES RELATIONS EXTERIEURES

ET DES PROGRAMMES

ÉTUDES
ÉCONOMIQUES

Centre d'Etudes Nucléaires de Fontenay[^]aux, Roses

Rapport CEA - R - 3449

FEVRIER 1968

Da

SERVICE CENTRAL DE DOCUMENTATION DU C.E.A

C.E.N. - SACLAY B.P. n°2, 91 - GIF-sur-YVETTE - France

CEA-R-3449 - THIRIET Lucien, SAUTERON Jean,
OGER Claude

PROBLEMES TECHNIQUES ET ECONOMIQUES LIES AU
DEVELOPPEMENT DES METHODES DE TRAITEMENT ET
D'UTILISATION DES DECHETS RADIOACTIFS

Sommaire. - La communication rappelle d'abord succinctement les différentes techniques de traitement des déchets radioactifs résultant nécessairement de la production d'électricité d'origine nucléaire.

On situe ensuite l'importance du problème posé par ces résidus dans le cycle du combustible nucléaire. On fait ressortir l'influence économique du choix des méthodes de gestion sur le coût de production de l'énergie, et par conséquent sur la place dévolue à l'énergie nucléaire.

Une part importante de ces déchets peut faire l'objet d'une

./.

CEA-R-3449 - THIRIET Lucien, SAUTERON Jean,
OGER Claude

TECHNICAL AND ECONOMIC PROBLEMS ASSOCIATED
WITH THE DEVELOPMENT OF METHODS OF PROCESSING
AND USING RADIOACTIVE WASTE

Summary. - The paper briefly reviews the various techniques used in processing the radioactive wastes which unavoidably result from the generation of electric power from nuclear sources.

The paper goes on to define the relative importance, in nuclear fuel cycles, of the problem raised by these wastes. Emphasis is placed on the economic influence of management policies on the cost of power generation, and hence on the relative position of nuclear energy.

./.

utilisation rentable de l'industrie qui naîtra de cette utilisation.

Les principales applications envisagées sont évoquées :

- sources d'irradiation
- sources chauffantes
- générateurs auxiliaires d'énergie.

On conclut que d'ores et déjà des solutions satisfaisantes ont été apportées à ces problèmes, et l'on décrit les perspectives d'amélioration concevables.

1968

47 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

A substantial percentage of these wastes can be economically utilized. Attention is drawn to the major technical and economic features of the industry which will come into being as a result of this utilization.

The major uses anticipated are discussed :

- radiation sources
- heat sources
- auxiliary power generation.

The paper concludes that satisfactory solutions have already been found to these problems, and describes possible improvements.

1968

47 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

A partir de 1968, les rapports CEA sont classés selon les catégories qui figurent dans le plan de classification ci-dessous et peuvent être obtenus soit en collections complètes, soit en collections partielles d'après ces catégories.

Ceux de nos correspondants qui reçoivent systématiquement nos rapports à titre d'échange, et qui sont intéressés par cette diffusion sélective, sont priés de se reporter à la lettre circulaire CENS/DOC/67/4690 du 20 décembre 1967 que nous leur avons adressée, et qui précise les conditions de diffusion.

A cette occasion nous rappelons que les rapports CEA sont également vendus au numéro par la Direction de la Documentation Française, 31, quai Voltaire, Paris 7e.

PLAN DE CLASSIFICATION

- | | |
|---|---|
| 1. APPLICATIONS INDUSTRIELLES DES ISOTOPES ET DES RAYONNEMENTS | 8. PHYSIQUE |
| | 8.1 Accélérateurs |
| | 8.2 Electricité, électronique, détection des rayonnements |
| | 8.3 Physique des plasmas |
| | 8.4 Physique des états condensés de la matière |
| | 8.5 Physique corpusculaire à haute énergie |
| | 8.6 Physique nucléaire |
| | 8.7 Electronique quantique, lasers |
| 2. BIOLOGIE ET MEDECINE | 9. PHYSIQUE THEORIQUE ET MATHEMATIQUES |
| 2.1 Biologie générale | |
| 2.2 Indicateurs nucléaires en biologie | |
| 2.3 Médecine du travail | |
| 2.4 Radiobiologie et Radioagronomie | |
| 2.5 Utilisation des techniques nucléaires en médecine | |
| 3. CHIMIE | 10. PROTECTION ET CONTROLE DES RAYONNEMENTS, TRAITEMENT DES EFFLUENTS |
| 3.1 Chimie générale | |
| 3.2 Chimie analytique | |
| 3.3 Procédés de séparation | |
| 3.4 Radiochimie | |
| 4. ETUDES DU DOMAINE DE L'ESPACE | 10.1 Protection sanitaire |
| | 10.2 Contrôle des rayonnements |
| | 10.3 Traitement des effluents |
| 5. GEOPHYSIQUE, GEOLOGIE, MINERALOGIE ET METEOROLOGIE | 11. SEPARATION DES ISOTOPES |
| 6. METAUX, CERAMIQUES ET AUTRES MATERIAUX | 12. TECHNIQUES |
| 6.1 Fabrication, propriétés et structure des matériaux | 12.1 Mécanique des fluides - Techniques du vide |
| 6.2 Effets des rayonnements sur les matériaux | 12.2 Techniques des températures extrêmes |
| 6.3 Corrosion | 12.3 Mécanique et outillage |
| 7. NEUTRONIQUE, PHYSIQUE ET TECHNOLOGIE DES REACTEURS | 13. UTILISATION ET DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE ATOMIQUE |
| 7.1 Neutronique et physique des réacteurs | 13.1 Centres d'études nucléaires, laboratoires et usines |
| 7.2 Refroidissement, protection, contrôle et sécurité | 13.2 Etudes économiques, programme |
| 7.3 Matériaux de structure et éléments classiques des réacteurs | 13.3 Divers (documentation, administration, législation, etc...) |

Les rapports du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE sont, à partir du n° 2200, en vente à la Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 31, quai Voltaire, PARIS VIIème.

The C.E.A. reports starting with n° 2200 are available at the Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 31, quai Voltaire, PARIS VIIème.

- Rapport CEA-R-3449 -

Section des Etudes Economiques Générales
DREP - DPg

PROBLEMES TECHNIQUES ET ECONOMIQUES LIES AU DEVELOPPEMENT DES METHODES DE TRAITEMENT ET D'UTILISATION DES DECHETS RADIOACTIFS

par

L. THIRIET , J. SAUTERON

Commissariat à l'Energie Atomique

C. OGER

Saint-Gobain Techniques Nouvelles

TECHNICAL AND ECONOMIC PROBLEMS ASSOCIATED WITH THE DEVELOPMENT OF METHODS OF PROCESSING AND USING RADIOACTIVE WASTE

by

L. THIRIET , J. SAUTERON

Commissariat à l'Energie Atomique

C. OGER

Saint-Gobain Techniques Nouvelles

"Ce rapport a été présenté à la Conférence Mondiale de l'Energie, Session partielle de Tokyo, 16-20 Octobre 1966, communication n° 43

Droit de reproduction accordé par le Comité National Français

- Février 1968 -

INTRODUCTION

Like any industry, the generation of electricity from nuclear fuels involves the production of waste. That part of the waste which is radioactive, however, represents a specific danger which is unknown in other industrial sectors.

In this study we shall first of all define the origin and nature of the different kinds of radioactive waste due to nuclear electricity generation in general.

The present technical and economic aspects of the processing and use of radioactive waste will then be examined ; processing or storage methods, in other words, the management of the waste, will be reviewed, as well as their economic effects.

In the future it may be hoped that the management of nuclear waste will not constitute merely an economic burden. It will be possible to recover and use certain products of value ; these possible developments will be discussed in the third section, devoted to the technical and economic prospects of the processing and use of radioactive waste.

We shall show finally that the contribution of the management of these materials to the kWh cost is so slight, that the problems raised by the development of methods of processing and using them cannot hamper the development of nuclear electricity generation.

INTRODUCTION

Comme toute industrie, la production d'électricité à partir de combustibles nucléaires entraîne la formation de déchets. Ceux de ces déchets qui sont radioactifs représentent cependant un danger spécifique inconnu dans les autres secteurs industriels.

Dans cette étude, nous préciserons tout d'abord, pour l'ensemble de la production d'électricité nucléaire, l'origine et la nature des divers déchets radioactifs qui en sont issus.

Les aspects techniques et économiques actuels du traitement et de l'utilisation des déchets radioactifs seront ensuite examinés ; les méthodes de traitement ou de stockage, autrement dit, les modes de gestion des déchets, seront passés en revue, ainsi que leur incidence économique.

Dans l'avenir, on peut espérer que la gestion des déchets nucléaires ne comportera pas que des charges économiques. Certains produits de valeur pourront être récupérés et utilisés ; ces possibilités de développement seront évoquées dans une troisième partie consacrée aux perspectives techniques et économiques du traitement et de l'utilisation des déchets radioactifs.

Nous montrerons enfin que la participation de la gestion de ces matières au coût du kWh est si faible que les problèmes posés par le développement de leurs méthodes de traitement et d'utilisation ne pourront pas entraver le développement de la production d'électricité.

I - ORIGIN AND NATURE OF THE RADIOACTIVE WASTE RESULTING FROM THE GENERATION OF NUCLEAR ELECTRICITY

Let us examine the different stages in the nuclear fuel cycle and limit ourselves to waste sources corresponding to industrial processes, excluding operations carried out in laboratories, research centres and experimental units. It is convenient to distinguish three industrial fields with quite different characteristics : the fabrication of fuel elements, the operation of nuclear power stations and the reprocessing of irradiated fuels.

1° - Fabrication of fuel elements

There are several successive stages in the fabrication of elements based on uranium, which is the only fissile material considered here as being developed on an industrial scale.

a) Mining and concentration of ores

All uranium ore reserves being exploited in the Western world have a relatively low concentration (1 to 2 kg of uranium per tonne of ore). Radon, the most dangerous gaseous intermediate product of the disintegration chain of radium, is present in the ores and escapes into the atmosphere either during mining itself, or during the first concentration operations (crushing, dissolving). By means of certain precautions designed to avoid radon being confined in a limited atmosphere in contact with man and by monitoring of any radium concentrations, it can be said that the radioactive hazard presented by radon does not raise any health physics problem (MPL⁽¹⁾ in the air : 10^{-8} curies/m³), nor any economic problem ; nor would it raise any if the annual production of the ore were 1,000 times as great, which seems inconceivable in view of the quantities which are assumed to be available in the world.

(1) Maximum permissible limit.

I - ORIGINE ET NATURE DES DECHETS RADIOACTIFS ISSUS DE LA PRODUCTION D'ELECTRICITE NUCLEAIRE

Examinons les différentes étapes du cycle des combustibles nucléaires, et limitons-nous aux sources de déchets correspondant à des processus industriels, à l'exclusion des opérations exécutées dans les laboratoires, centres de recherche et unités expérimentales. Il est alors commode de distinguer trois domaines industriels aux caractéristiques bien différentes : la préparation des éléments combustibles, le fonctionnement des centrales nucléaires et le traitement des combustibles irradiés.

1° - Préparation des éléments combustibles

Plusieurs stades se succèdent dans la fabrication des éléments à base d'uranium, seule matière fissile considérée ici comme développée à l'échelle industrielle.

a) Extraction et concentration des minerais

Toutes les réserves de minerai d'uranium exploitées dans le monde occidental sont à une teneur relativement faible (1 à 2 kg d'uranium par tonne de minerai). Le radon, intermédiaire gazeux le plus dangereux de la chaîne de décroissance du radium, est présent dans les minerais et s'échappe dans l'atmosphère soit au cours de l'extraction minière proprement dite, soit pendant les premières opérations de la concentration (broyage, dissolution). Moyennant quelques précautions destinées à éviter le confinement du radon dans une atmosphère limitée en contact avec l'homme et la surveillance des concentrations éventuelles de radium, on peut dire que le danger radioactif présenté par le radon ne pose ni un problème de protection sanitaire (LMA⁽¹⁾ dans l'air : 10^{-8} curies/m³), ni un problème économique ; il n'en poserait pas davantage si l'extraction annuelle du minerai était 1 000 fois plus importante, ce qui semble inconcevable en considération des quantités supposées disponibles dans le monde.

b) uranium refining and conversion into metal and various compounds
(oxides, fluorides, carbide, etc...)

The quantity of uranium refined in the Western world is at present 20,000 te/year. The main radioactive waste is radium, of a total quantity much less than in the corresponding mining industry, or more precisely radon, which is the daughter product ; however, in contrast to the case of the ore, the quantities of radon are limited to that corresponding to the decay of the radium since the last dissolving process.

The uranium is, moreover, in the concentrate form. Its toxicity and the economics of industrial operations will then warrant precautions in handling and the recovery of dust and other recyclable losses⁽¹⁾. The quantities of U finally rejected from the cycle (of the order of o/oo of the quantities of uranium treated) are low enough not to involve any particular discharge measure other than simple dilution.

c) Isotopic enrichment of uranium

For the same reasons as above, radioactive waste is practically non-existent in the isotopic separation plants in which, if gaseous processes using uranium hexafluoride are involved, it is mainly the toxicity and chemical aggressiveness of this compound which are feared.

However, although it is slight, there is a risk of a criticality accident in uranium isotopic enrichment installations : such an accident would give rise to very radioactive fission products and the cost of the measures taken to recover this waste and prevent subsequent harmful effects would have to be charged to the nuclear waste industry. Nevertheless, such accidents are very improbable, in view of the strict precautions taken to avoid them.

b) Raffinage de l'uranium et conversion en métal et divers composés
(oxydes, fluorures, carbure, etc...)

Les quantités d'uranium raffiné dans le monde occidental sont actuellement de 20 000 t/an. Le principal déchet radioactif est constitué par le radium, en quantité globale bien moindre que dans l'industrie minière correspondante, ou plus exactement par le radon qui en est le descendant, mais, à la différence du cas du minerai, les quantités de radon sont limitées à ce qui correspond à la décroissance du radium depuis la dernière dissolution.

L'uranium d'autre part se trouve amené en phase concentrée. Sa toxicité ainsi que l'économie des opérations industrielles justifient alors des précautions de manipulations et la récupération des poussières et autres pertes recyclables⁽¹⁾. Les quantités d'U définitivement rejetées du cycle (de l'ordre du o/oo des quantités d'U traité) sont suffisamment faibles pour n'entraîner aucune mesure particulière de rejet autre qu'une simple dilution.

c) Enrichissement isotopique de l'uranium

Pour les mêmes raisons que précédemment, les déchets radioactifs sont pratiquement inexistantes dans les usines de séparation isotopique, dans lesquelles, il s'agit de processus gazeux mettant en oeuvre l'hexafluorure d'uranium, on craint surtout la toxicité et l'agressivité chimique de ce composé.

Cependant, pour minime qu'il soit, un risque d'accident de criticité existe dans les installations d'enrichissement isotopique de l'uranium : un tel accident donnerait naissance à des produits de fission très radioactifs et le coût des mesures prises pour récupérer ces déchets et en interdire les effets nocifs ultérieurs devrait être imputé à l'industrie des déchets nucléaires. Toutefois, de tels accidents sont très improbables, en raison des précautions sévères prises pour les éviter.

(1) Conférence Mondiale de l'Energie - Session partielle en Suisse,
13-17 Septembre 1964 - Section IIc, rapport n° 101

(1) World Power Conference - Sectional Meeting in Switzerland, 13-17 September 64
Section IIc, paper n° 101.

d) Fabrication of fuel elements

The fabrication of fuel elements is no more likely than the previous stages systematically to produce radioactive waste which would have to be processed. It can be pointed out that the precautions taken to recover chips and dust are aimed rather at avoiding spontaneous combustion or at limiting the waste of expensive fissile materials.

2° - Operation of nuclear power stations

Although the operation of a nuclear reactor produces a large quantity of fission products, the majority of the latter are not normally in the form of waste until the subsequent reprocessing of the irradiated fuels, at least in the present stage of reactor technology involving reactors which are "proven", i.e. are built or under construction for the production of nuclear power.

Another source of radioactive waste from the operation of reactors is to be found in the different materials exposed to the flux of radiation (mainly neutron radiation) capable of activating these materials.

a) Fission products released by burst cans

In proven reactor technology, the fuel rods are enclosed in leak-tight cans and the large quantity of fission products formed remain confined within the elements. Thus, for example, 180 days' operation of a 500 MW(th) reactor can produce 4×10^8 Ci of fission products, which also decay rapidly after irradiation and may be reduced to 8×10^6 Ci a month later. This activity will appear again, as has just been said, during the reprocessing of the fuels.

Apart from contamination of the coolant by fission products coming from the burst cans, it may be that certain materials, structural components and miscellaneous equipment in the coolant circuit will be charged with small quantities of fission products : this contamination is then treated in the same way as if it were a case of induced radioactivity, which we shall now examine.

d) Fabrication des éléments combustibles

La fabrication des éléments combustibles n'est pas plus que les précédentes étapes, susceptible de produire systématiquement des effluents radioactifs à traiter. On peut signaler que les précautions prises pour récupérer les copeaux et les poussières ont plutôt pour but d'en éviter l'inflammation spontanée ou de limiter le gaspillage de matières fissiles chères.

2° - Fonctionnement des centrales nucléaires

Bien que le fonctionnement d'un réacteur nucléaire produise une grande quantité de produits de fission, l'essentiel de ceux-ci ne se retrouve normalement à l'état de déchets que lors du retraitement ultérieur des combustibles irradiés, du moins dans l'état actuel de la technologie des réacteurs, dits éprouvés, c'est-à-dire construits ou en construction pour la production d'électricité nucléaire.

Une autre source de déchets radioactifs provenant du fonctionnement des réacteurs se trouve dans les différents matériaux et matières exposés au flux des rayonnements (principalement neutroniques) capables d'activer ces matières

a) Produits de fission libérés par rupture de gaines

Dans le cadre des technologies de réacteurs éprouvés, les barreaux de combustibles sont revêtus de gaines étanches et les produits de fission formés en grande quantité restent confinés dans les éléments. Ainsi par exemple, 180 jours de fonctionnement d'un réacteur de 500 MWt peuvent produire 4×10^8 Ci de produits de fission, lesquels d'ailleurs décroissent rapidement après irradiation et peuvent être ramenés à 8×10^6 Ci un mois plus tard. Cette activité se retrouvera, comme il vient d'être dit, au cours du retraitement des combustibles.

Outre la contamination du fluide réfrigérant par les produits de fission provenant de la rupture des gaines, il se peut que certains matériaux, pièces de structures et équipements divers du circuit réfrigérant se soient chargés de petites quantités de produits de fission : cette contamination est alors traitée de la même façon que s'il s'agissait de la radioactivité induite, que nous allons examiner maintenant.

b) Activated materials

The activation produced by the neutron flux applies to all materials exposed to this flux. Excluding activation effects on the fuel elements themselves (this activity reappearing as waste in the reprocessing), it is thus possible to find solid, liquid and gaseous waste of various kinds, but their decay is usually fast and the quantities small, especially after storage and cooling.

The moderator and coolant liquids, when passing through the reactor core, may be a seat of formation of active isotopes of nitrogen, oxygen, hydrogen and elements present as various additives or resulting from the corrosion of the circuits. The majority of these isotopes have a life which is short enough not to raise waste problems. However, heavy water in reactors of that type can reach a total activity of 3.10^4 c/MW because of the formation of tritium : this must be specially treated.

In the case of gas coolants and sometimes in the case of the gas cushions thermally insulating coolants and moderators, there is normally activation. In air, krypton-85 and argon-41 are the most active, and in CO₂ various isotopes (C, N, O) are found. The quantities involved justify discharge of this gaseous waste with dilution into the atmosphere from high stacks.

It therefore appears that the quantities of radioactive waste produced in reactors, taking into account the usually short lives of the isotopes involved (although longer than those encountered in the fabrication of the fuel elements) are still relatively small and generally do not require any complicated and expensive processing, as is the case in reprocessing plants (see below).

b) Matériaux et matières activés

L'activation produite par le flux neutronique porte sur toutes les matières exposées à ce flux. En excluant les effets d'activation sur les éléments combustibles eux-mêmes (cette activité se retrouvant à l'état de déchet lors du retraitement), on peut donc trouver des déchets solides, liquides et gazeux de natures variées, mais dont le plus souvent les décroissances sont rapides et les quantités faibles, surtout après stockage et refroidissement.

Les liquides modérateurs et réfrigérants peuvent être, lors du passage dans le coeur des réacteurs, le siège de la formation d'isotopes actifs d'azote, d'oxygène, d'hydrogène et d'éléments présents comme additifs divers ou résultant de la corrosion des circuits. La plupart de ces isotopes ont une vie suffisamment courte pour ne pas poser de problèmes de rejet. Toutefois, l'eau lourde dans les réacteurs du même nom, peut atteindre une activité globale de 3.10^4 curies par MW à cause de la formation de tritium : elle doit faire l'objet d'un traitement spécial.

Dans le cas des réfrigérants gazeux et parfois dans celui des matelas gazeux isolant thermiquement réfrigérants et modérateurs, il y a normalement activation. Dans l'air, le krypton 85 et l'argon 41 sont les plus actifs et dans le CO₂ on retrouve divers radio-isotopes (C, N, O). Les quantités en jeu justifient le rejet de ces déchets gazeux avec dilution dans l'atmosphère à partir de cheminées élevées.

Il apparaît donc que les quantités de déchets radioactifs produits dans les réacteurs, compte-tenu des vies généralement courtes des isotopes en cause, quoique plus importantes que ce qui est rencontré dans la préparation des éléments combustibles, sont encore relativement réduites et ne nécessitent généralement pas de traitements difficiles et onéreux, comme dans les usines de retraitement qui seront étudiées maintenant.

3° - Processing of irradiated fuels

The processing of irradiated fuels is the largest source of radioactive waste (99.9 % of the total activity produced by the nuclear industry). The type and nature of this waste depend on the type of fuel (composition, enrichment, nature of the cladding, etc...), the method of dissolution and the separation processes used. The waste produced may be gaseous, liquid or solid.

a) Gaseous waste

Volatile or gaseous fission products are released mainly at the time when the fuel is being dissolved. Gaseous waste is also obtained at other stages of processing, for example during concentration operations and when apparatus is being opened up.

The gaseous products are principally iodine, xenon and krypton.

The radioactivity of these gases depends to a great extent on the cooling period of the fuel before it is processed. After 90 days' cooling, 1 kg of fuel contains only a few curies of iodine 131 and krypton 85.

b) Liquid waste

Liquid waste is generally divided into several categories according to its activity :

The most active are the chemical decanning solutions and the solutions of fission products obtained after extraction of uranium and particularly plutonium.

3° - Traitement des combustibles irradiés

Le traitement des combustibles irradiés est la plus importante source de déchets radioactifs (99,9 % de l'activité totale produite par l'industrie nucléaire). Le type et la nature de ces déchets dépendent du type de combustible (composition, taux d'enrichissement, nature du gainage, etc...), de la méthode de dissolution et des procédés de séparation utilisés. Les déchets produits le sont sous forme gazeuse, liquide ou solide.

a) Déchets gazeux

Les produits de fission volatils ou gazeux se dégagent principalement au moment de la dissolution du combustible. On obtient également des déchets gazeux à d'autres stades du traitement, par exemple, aux opérations de concentration et lors de la mise à l'air d'appareillages.

Ces produits gazeux sont essentiellement de l'iode, du xenon et du krypton.

La radioactivité de ces gaz dépend beaucoup de la durée de refroidissement du combustible avant son traitement. Après 90 jours de refroidissement, 1 kg de combustible contient à peine quelques curies d'iode 131 et de krypton 85.

b) Déchets liquides

Les déchets liquides sont généralement répartis en plusieurs catégories suivant leur activité :

Les plus actifs sont les solutions de dégainage chimique et celles de produits de fission obtenues après extraction de l'uranium et surtout du plutonium.

After concentration, these solutions can have a specific activity exceeding several hundred curies per litre.

1 tonne of fuel produces some tens to several hundred litres of concentrated fission product solution.

Medium-activity waste results from chemical treatment, for example, solutions for washing the extraction solvent and filter cleaning solutions. Their activity is of the order of some tens or hundreds of Ci/m³.

Finally, low-activity waste comes from secondary operations such as laundering, decontamination, etc.... The volume is very large. The activity is only a few mCi/m³.

c) Solid waste

Solid waste is produced fairly regularly either by operation of the plant (cans in the case of mechanical decanning, blocked filters, ion exchange resins, sludge from the liquid waste processing), or by ancillary operations (rags, paper, vinyl, rubbish, worn-out equipment, etc...).

The quantities and specific activity of this waste is very varied, especially for the second category, and it is not possible to estimate the quantity of activity associated with this waste.

Après concentration ces solutions peuvent avoir une activité spécifique dépassant plusieurs centaines de curies par litre.

1 tonne de combustible produit quelques dizaines à plusieurs centaines de litres de solution concentrée de produits de fission.

Les déchets d'activité moyenne proviennent des traitements chimiques. Par exemple les solutions de lavage du solvant d'extraction, les solutions de décolmatage des filtres. Leur activité est de l'ordre de quelques dizaines ou centaines de Ci/m³.

Enfin les déchets de basse activité proviennent d'opérations secondaires telles que le blanchissage, la décontamination, etc.... Leur volume est très important. Leur activité n'est que de quelques mCi/m³.

c) Déchets solides

Les déchets solides sont produits assez régulièrement soit par l'exploitation de l'usine (gaines dans le cas du dégainage mécanique, filtres colmatés, résines d'échangeurs d'ions, boues des traitements des déchets liquides), soit par les activités annexes (chiffons, papier, vinyle, gravats, matériel usagé, etc...).

Les quantités et l'activité spécifique de ces déchets sont très variables, surtout pour la seconde catégorie et il n'est pas possible d'estimer la quantité d'activité associée à ces déchets.

II - PRESENT TECHNICAL AND ECONOMIC ASPECTS OF PROCESSING AND USE OF RADIOACTIVE WASTE

We shall give a brief survey of the processing methods used most frequently. They all concern either dilution in the external medium or concentration of the radioactive products for the purpose of storing them.

1* - Treatment of gaseous waste

As the atmosphere offers vast opportunities for dilution, gaseous waste is discharged via high stacks after purification to bring the activity below the permitted limit. This operation is carried out by filtration, preceded if necessary by scrubbing and absorption.

Filtration, which is very efficient (better than 99.95 %), ensures retention of the finest solid particles on which the majority of the activity is fixed. Absorption fixes the radioactive isotopes which are in the gaseous form, for example iodine 131.

The treatment of gaseous waste is a relatively simple problem but very expensive if, in addition to the cost of the processing itself, it is necessary to include the cost of collecting the waste. It is necessary to keep all the "hot" zones of the nuclear installations at reduced pressure in order to achieve this total collection and to prevent radioactive particles being able to escape all control.

II - ASPECTS TECHNIQUES ET ECONOMIQUES ACTUELS DU TRAITEMENT ET DE L'UTILISATION DES DECHETS RADIOACTIFS

Donnons un rapide aperçu des méthodes de traitement les plus utilisées. Elles se ramènent toutes soit à une dilution dans le milieu extérieur, soit à une concentration des produits radioactifs en vue de leur stockage.

1* - Traitement des déchets gazeux

L'atmosphère offrant de vastes possibilités de dilution, les déchets gazeux sont rejetés par de hautes cheminées après avoir été épurés pour avoir une activité inférieure à la limite autorisée. Cette opération est réalisée par filtration, précédée si nécessaire de lavage et absorption.

La filtration, d'une très grande efficacité (supérieure à 99,95 %) permet de retenir les particules solides les plus fines sur lesquelles est fixée la majeure partie de l'activité. L'absorption fixe les isotopes radioactifs se présentant sous la forme gazeuse, comme par exemple l'iode 131.

Le traitement des déchets gazeux est un problème relativement simple, mais d'un prix élevé si, en plus du coût du traitement proprement dit, il faut y ajouter le coût de la collecte des déchets. Il est en effet nécessaire de maintenir en dépression toutes les zones "chaudes" des installations nucléaires pour réaliser ce ramassage total et éviter que des particules radioactives puissent s'échapper en dehors de tout contrôle.

2° - Treatment of liquid waste

The treatment of highly active waste (several thousand curies per litre), or fission products, has hitherto consisted of concentration (often with recovery of nitric acid) followed by storage in underground tanks either of stainless steel (acid storage), or of ordinary steel (alkaline storage).

In actual fact, such storage can only be temporary in view of the foreseeable life of the tanks (some tens of years), which is fairly short compared with the radioactive decay period needed to allow the fission products to be considered as medium-activity waste (several centuries).

We shall indicate below what methods are envisaged for the future for treating and even using these fission products.

In the field of medium-activity waste, generally in small volumes (0.5 to 25 c/m^3), and low-activity waste, of which the volume is very considerable (4 to 500 mc/m^3), treatment processes are numerous but the general method is always the same. It consists basically of collecting the radioactive elements in one phase, the volume of which must be much less than that of the initial solution, and then of separating this phase and storing it. The other inactive phases are discharged.

That process is chosen which leads to the best "decontamination" for the effluent in question. It is often even made to undergo several of these treatments in succession.

We may quote : entrainment of certain elements in precipitates - evaporation - ion exchange - entrainment by steam - combustion - absorption - desorption.

2° - Traitement des déchets liquides

Le traitement des déchets de très forte activité (plusieurs milliers de curies par litre), ou produits de fission, consiste jusqu'à présent en une concentration (souvent avec récupération de l'acide nitrique) suivie d'un stockage dans des réservoirs enterrés soit en acier inoxydable (stockage acide), soit en acier ordinaire (stockage alcalin).

En réalité ce stockage ne peut être que provisoire étant donné la durée de vie prévisible des réservoirs (quelques dizaines d'années) assez courte par rapport à la durée de décroissance radioactive nécessaire pour pouvoir considérer les produits de fission comme des déchets d'activité moyenne (quelques siècles).

Nous indiquerons plus loin quelles méthodes sont envisagées dans l'avenir pour traiter et même utiliser ces produits de fission.

Dans le domaine des déchets de moyenne activité, généralement de volumes réduits ($0,5$ à 25 Ci/m^3), et ceux de faible activité, dont le volume est très important (4 à 500 mCi/m^3), les procédés de traitement sont nombreux, mais la méthode générale est toujours la même. Elle consiste en principe à rassembler les éléments radioactifs dans une phase dont le volume doit être bien inférieur à celui de la solution initiale, puis à séparer cette phase et à la stocker. Les autres phases inactives sont rejetées.

On adopte le procédé qui conduit à la meilleure "décontamination" pour l'effluent envisagé. Souvent même on lui fait subir successivement plusieurs de ces traitements.

Citons : entraînement de certains éléments dans des précipités - évaporation - échange d'ions - entraînement par la vapeur - combustion - absorption - désorption.

Separation of the phases is achieved by settling, filtering or evaporation.

When the effluents contain a large proportion of short-lived isotopes, it is sufficient to store them until their activity has decreased sufficiently for it to be possible to discharge them or make them undergo a simple treatment.

As for the low-activity or suspect effluents, these are generally filtered, diluted and discharged into the external medium.

3° - Treatment of solid waste

The problem is again to reduce the volume of this waste to the greatest extent. As this waste has a more or less high activity, the various processing operations are carried out with numerous precautions to avoid any direct contact and the dispersal of dust.

Some waste is in the form of sludge. It is then incorporated in cement or bitumen, after having lost some of its water. It can then be stored in a strictly solid state, practically non-leachable, and in manageable volumes.

Other solid waste, fairly small in quantity, has a high activity requiring shielding. It is placed in containers or put in specially designed pits, sometimes after dismantling to reduce its volume. After a certain storage time, when the activity has decreased sufficiently, it can be taken out and treated like the less active waste.

Other solid waste, of low radioactivity, is either burned or compacted, or simply decontaminated and cut up. After having been thus reduced in volume, it is fixed in cement and stored.

La séparation des phases s'effectue par décantation, filtration ou évaporation.

Lorsque les effluents contiennent une grande proportion d'isotopes à vie courte, il suffit de les stocker jusqu'à ce que leur activité ait suffisamment diminué pour qu'il soit possible de les rejeter ou de leur faire subir un traitement simple.

Quant aux effluents de faible activité ou suspects, ils sont en général filtrés puis dilués et rejetés dans le milieu extérieur.

3° - Traitement des déchets solides

Le problème est également de réduire au maximum le volume de ces déchets. Ceux-ci ayant une activité plus ou moins importante, les diverses opérations de traitement sont faites avec de nombreuses précautions pour éviter tout contact direct et la dispersion des poussières.

Certains déchets se présentent sous forme de boues. Ils sont alors incorporés à du ciment ou bien à du bitume après avoir perdu une partie de leur eau. Ils peuvent ainsi être stockés à l'état strictement solide et pratiquement inlixivable sous des volumes manipulables.

D'autres déchets solides, en quantité assez faible, ont une activité importante qui exige une protection. Ils sont mis dans des containers ou bien placés dans des fosses spécialement conçues, quelquefois après un démontage pour les réduire de volume. Après un certain temps de stockage, l'activité ayant suffisamment diminué, ils peuvent être repris et traités comme les déchets moins actifs.

Les autres déchets solides, peu radioactifs, sont soit incinérés, soit compactés, soit simplement décontaminés et découpés. Après avoir été ainsi réduits en volume, ils sont immobilisés dans du ciment et stockés.

4° - Economic effect of the treatment of waste on the cost of nuclear electricity

The treatment of radioactive waste, the main technical aspects of which have just been indicated, represents an economic burden in the generation of electric power from nuclear reactors. Its effect on the kWh cost is, however, slight, as we shall show by considering the particular case of the graphite-gas-natural uranium system. The following table gives, for each stage in the fuel cycle, an order of magnitude for the cost of treatment of the corresponding waste relative to the kWh produced by the fuel.

in centimes/kWh

	Graphite-gas-natural U system	
	Without reprocessing of irradiated fuel	With reprocessing of irradiated fuel
Mining - Concentration of ores	0.005	0.005
Refining and chemical conversion of U	< 0.005	< 0.005
Isotopic separation of uranium	-	-
Fuel fabrication	< 0.005	< 0.005
Operation of reactor	0.015	0.015
Storage of irradiated fuel	0.03	-
Estimate of total cost of treatment	< 0.060	< 0.030
Treatment of irradiated fuel		
Liquid waste { fission products		0.035
{ effluents		0.043
Solid waste		0.020
Gaseous waste		0.003
Estimate of cost of treatment of waste from irradiated fuel processing	-	0.101

4° - Incidence économique du traitement des déchets sur le coût de l'électricité nucléaire

Le traitement des déchets radioactifs, dont nous venons d'indiquer les aspects techniques essentiels, représente une charge économique dans la production d'énergie électrique à partir des réacteurs nucléaires. Mais son incidence sur le coût du kWh est faible, ce que nous allons montrer en considérant le cas particulier de la filière graphite-gaz-uranium naturel. Le tableau suivant indique, pour chaque étape du cycle du combustible, un ordre de grandeur du coût du traitement des déchets correspondants ramené au kWh produit par le combustible.

en centimes/kWh

	Filière graphite-gaz-U naturel	
	Sans retraitement des combustibles irradiés	Avec retraitement des combustibles irradiés
Extraction - Concentration des minerais	0,005	0,005
Raffinage et conversions chimiques de l'U	< 0,005	< 0,005
Séparation isotopique de l'uranium	-	-
Fabrication des combustibles	< 0,005	< 0,005
Exploitation du réacteur	0,015	0,015
Stockage des combustibles irradiés	0,03	-
Estimation du coût total de traitement	< 0,060	< 0,030
Traitement des combustibles irradiés		
Déchets liquides { Produits de fission		0,035
{ Effluents		0,043
Déchets solides		0,020
Déchets gazeux		0,003
Estimation du coût de traitement des déchets provenant du traitement des combustibles irradiés	-	0,101

Reprocessing of natural uranium is linked with recovery of plutonium, and if the latter is designed to supply future breeder reactors using this fissile material, the cost must be attributed to the latter⁽¹⁾. We have nevertheless mentioned it, since, on the one hand, it is interesting to know the economic effect of the waste and, on the other, it is possible to link it with the kWh cost, since this fuel has produced power. However, if we wish to remain strictly within the one system, we must consider the irradiated fuel as waste and introduce the cost of its storage. The latter could be estimated as a first approximation at 0.03 centimes/kWh, a value based on a forecast study, since there is no storage of this type in existence in France.

It can therefore be said in this case that the treatment of waste amounts to about 0.06 centimes in the kWh cost, i.e. about 1.5 % of the total kWh cost.

The waste produced by the processing of irradiated fuel involves an expenditure of 0.10 centimes/kWh approximately ; the additional expenditure is only 0.07 centimes/kWh since there is no storage of the irradiated fuel.

Allowing for processing of the irradiated fuel, the cost of the waste would come out at about 0.13 centimes/kWh, i.e. about 3 % of the total kWh cost.

As regards other reactor systems, the waste is obviously different and the treatment may be different also, but the proportion of the kWh cost which can be attributed to it will still be of the same order of magnitude (see Appendix I). For example, in reactor systems using enriched uranium, greater precautions are needed for the waste during fabrication of the fuel, processing of irradiated fuel is essential and isotopic separation is involved. However, consumption of uranium is less, which must reduce the expenditure due to waste.

It therefore seems, since the kWh costs envisaged in the various reactor systems are of the same order of magnitude, that the cost of waste treatment is 1.5 to 3 % of the kWh cost, depending on whether the irradiated fuel is reprocessed or not.

(1) However, it is not yet possible to show the detailed costs of treatment of waste from these breeder reactors.

Le retraitement de l'uranium naturel est lié à la récupération du plutonium et si celui-ci est destiné à alimenter de futurs réacteurs surrégénérateurs utilisant cette matière fissile, le coût doit en être imputé à ces derniers⁽¹⁾. Nous l'avons néanmoins mentionné car, d'une part il est intéressant de connaître l'incidence économique des déchets et, d'autre part, il est possible de le rattacher au coût du kWh, étant donné que ce combustible a produit de l'énergie. Cependant, si nous voulons rester dans le cadre strict de la filière, nous devons considérer le combustible irradié comme un déchet et faire intervenir le coût de son stockage. Celui-ci pourrait être évalué en première approximation à 0,03 centimes/kWh, valeur basée sur une étude prévisionnelle, car aucun stockage de ce genre n'existe en France.

On peut donc dire dans ce cas, que le traitement des déchets intervient dans le coût du kWh pour 0,06 centimes environ, soit de l'ordre de 1,5 % du coût global du kWh.

Les déchets produits par le traitement des combustibles irradiés entraînent une dépense de 0,10 centimes/kWh environ ; la dépense supplémentaire n'est que de 0,07 centimes/kWh puisqu'il n'y a pas de stockage des combustibles irradiés.

Si l'on tenait compte du traitement des combustibles irradiés, le coût des déchets ressortirait à 0,13 centimes environ par kWh, soit de l'ordre de 3 % du coût global du kWh.

En ce qui concerne les autres filières, les déchets sont évidemment différents et leur traitement peut l'être également, mais la proportion du coût du kWh qui leur est imputable restera du même ordre de grandeur (voir annexe I). Par exemple, dans les filières où l'on utilise l'uranium enrichi, des précautions plus importantes sont nécessaires pour les rejets au cours de la fabrication du combustible, le traitement des combustibles irradiés est obligatoire et la séparation isotopique intervient. Mais la consommation d'uranium est moindre, ce qui doit diminuer les dépenses dues aux déchets.

Il semble donc bien, les coûts de kWh prévus dans les diverses filières étant du même ordre de grandeur, que le coût du traitement des déchets soit de 1,5 à 3 % du coût du kWh, selon que l'on traite ou non le combustible irradié.

(1) Toutefois, il n'est pas encore possible de faire apparaître les coûts détaillés de traitement des déchets de ces réacteurs surrégénérateurs.

III - TECHNICAL AND ECONOMIC PROSPECTS FOR THE TREATMENT AND USE OF RADIOACTIVE WASTE

What are the technical and economic prospects for the treatment and use of radioactive waste ?

It appears that two kinds of waste can be distinguished, according to the type of development foreseeable for the processes.

- the cost of processing should be reduced for all waste (with the exception of fission products) in the future through improvement of existing processes and increases in the size of the plants, as a result of the size of the nuclear power programmes envisaged.
- the cost of processing fission products should benefit by the same reductions, but other processes might appear : vitrification and extraction of certain radioelements.

We shall deal with these in succession.

1° - Reduction in cost by improvement of processes and increases in the size of the plants

We shall discuss here only the French programme based on the graphite-gas-natural uranium system.

The "Commission Consultative pour la Production d'Electricité d'Origine Nucléaire" (Consultative Commission for the Generation of Electricity of Nuclear Origin) has drawn up, at the Government's request, a "Report on the Development Prospects of Nuclear Power Stations in France". It is possible to deduce from this the possible nuclear power production up to 1980.

	1965	1970	1975	1980
Total number of nuclear tWh per year	1	10	25	100

III - PERSPECTIVES TECHNIQUES ET ECONOMIQUES DU TRAITEMENT ET DE L'UTILISATION DES DECHETS RADIOACTIFS

Quelles sont les perspectives techniques et économiques du traitement et de l'utilisation des déchets radioactifs ?

Il semble que l'on puisse distinguer deux sortes de déchets selon le type d'évolution prévisible des procédés.

- le coût de traitement de tous les déchets (à l'exception des produits de fission) devrait être réduit dans l'avenir par amélioration des procédés existants et accroissement de la taille des installations, grâce à l'importance des programmes d'énergie nucléaire envisagés.
- le coût de traitement des produits de fission devrait bénéficier des mêmes réductions mais d'autres procédés pourraient apparaître : vitrification et extraction de certains radio-éléments.

Nous évoquerons successivement l'une et l'autre.

1° - Réduction de coût par amélioration des procédés et accroissement de la taille des installations

Nous n'aborderons ici que le programme français basé sur la filière graphite-gaz-uranium naturel.

La "Commission Consultative pour la Production d'Electricité d'Origine Nucléaire" a établi, à la demande du Gouvernement, un "Rapport sur les Perspectives de Développement des Centrales Nucléaires en France". Il est possible d'en déduire les productions possibles d'énergie nucléaire jusqu'en 1980.

	1965	1970	1975	1980
Nombre total de tWh nucléaire par an	1	10	25	100

The theoretical kWh costs - capital amortisation over 20 years - interest rate 7 % - vary as follows :

Vth Plan (1965-70)	VI th Plan (1970-75)	VIIth Plan (1975-80)	VIIIth Plan (1980-85)
3.73	3.10	2.66	2.32

From the technological point of view, the processing of waste no longer poses any major problems, and the various processes will be simply improved, without any change in techniques, to obtain greater efficiency and enable increasing quantities of radioactive materials to be treated.

The percentage of the kWh cost due to waste is likely to remain substantially the same during the coming years. The reduction in cost due to improvements in processes and increases in the size of plants could, indeed, be of the same order as that in the kWh cost.

We have deduced from these forecasts (consumption of nuclear power and kWh cost) the likely expenditure involved in the treatment of waste produced :

Unit	1965	1970	1975	1980
A cent./kWh	0.060	0.050	0.040	0.037
B F/year	600,000	5,000,000	10,000,000	37,000,000
C Cent./kWh	0.101	0.085	0.070	0.062
D F/year	1,010,000	8,500,000	17,500,000	62,000,000
E cent./kWh	0.035	0.029	0.025	0.022
F F/year	350,000	2,900,000	6,250,000	2,200,000

Les coûts théoriques du kWh - amortissement 20 ans - taux d'intérêt 7 % évoluant comme suit :

Ve Plan (1965-70)	VIe Plan (1970-75)	VIIe Plan (1975-80)	VIIIe Plan (1980-85)
3,73	3,10	2,66	2,32

Du point de vue technologique, le traitement des déchets ne pose plus de problèmes majeurs, et les divers procédés seront simplement améliorés, sans mutation de techniques, pour obtenir un meilleur rendement et permettre de traiter des quantités de plus en plus grandes de matières radioactives.

On peut estimer que le pourcentage du coût du kWh dû aux déchets restera sensiblement le même au cours des années à venir. La réduction de coût due à l'amélioration des procédés et à l'accroissement de taille des installations pourrait être en effet du même ordre que celle du coût du kWh.

Nous avons déduit de ces prévisions (consommation d'énergie nucléaire et coût du kWh) celles des dépenses entraînées par le traitement des déchets produits :

Unité	1965	1970	1975	1980
A cent/kWh	0,060	0,050	0,040	0,037
B F/an	600 000	5 000 000	10 000 000	37 000 000
C cent/kWh	0,101	0,085	0,070	0,062
D F/an	1 010 000	8 500 000	17 500 000	62 000 000
E cent/kWh	0,035	0,029	0,025	0,022
F F/an	350 000	2 900 000	6 250 000	2 200 000

- A : Specific cost of treatment of waste from normal fuel cycle
- B : Total annual cost of treatment of waste from normal fuel cycle
- C : Specific cost of treatment of waste from the processing of irradiated fuel
- D : Total annual cost of treatment of waste from the processing of irradiated fuel
- E : Specific cost of treatment of fission products
- F : Total cost of treatment of fission products

For the costs C, D, E, F, we assumed that all the fuel having produced power is processed.

It should be emphasised that the values quoted in this table are simply intended to show the order of magnitude of the expenditure involved by radioactive waste in the field of power generation, and are only projections of present experience.

It is seen that, in spite of its insignificant effect on the total kWh cost, waste treatment could, however, represent a large expense, increasing with the development of the programmes.

- A : Coût spécifique du traitement des déchets du cycle de combustible normal
- B : Coût total annuel du traitement des déchets du cycle de combustible normal
- C : Coût spécifique du traitement des déchets issus du traitement des combustibles irradiés
- D : Coût total annuel du traitement des déchets issus du traitement des combustibles irradiés
- E : Coût spécifique du traitement des produits de fission
- F : Coût global du traitement des produits de fission

Pour les coûts C, D, E, et F, nous avons supposé que le combustible ayant produit de l'énergie est traité dans sa totalité.

Il faut souligner que les valeurs citées dans ce tableau, ont simplement pour but de montrer l'ordre de grandeur des dépenses entraînées par les déchets radioactifs dans le domaine de la production d'énergie, et ne sont que des projections de l'expérience actuelle.

On voit que, malgré sa faible incidence sur le coût global du kWh, le traitement des déchets pourra toutefois représenter une dépense importante, croissante avec le développement des programmes.

2° - Use and exploitation of certain waste

a) Treatment of very highly active waste (fission products)

It is obvious that the storage in liquid form of considerable quantities of very radioactive products for hundreds of years is dangerous. It has therefore been attempted to transform these liquids into solids with a very low leaching rate, which would make it possible to keep them confined with more certainty in their storage enclosure in the event of an earthquake, flood, etc....

The solid form is obtained by calcination, by transformation into a ceramic or by vitrification. The latter technique, which is now under development in the United States, Great Britain, the U.S.S.R., and also in France at the pilot stage, seems to offer the greatest safety. Its cost, according to our estimations, with reasonable hypotheses for the life of the equipment, is likely to be 20 to 30 % higher than that of storage in a liquid medium.

An alternative version of these processes may bring about a reduction in expense. It is known that the half-lives of fission products are less than about 2 years, except those of ^{137}Cs and ^{90}Sr which are much higher, of the order of 30 years. It follows that after a storage period of about ten years the activity of the fission product solutions is due almost solely to caesium and strontium. It is therefore possible, after temporary storage, to separate these two elements and treat the remainder with medium-active effluent. The caesium and strontium can also be used as radioactive sources.

We shall now deal with the possibilities for using these radioelements.

2° - Utilisation et valorisation de certains déchets

a) Traitement des déchets de très forte activité (produits de fission)

Il est évident que le stockage sous forme liquide de quantités considérables de produits très radioactifs pendant des centaines d'années est dangereux. On a donc cherché à transformer ces liquides en solides ayant un taux de lixiviation très faible, ce qui permettrait de les maintenir avec plus de certitude confinés dans leur enceinte de stockage en cas d'incident (séisme, inondation, etc...).

La forme solide est obtenue par calcination, par transformation en produit céramique ou par vitrification. Cette dernière technique, en cours de mise au point aux Etats-Unis, en Grande-Bretagne, en URSS et aussi en France au stade pilote, semble offrir le plus de sécurité. Son coût, d'après nos estimations, avec des hypothèses raisonnables de durée de vie des équipements, devrait être de 20 à 30 % supérieur à celui des stockages en milieu liquide.

Une variante de ces procédés peut amener une réduction des dépenses. On sait en effet que les périodes des produits de fission sont inférieures à 2 ans environ, sauf celles du ^{137}Cs et du ^{90}Sr qui sont nettement plus élevées, de l'ordre de 30 ans. Il en résulte que après une durée de stockage d'une dizaine d'années environ, l'activité des solutions de produits de fission est due presque uniquement au Cesium et au Strontium. On peut donc, après un stockage provisoire, séparer ces deux éléments et traiter le restant avec les effluents de moyenne activité. Par ailleurs le Cesium et le Strontium peuvent être utilisés comme sources radioactives.

Nous allons évoquer maintenant les possibilités d'utilisation de ces radio-éléments.

b) Use of very highly active waste

Amongst the applications of nuclear techniques which are gradually spreading into industry, the use of radioelements is occupying an increasingly important place. It is therefore logical to think of extracting them in order to profit from them. The residue from this extraction, moreover, can be stored much less difficulty, as we have seen.

It should not be thought, however, that there would be then an appreciable reduction in the cost of nuclear power. Extraction of radioelements is an operation whose cost is of the same order of magnitude as that of vitrification and is therefore 20 to 30 % higher than that of storage in a liquid medium. The kWh cost will not be affected in practice, by a small increase involving the treatment of fission products, which itself is responsible for less than 1 % of this cost.

What are the main radioelements contained in this waste which could find industrial application ?

Amongst those which can be used as irradiation sources, the most useful are the following :

1°/ Certain fission products

- strontium 90 and caesium 137 for their long life (about 30 years)
- Cerium 144 for its high specific activity and its abundance
- Promethium 147 for its average life and low radiation energy
- Krypton 85 for its gaseous condition and its chemical inertia.

b) Utilisation des déchets de très forte activité

Parmi les applications des techniques nucléaires qui progressivement diffusent dans l'industrie, l'emploi des radio-éléments occupe une place de plus en plus importante. Aussi est-il naturel de songer à les extraire pour en tirer profit. En outre, les résidus de cette extraction peuvent être stockés avec beaucoup moins de difficultés comme nous venons de le voir.

Il ne faut cependant pas penser qu'il en résulterait une diminution appréciable du coût de l'énergie nucléaire. En effet l'extraction des radio-éléments est une opération dont le coût est du même ordre de grandeur que celui de la vitrification et donc plus élevé de 20 à 30 % que celui du stockage en milieu liquide. Le coût du kWh ne sera donc pratiquement pas influencé par un accroissement minime portant sur le traitement des produits de fission qui entre lui-même pour moins de 1 % dans ce coût.

Quels sont les principaux radio-éléments contenus dans les déchets et pouvant recevoir une application industrielle ?

Parmi ceux qui peuvent être utilisés comme sources d'irradiation, les plus intéressants sont les suivants :

1°/ Certains produits de fission :

- le strontium 90 et le césium 137 pour leur longue durée de vie (30 ans environ)
- le cerium 144 pour sa haute activité spécifique et son abondance
- le prométhium 147 pour sa durée de vie moyenne et sa faible énergie de rayonnement
- le krypton 85 pour son état gazeux, son inertie chimique.

The table below gives some characteristics of these radioelements and an indication of some possible industrial applications (some of which have already been developed) :

Half-life	Kr	Sr	Cs	Ce	Pm
	10.4 yrs.	28 yrs.	30 yrs.	285 days	2.65 yrs
Quantity in curies produced per year per 100 MW	-	400,000	400,000	600,000	750,000
Applications	self-luminous lamps	SNAP irradiation	Irradiation SNAP	SNAP	SNAP

2°/ Certain transuranium elements

- Neptunium 237 which produces plutonium 238 (alpha-source of half-life 86 years) by irradiation
- Americium, of which the isotopes 241 and 243 give rise to curium 242 and 244 respectively, which are alpha-sources which also have a relatively short half-life (163 days and 18 years).

Another possibility (more distant) exists for waste from the treatment of uranium ores : thorium 230 (or ionium) can produce uranium 232 by irradiation ; this is an alpha-source of short half-life (70 years) and, by virtue of its daughter products, has a high specific activity.

The irradiation sources have and will have an increasing number of industrial applications and amongst the most important we may quote :

Le tableau ci-après résume quelques caractéristiques de ces radio-éléments et l'indication de quelques applications industrielles envisageables (dont certaines ont déjà reçu des développements)

Période	Kr	Sr	Cs	Ce	Pm
	10,4 a	28 a	30 a	285 j	2,65 a
Quantité en curies produite par an pour 100 MW	-	400 000	400 000	600 000	750 000
Applications	Lampes auto-luminescentes	SNAP Irradiation	Irradiation SNAP	SNAP	SNAP

2°/ Certains éléments transuraniens

- le neptunium 237 qui engendre le plutonium 238 (émetteur α de période 86 ans) par irradiation.
- l'américium dont les isotopes 241 et 243 donnent respectivement naissance au curium 242 et 244, émetteurs α de période relativement courte également (163 jours et 18 ans).

Une autre possibilité (plus lointaine) existe à partir des déchets du traitement des minerais d'uranium : le thorium 230 (ou ionium) peut engendrer par irradiation l'uranium 232, émetteur α de courte période (70 ans) , et grâce à ses descendants, de haute activité spécifique.

Les sources d'irradiation ont et auront des applications industrielles de plus en plus nombreuses et l'on peut citer parmi les plus importantes :

- Irradiation in the chemical industry, particularly in the field of plastics, detergents, rubber, treatment of waste water, etc..
- Irradiation in the pharmaceutical industry - sterilisation
- Irradiation in the food industry (preservation, destruction of parasites, etc.)
- Fabrication of isotopic generators (SNAP) used as a source of power in space and regions of difficult access (buoys, etc..).
- Formation of self-luminous lamps.

c) Economic advantages of the treatment and use of fission products

The treatment of fission products by vitrification, or the extraction and use of certain radioelements, represents a technical change compared with the present method of storage in stainless steel tanks. To assess the economic value of these new processes, it is necessary to optimise each of the two techniques and compare the optima in a dynamic manner, i.e. taking into account the growth of the installed electric power programmes.

Studies have been carried out to assess the influence of the size of the installations on the costs of storage, vitrification or extraction of fission products. In regard to the capital costs, in particular, it was found that it was convenient to express the capital cost of the tanks as a function of their size by a law of the form :

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^K$$

- Irradiation dans l'industrie chimique notamment dans le domaine des plastiques, des détergents, du caoutchouc, du traitement des eaux vannes, etc...)
- Irradiation dans l'industrie pharmaceutique - stérilisation
- Irradiation dans l'industrie alimentaire (conservation, destruction des parasites, etc...)
- Fabrication des générateurs isotopiques (SNAP) utilisés comme source d'énergie dans l'espace et les régions d'accès difficile (balise, etc...)
- Constitution des lampes auto-luminescentes.

c) Avantages économiques de traitement et de l'utilisation des produits de fission

Le traitement des produits de fission par vitrification, ou l'extraction et l'utilisation de certains radio-éléments représente une mutation technique par rapport à la méthode actuelle de stockage dans des réservoirs en acier inoxydable. Pour évaluer l'intérêt économique de ces nouveaux procédés, il faut optimiser chacune des deux techniques, et comparer les optimums d'une manière dynamique, c'est-à-dire compte-tenu de la croissance des programmes d'énergie électrique installée.

Des études ont été effectuées pour évaluer l'influence de la taille des installations sur les coûts de stockage, de vitrification ou d'extraction des produits de fission. En ce qui concerne les coûts d'investissements notamment, il est apparu qu'il était commode d'exprimer le coût d'investissement des réservoirs en fonction de leur taille, par une loi de la forme :

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^K$$

I_1 and I_2 represent the capital costs for the sizes t_1 and t_2 , K is of the order of 0.5 for stainless steel storage tanks and (0.4 - 0.5) for the 2 other processes. It therefore appears that economic classification of the storage processes on the one hand and vitrification or separation on the other will not be altered over a very wide range of variation of possible sizes of plants.

In the matter of safety, vitrification is the process which is considered at present to be the safest ; on the other hand, it has the disadvantage of fixing in a practically non-recoverable form fission products which might be marketable.

It is possible to envisage a mixed system, consisting of recovering either Cs or Sr, or both these radioelements. The product which is the most likely to find outlets seems to be caesium which is also the most leachable fission product and is therefore the most useful for separation before vitrification.

Assuming that the fission products will be fixed in glass, for reasons of safety, recovery of this caesium before vitrification then acquires a marginal significance from the economic point of view. A preliminary study, for medium-sized processing plants (3 to 5 te/day), indicates that the possible marginal production of caesium 137 before vitrification would make it possible to obtain a curie of caesium 137 at \$ 0.20 - 0.25 per curie. The possible recovery of strontium 90 by ion exchange resins, using a process similar to that for extraction of the caesium 137, would probably put a curie of strontium 90 at a similar level (\$ 0.20 - 0.25).

In conclusion, there is a general tendency to consider liquid storage of fission products more and more as a medium-term waiting policy, permitting the development of techniques which can be envisaged in the long term ; these techniques involve a process of treatment and offer greater safety. Moreover, despite the present extreme fluidity of the fission product market, recovery of certain radioelements, in particular caesium 137, is likely in the relatively near future.

The direction of a choice between the management policies of vitrification, separation or a mixed system, can take shape when the first elements of the future fission product market start to appear.

I_1 et I_2 représentant les coûts d'investissements relatifs aux tailles t_1 et t_2 K est de l'ordre de 0,5 pour les réservoirs de stockage en acier inoxydable et de (0,4-0,5) pour les 2 autres procédés. Il semble donc que le classement économique relatif des procédés de stockage d'une part et de vitrification ou séparation d'autre part, ne sera pas modifié dans un très large domaine de variation des tailles possibles des réalisations.

Sur le plan de la sécurité, la vitrification est le procédé jugé actuellement le plus sûr ; il présente par contre l'inconvénient de fixer sous une forme pratiquement irrécupérable les produits de fission éventuellement commercialisables.

On peut dès lors envisager une solution mixte consistant à récupérer soit le Cs ou le Sr, soit ces deux radio-éléments. Le produit le plus susceptible de trouver des débouchés semble être le Césium qui, par ailleurs, est le produit de fission le plus léchable, et donc le plus utile à séparer avant la vitrification

Si l'on admet que les produits de fission seront fixés dans des verres, pour des raisons de sécurité, la récupération de ce Césium, avant vitrification acquiert alors un sens marginal du point de vue économique. Une première étude pour des usines de traitement de taille moyenne (3 à 5 t/j) indique que la production marginale éventuelle de Césium 137 avant vitrification permettrait d'obtenir le curie de Césium 137 à \$ 0,20-0,25 par curie. La récupération éventuelle du Strontium 90 par résines échangeuses d'ions, selon un procédé voisin de celui de l'extraction du Césium 137 mettrait probablement le curie de Strontium 90 à un niveau analogue (\$ 0,20 - 0,25).

En conclusion, il se dégage une tendance générale à considérer de plus en plus le stockage liquide des produits de fissions comme une politique d'attente à moyen terme, permettant de parfaire les techniques envisageables à long terme impliquant un procédé de traitement et présentant une plus grande sécurité. De plus, malgré l'extrême fluidité actuelle du marché des produits de fission, on peut prévoir dans un avenir relativement proche la récupération de certains radio-éléments, notamment du Césium 137.

L'orientation du choix entre les politiques de gestion, vitrification, séparation ou solution mixte, pourra se dessiner lorsque les premiers éléments du futur marché des produits de fission commenceront à apparaître.

CONCLUSION

We have examined the contribution of the processing and use of radioactive waste to the nuclear kWh cost.

After reviewing the origin and nature of the waste produced during the nuclear fuel cycle, we defined the current technical and economic aspect and showed that the treatment of waste represented only 1.5 to 3 % approximately of the kWh cost, depending on whether the irradiated fuel was reprocessed or not.

We then described the prospects for the development treatments : economic progress would be due essentially to improvements in techniques now being tested and to an increase in the size of installations. New techniques could arise in the treatment and use of fission products.

This analysis shows that :

- treatment and storage of waste are now at an advanced stage. Even safer processes are being developed.
- the cost of waste treatment should continue in the future to represent only 1.5 to 3 % of the kWh, and should therefore not prejudice the development of nuclear power.
- the turnover of the industry which will arise from development of these processes will reach a considerable and rapidly rising level, which will justify more and more extensive studies and research.
- some of the radioelements contained in the waste should provide an opportunity for large markets, linked with the creation of a number of new industries.

CONCLUSION

Nous nous sommes interrogés sur la participation au coût du kWh nucléaire, du traitement et de l'utilisation des déchets radioactifs.

Après avoir rappelé l'origine et la nature des déchets produits au cours du cycle de combustible nucléaire, nous en avons situé l'aspect technique et économique actuel et avons montré que le traitement des déchets ne représentait que 1,5 à 3 % environ du coût du kWh, selon que l'on traite ou non le combustible irradié.

Nous avons ensuite évoqué les perspectives de développement des procédés de traitement : le progrès économique devrait être dû essentiellement à l'amélioration de techniques actuellement expérimentées et à l'accroissement de la taille des installations. De nouvelles techniques pourraient apparaître dans le traitement et l'utilisation des produits de fission.

De cette analyse, il résulte que :

- le traitement et le stockage des déchets sont actuellement au point. Des procédés encore plus sûrs sont en cours d'élaboration.
- le coût du traitement des déchets devrait continuer à ne représenter dans l'avenir que 1,5 à 3 % du kWh, et ne pas entraver par conséquent le développement de l'énergie nucléaire
- le chiffre d'affaires de l'industrie qui naîtra du développement de ces procédés atteindra un niveau important et croissant rapidement, qui justifiera des études et recherches de plus en plus approfondies.
- certains des radio-éléments contenus dans les déchets devraient être l'occasion de marchés importants, liés à la création d'un certain nombre d'activités industrielles nouvelles.

It can also be emphasised that the future accumulation of radioactive waste resulting from the production of nuclear power will occur in concentrated forms, for which the storage sites can be selected and easily supervised.

Nuclear power will thus contribute towards reducing atmospheric pollution due to the increasing use of fossil fuels in thermal power stations, since it is not possible at the moment to achieve total and economic retention of the considerable quantities of noxious gases coming from them.

Manuscrit reçu le 8 janvier 1968

Elle permet de souligner aussi que l'accumulation future des déchets radioactifs provenant de la production d'électricité nucléaire s'effectuera sous des formes concentrées, dont les emplacements de stockages pourront être sélectionnés et surveillés aisément.

L'énergie nucléaire contribuera ainsi à réduire la pollution atmosphérique due à l'utilisation croissante de combustibles fossiles dans les centrales thermiques, puisqu'il n'est pas possible actuellement de retenir totalement et d'une manière économique les quantités considérables de gaz nocifs qui en sont issus.

Manuscrit reçu le 8 janvier 1968

APPENDIX : COSTS OF WASTE TREATMENT PER kWh RELATIVE TO PROVEN REACTOR SYSTEMS

Hypotheses in regard to the burn-up (MWd/te)	Heavy water Natural U system	Gas-Graphite Natural U system	Light water - enriched U System
	9,000	3,500	25,000
Mining - concentration of ores	Inversely proportional to the burn-up 0.002	Inversely proportional to the burn-up 0.005	Inversely proportional to the burn-up 0.0007
Refining and chemical conversion of U	Ditto < 0.002	Ditto < 0.005	Ditto < 0.007
Isotopic separation of U	-	-	negligible
Fuel fabrication	Inversely proportional to the burn-up < 0.002	Inversely proportional to the burn-up < 0.005	Inversely proportional to the burn-up < 0.0007
Operation of the reactor	Slight increase to allow for residue from treatment of heavy water 0.020	0.015	Slight increase to allow for residue from treatment of primary circuit water 0.020
Storage of irradiated fuel	Inversely proportional to the burn-up 0.010	Inversely proportional to the burn-up 0.030	-
Estimated total cost of waste (except reprocessing)	< 0.036	< 0.060	-
Liquid waste	Fission products Constant 0.035	0.035	Constant (considerable increase to if certain alloys are involved) 0.035 to 0.050
	Effluents Inversely proportional to the burn-up 0.014	Inversely proportional to the burn-up 0.043	Inversely proportional to the burn-up 0.005
Solid waste	0.006	0.020	0.002
Gaseous waste	Constant 0.003	0.003	Constant 0.003
Estimated cost of treating waste resulting from the processing of irradiated fuel	0.058	0.101	0.045 to 0.060
Estimated total cost of waste treatment	< 0.084	< 0.131	0.067 to 0.072

ANNEXE : COUTS RAMENES AU kWh DE TRAITEMENT DES DECHETS RELATIFS AUX FILIERES EPROUVEES

Hypothèses sur les taux d'irradiation (MWj/t)	Filière eau lourde-U naturel	Graphite-gaz U naturel	Filière eau légère - U enrichi
	9 000	3 500	25 000
Extraction-concentration des minerais	Inversement proportionnel au taux d'irradiation 0,002	Inversement proportionnel au taux d'irradiation 0,005	Inversement proportionnel au taux d'irradiation 0,0007
Raffinage et conversions chimiques de l'U	Idem < 0,002	Idem < 0,005	Idem < 0,0007
Séparation isotopique de l'U	-	-	négligeable
Fabrication des combustibles	Inversement proportionnel au taux d'irradiation < 0,002	Inversement proportionnel au taux d'irradiation < 0,005	Inversement proportionnel au taux d'irradiation < 0,0007
Exploitation du réacteur	En légère augmentation pour tenir compte des résidus de traitement de l'eau lourde 0,020	0,015	En légère augmentation pour tenir compte des résidus de traitement de l'eau du circuit primaire 0,020
Stockage des combustibles irradiés	Inversement proportionnel au taux d'irradiation 0,010	Inversement proportionnel au taux d'irradiation 0,030	-
Estimation du coût total des déchets (hors retraitement)	< 0,036	< 0,060	-
Traitement des combustibles irradiés			
Déchets liquides	Produits de fission Invariant 0,035	0,035	Invariant (en nette augmentation s'il s'agit de certains alliages) 0,035 à 0,050
	Effluents Inversement proportionnel au taux d'irradiation 0,014	Inversement proportionnel au taux d'irradiation 0,043	Inversement proportionnel au taux d'irradiation 0,005
Déchets solides	0,006	0,020	0,002
Déchets gazeux	Invariant 0,003	0,003	Invariant 0,003
Estimation du coût de traitement des déchets provenant du traitement des combustibles irradiés	0,058	0,101	0,045 à 0,060
Estimation du coût total de traitement des déchets	< 0,084	-	0,067 à 0,072

FIN