



centrales nucléaires et environnement

EDF

SOMMAIRE



L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE ET L'ÉLECTRICITÉ

Besoins et production

- La part de l'électricité
- Les moyens de production
- Pourquoi le nucléaire
- Le prix du kWh

Autres sources d'énergie

20 années de politiques nucléaires en France

Qu'est-ce que l'énergie nucléaire ?

- Les isotopes
- Matière et énergie
- La fission nucléaire
- Matières fissiles, matières fertiles
- La réaction en chaîne

Le fonctionnement d'une centrale nucléaire

- Son principe
- La production de vapeur à partir de l'énergie nucléaire
- Comparaison entre les différentes filières
- Les réacteurs « rapides »



LES RAYONNEMENTS LA RADIOACTIVITÉ

Généralités

- Les différents types de rayonnements
- Durée de vie des radioéléments
- Détection et mesure des rayonnements
- Unités en radioactivité

Les rayonnements nucléaires dans la nature et les rayonnements créés par l'homme

- La radioactivité naturelle
- La radioactivité artificielle
- La radioactivité des centrales
- Reconcentration dans la chaîne alimentaire
- Modalités d'atteinte de l'homme

Les rayonnements nucléaires et le corps humain

- Les effets biologiques
- Réactions de l'organisme

Protection contre les rayonnements nucléaires.

Les normes de radioprotection

- Sources de rayonnement dans une centrale nucléaire
- Protection contre les rayonnements nucléaires
- Les normes de radioprotection



LA SÛRETÉ DES RÉACTEURS

Radioprotection et sûreté

- Fonctionnement normal et radioprotection
- La prévention des accidents
- Un réacteur n'est pas une bombe
- Exemples de précautions
- Contrôle de sûreté et de radioprotection
- Surveillance de la radioactivité du milieu en cours d'exploitation

Sûreté des réacteurs nucléaires à la lumière de l'expérience

- Les rejets de radioactivité des centrales nucléaires en fonctionnement
- Les accidents survenus

Traitement et transport du combustible et des déchets

- Les effluents
- Les déchets
- Les combustibles irradiés
- Transport des déchets
- Démantèlement des centrales
- Cycles de combustible



LES EFFETS THERMIQUES

Les eaux de refroidissement des condenseurs

- Comment se pose le problème
- Ordre de grandeur des températures constatées
- Refroidissement en circuit ouvert
- Refroidissement en circuit fermé
- Incidence des réfrigérants atmosphériques sur le climat local
- Les études d'environnement entreprises

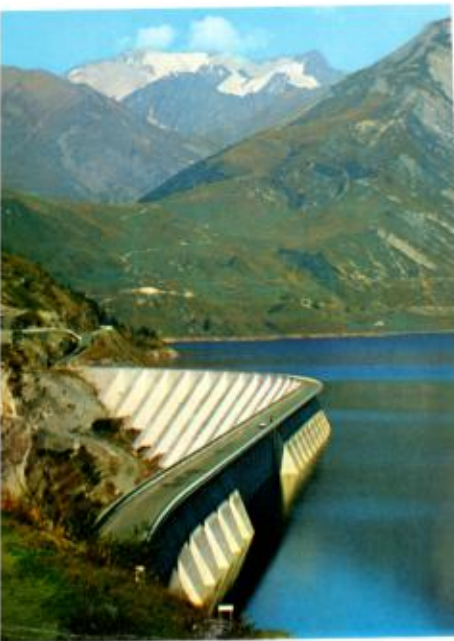
Récupération des calories



CONCLUSION



**l'énergie
nucléaire
et
l'électricité**



besoins et production

Dans les conditions actuelles, le développement économique de notre société suppose une utilisation accrue et mieux répartie de l'énergie. Même à croissance lente, même avec une stricte réduction des gaspillages, il est peu raisonnable de postuler une stagnation de notre consommation en énergie étant donné les transformations profondes et instantanées qu'une telle hypothèse impliquerait. Cela revient à dire qu'une réduction en quantité de nos besoins se répercuterait inévitablement, dans les conditions actuelles, sur la qualité des conditions de vie.

Depuis une quinzaine d'années, les consommations supplémentaires d'énergie dans le monde ont surtout été couvertes par le pétrole. Il en est résulté une situation dont l'instabilité a été mise brutalement en évidence aux yeux du public par les événements d'octobre 1973.

la part de l'électricité

Parce qu'elle est pratique et propre, l'électricité se substitue de plus en plus aux autres sources d'énergie. Ainsi chaque année, pour une croissance globale de la consommation d'énergie de 4 à 5 %, celle de l'électricité atteint 6 à 8 % dans les pays industrialisés, et beaucoup plus encore dans les pays en voie de développement.

La France ne fait pas exception à cette évolution.

La consommation française d'électricité qui était de 76 milliards de kilowatt-heures (kWh) en 1961 a atteint 180 milliards de kWh en 1974 et l'on peut estimer à 385 celle de 1985.

les moyens de production

Pour satisfaire cette consommation, E.D.F. peut installer des centrales hydrauliques, des centrales thermiques ou des centrales nucléaires, mais à l'heure actuelle il n'y a plus à vrai dire, beaucoup de possibilités de choix entre ces 3 solutions.

En effet, les principaux sites disponibles en France pour des centrales hydrauliques sont déjà équipés ou en voie de l'être ; pour les centrales thermiques, les disponibilités en charbon s'épuisent, et les difficultés passées et récentes concernant la fourniture de fuel-oil interdisent à E.D.F. de dépendre de ce seul combustible qui n'existe qu'en très faible quantité dans le sous-sol de la France et doit donc, comme le charbon, être importé en quasi totalité.

On verra plus loin que les « autres sources d'énergie » possible ne sont pas à l'échelle des besoins. C'est pourquoi la France comme

la plupart des grandes nations, s'est délibérément tournée vers l'énergie nucléaire.

pourquoi le nucléaire

■ Parce que des recherches poursuivies depuis 20 ans dans tous les grands pays industriels ont permis de mettre au point différentes filières de réacteurs. Actuellement, cent soixante-dix réacteurs fonctionnent dans le monde de façon sûre. Ils ont produit plus de 1 000 milliards de kWh et ceci sans un seul accident mortel.

■ Parce que l'indépendance énergétique du pays en sera améliorée. Beaucoup plus mal partagée que l'Allemagne, les Pays-Bas, la Grande-Bretagne et surtout les Etats-Unis, la France importe actuellement plus de 70 % de son énergie ; or elle dispose dans son sol de ressources importantes d'uranium. Par ailleurs l'uranium (et les autres minerais susceptibles de fournir de l'énergie nucléaire) sont largement répandus à travers le globe - contrairement au pétrole -, ce qui facilite les approvisionnement.

■ Parce que, à énergie égale, le minerai d'uranium est beaucoup moins coûteux et volumineux que le pétrole: Il permet de réaliser aisément des stocks très importants.

Une tonne de combustible nucléaire (uranium légèrement enrichi) correspond à 80 000 tonnes de charbon de bonne qualité.

■ Parce que la France grâce à l’usine d’enrichissement de Pierrelatte a acquis les techniques nécessaires pour construire (1) une usine d’enrichissement à l’échelle Européenne capable de concurrencer les tarifs actuels aux U.S.A. et en U.R.S.S.

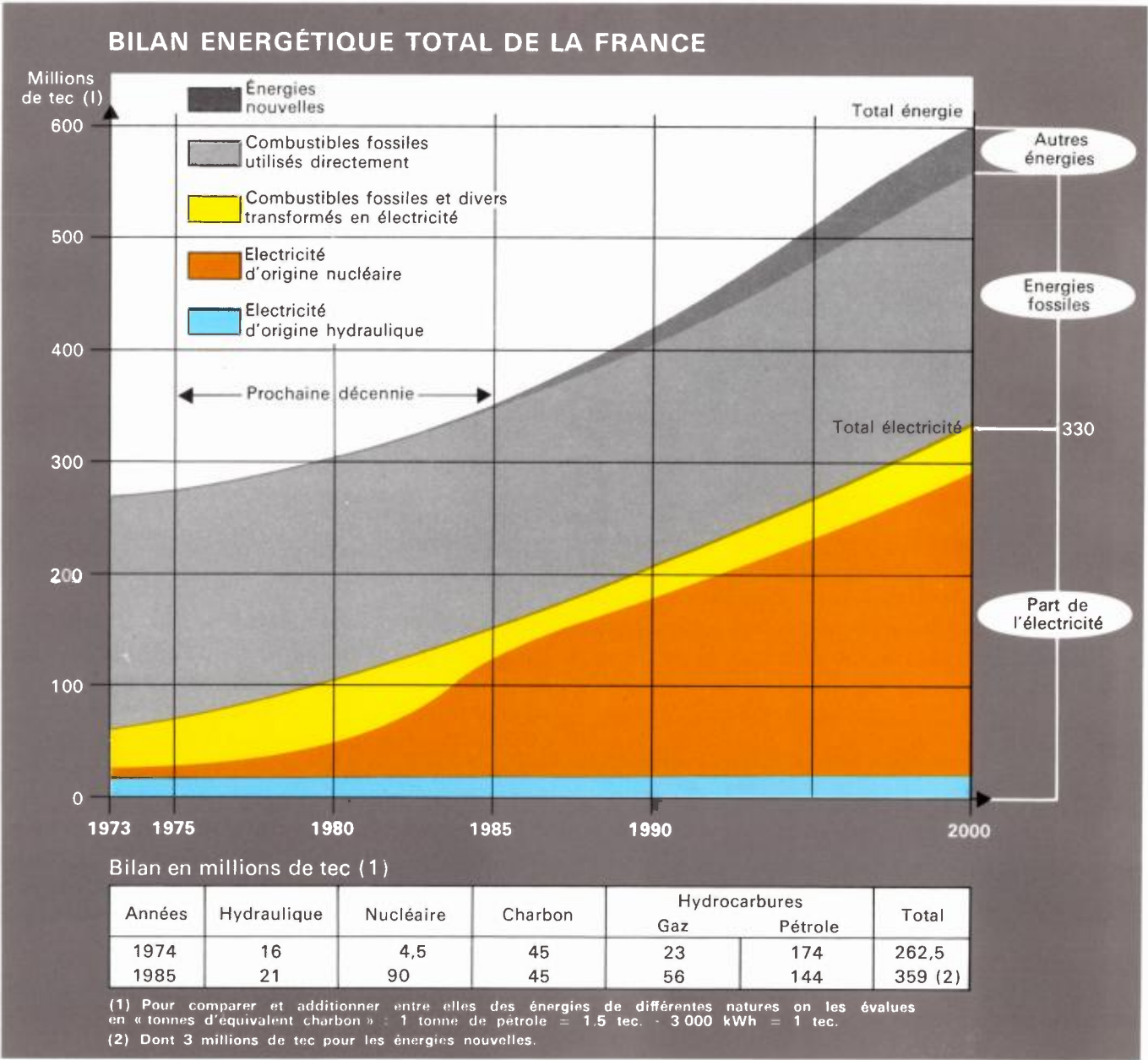
■ Parce que le prix de l’électricité d’origine nucléaire dépend peu du prix des matières importées ; la quasi-totalité du coût du kWh correspond à une activité industrielle réalisée pour l’essentiel en France et, accessoirement, dans les autres grands pays industriels avec lesquels elle coopère : un doublement du prix de l’uranium et du pétrole augmenterait le prix du kWh nucléaire de 10 % et celui du kWh classique de 80 %.

le prix du kWh

Coût moyen approximatif du kWh, valeur aux bornes de l’usine supposée produire toute l’année (conditions Janvier 1975)

	Fuel (centimes)	Nucléaire (centimes)
Investissements	1,8	3,1
Frais d’exploitation	1,1	1,2
Combustibles	7,9	1,7
Total	10,8	6,0

(1) (EURODIF).



autres sources d'énergie

L'énergie du vent est une de celles que l'homme utilise depuis le plus longtemps. De nos jours, les éoliennes de petite taille peuvent rendre des services, par exemple pour l'alimentation de maisons isolées.

Mais si l'on voulait atteindre une puissance de 1 million de kW (l'équivalent d'une tranche nucléaire de Bugey ou de Fessenheim), il faudrait construire 1 000 éoliennes ayant chacune une hélice de 30 m de diamètre, placée sur un pylône d'une quarantaine de mètres de hauteur, ce qui poserait des problèmes considérables d'exploitation, de bruit et d'atteinte au paysage.

L'énergie solaire, plus régulière que celle du vent, est à première vue très intéressante, notamment parce qu'elle est constamment renouvelée et qu'elle ne crée a priori aucune pollution.

Mais il paraît peu réaliste de recourir à cette forme d'énergie pour produire de l'électricité à grande échelle ; toujours pour atteindre l'équivalent en énergie d'une centrale de 1 million de kW, on estime qu'il faudrait couvrir de 3 000 à 6 000 hectares avec des cellules photoélectriques

Il s'ajouterait à ces problèmes propres à la centrale ceux de la chaîne de stockage permettant de réguler la distribution aléatoire d'une telle énergie.

Toutefois, le recours à l'énergie solaire pour assurer le chauffage de base des habitations ou des lieux de travail semble tout à fait envisageable. Des expériences ont déjà été réalisées à ce sujet, d'autres le seront prochainement.

En fonction des résultats, des programmes de réalisation importants pourraient être lancés s'il s'avérait que des économies substantielles de pétrole pourraient être obtenues par ce moyen.

L'énergie géothermique, est déjà exploitée de façon industrielle par des Etats comme l'Italie, l'Islande ou la Californie. Les gisements de vapeur à haute température permettent d'envisager la production d'électricité, mais il paraît malheureusement peu probable que la France en recèle de grandes quantités.

Par contre, les nappes souterraines d'eau chaude (entre 60 °C et 150 °C) peuvent être utilisées dans certaines régions dans d'excellentes conditions pour assurer le chauffage d'ensembles collectifs d'habitation. En raison des avantages de cette forme d'énergie, qui est relativement abondante et dont le prix de revient semble maintenant compétitif avec les formes classiques, le Gouvernement a récemment décidé le lancement d'un programme de recherche et de développement à son sujet. En cas de succès, l'exploitation à l'échelle

industrielle de l'énergie géothermique est possible, comme le démontre l'expérience française de Melun (2000 logements chauffés depuis 1970).

La fusion nucléaire enfin, peut donner lieu à beaucoup d'espoir.

Certaines des réactions de fusion existent en effet déjà au sein des étoiles où règnent des températures de plusieurs dizaines de millions de degrés. Mais il faut reconnaître que les difficultés considérables qu'il faut encore surmonter ne se posent pas en termes de moyens matériels mais en termes de découvertes de physique fondamentale. Et si l'on peut augurer que des progrès marquants seront enregistrés, à court ou moyen terme, dans le domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée deutérium-tritium, il faut estimer au minimum à plusieurs dizaines d'années la durée qui séparera les premières expériences réussies en laboratoire de la première centrale génératrice d'énergie, sans même parler de série industrielle.

En conclusion, l'énergie solaire et l'énergie géothermique présentent un intérêt suffisant pour justifier les programmes substantiels de recherches et développements engagés.

MAIS AUJOURD'HUI, L'EMPLOI DE L'ENERGIE NUCLEAIRE POUR LA PRODUCTION D'ELECTRICITE S'AVERE LA SEULE TECHNIQUE IMMEDIATEMENT UTILISABLE A L'ECHELLE INDUSTRIELLE.

**LOCALISATION
DES CENTRALES
NUCLÉAIRES E.D.F.**



CENTRALES NUCLEAIRES EN SERVICE	PUISSANCE	DATE DE MISE EN SERVICE
Marcoule (Gard)	80 000 kW	1959-1960
Chinon II et III (I.-et-L.)	680 000 kW	1965-1966
Chooz (Ardenne)	290 000 kW	1967
Brennilis (Finistère)	70 000 kW	1967
Saint-Laurent-des-Eaux I et II (L.-et-Ch.)	1 000 000 kW	1969-1971
Bugey I (Ain)	540 000 kW	1972
Marcoule (Gard)	233 000 kW (Phénix)	1973

CENTRALES NUCLEAIRES DEVANT ENTRER EN SERVICE ENTRE 1976 et 1980

Fessenheim I et II (Haut-Rhin)	1 800 000 kW
Bugey II, III, IV, V (Ain)	3 600 000 kW
St-Laurent-des-Eaux III et IV (L.-et-Ch.)	2 000 000 kW
Gravelines I, II, III, IV (Nord)	3 600 000 kW
Tricastin I, II, III, IV (Drôme)	3 600 000 kW
Dampierre-en-Burly I et II (Loiret)	1 800 000 kW
Creys-Malville (Isère)	1 200 000 kW
Le Blayais I (Gironde)	900 000 kW

CENTRALES NUCLEAIRES EN PROJET

Il est prévu une douzaine de centrales nouvelles qui devront entrer en service entre 1980 et 1988.

En l'an 2000 il est prévu environ 40 Centrales Nucléaire soit autant de sites qu'il en existe à l'heure actuelle pour les centrales classiques. Mais les puissances installées par site seront beaucoup plus importantes.

20 années de politique nucléaire en France

En 1955, la France a tout d'abord utilisé l'uranium naturel dont elle disposait et c'est ainsi qu'E.D.F. a construit dans la filière graphite-gaz les centrales de CHINON, SAINT-LAURENT-DES-EAUX et BUGEY, soit au total 2 300 mégawatts, qui sont toutes en fonctionnement.

Quand en 1965, la question s'est posée de poursuivre ou non ce programme, la Commission PEON (Production d'Electricité d'Origine Nucléaire) s'est trouvée placée devant les éléments de décision suivants :

- a) La France avait mis au point une technique d'enrichissement de l'uranium, elle pouvait bénéficier à l'étranger de plusieurs sources d'enrichissement.
- b) Déjà dans le monde se dessinait un fort courant en faveur des réacteurs utilisant l'uranium faiblement enrichi (U.S.A., U.R.S.S., Japon, R.F.A.).
- c) L'Angleterre qui avait suivi jusqu'à présent la même voie que la France abandonnait l'uranium naturel.
- d) Les constructeurs français ne voyaient pas la possibilité d'exporter la technique graphite-gaz malgré le niveau de fiabilité auquel les techniciens l'avaient porté.
- e) La puissance unitaire des réacteurs des centrales nucléaires françaises était de

500 MW. L'extension à 800 MW de la filière graphite-gaz, bien que réalisable, posait certains problèmes techniques et s'avérait non compétitive sur le plan des investissements avec les centrales de puissance similaires de la filière à eau.

Dans ces conditions, la Commission PEON, reprenant les arguments mis en avant par EDF et les constructeurs, proposa au Gouvernement qui l'accepta le 13 décembre 1969, d'engager la construction de centrales nucléaires de grande puissance dans la filière uranium enrichi - eau pressurisée.

Aussitôt furent décidées les 2 unités de 900 MW de FESSENHEIM, puis celles du BUGEY 2 et 3.

Mais déjà, le prix du fuel avait augmenté. La compétitivité du nucléaire qui se situait à cette époque autour de 0,8 c la thermie de fuel justifiait le démarrage d'un programme nucléaire de 5 000 MW au cours du VI^e plan, programme qui passa bien vite à 8 000, puis 13 000 MW.

C'est alors qu'éclata, à l'automne 1973, la nouvelle crise du Proche Orient qui conduisit à l'escalade des prix du fuel atteignant maintenant 3,2 c/thermie et à la révision du programme nucléaire.

La modification importante introduite par la

crise a été d'une part la substitution de centrales nucléaires aux dernières tranches classiques qu'il était envisagé d'engager au titre des années 1974 et 1975, d'autre part l'anticipation de quelques tranches nucléaires qui se substitueront partiellement aux unités classiques existantes afin de diminuer sensiblement la consommation de combustibles importés dès le début des années 1980.

Le Programme Nucléaire s'établit donc comme suit début 1975 :

Outre les tranches à graphite-gaz de la première génération et la centrale à eau légère de Chooz (Ardenne) qui seront sans doute déclassées ou sur le point de l'être à la fin du siècle, 20 tranches nucléaires dont une sur-régénératrice de 1 200 MW, pour une puissance totale de 18 500 MW sont en construction (ou envisagées pour un avenir proche) et doivent entrer en service entre 1975 et 1980 sur 8 sites (voir tableau ci-contre).

Chacune des 20 tranches fonctionnant en moyenne 6 600 heures par an produira environ 6 milliards de kWh et permettra d'éviter l'importation de 1,4 million de t. de pétrole.

Ensuite de nouvelles tranches d'une puissance totale d'environ 50 000 MW pourraient entrer en service entre 1980 et 1988, mais cela dépendra de l'évolution de la consommation d'électricité.

qu'est-ce que l'énergie nucléaire ?

C'est l'énergie contenue dans le noyau de l'atome.

L'atome est le constituant de base de tout corps simple, c'est-à-dire de tout corps (tel hydrogène, carbone, fer uranium, etc.) qui ne peut être isolé que par voie chimique.

L'atome est formé d'un noyau autour duquel gravitent des négatons (1). Ce noyau, composé de protons et de neutrons, contient pratiquement toute la masse de l'atome.

Les noyaux des atomes diffèrent entre eux par le nombre de protons et de neutrons qu'ils contiennent.

Le nombre des négatons — égal à celui des protons — détermine entre autres, les propriétés chimiques de l'atome.

Le nombre des neutrons joue un rôle essentiel dans les propriétés nucléaires de l'atome.

les isotopes

Les atomes d'un même corps simple n'ont habituellement pas tous la même masse ; ils ont le même nombre de négatons et de protons et, par conséquent, les mêmes propriétés chimiques, mais ils diffèrent entre eux par le nombre des neutrons : on les appelle des iso-

topes. Ces isotopes existent en proportion constante dans chaque corps simple naturel (2). Les isotopes d'un même corps simple ont en général des propriétés nucléaires différentes.

matière et énergie

Quelques physiciens du XIX^e et XX^e siècle, Gustave LEBON et surtout EINSTEIN, ont mis en évidence que « la matière » et « l'énergie » sont deux aspects d'une même entité.

La matière peut disparaître en se transformant en énergie, c'est ce qui se réalise très partiellement dans un réacteur nucléaire.

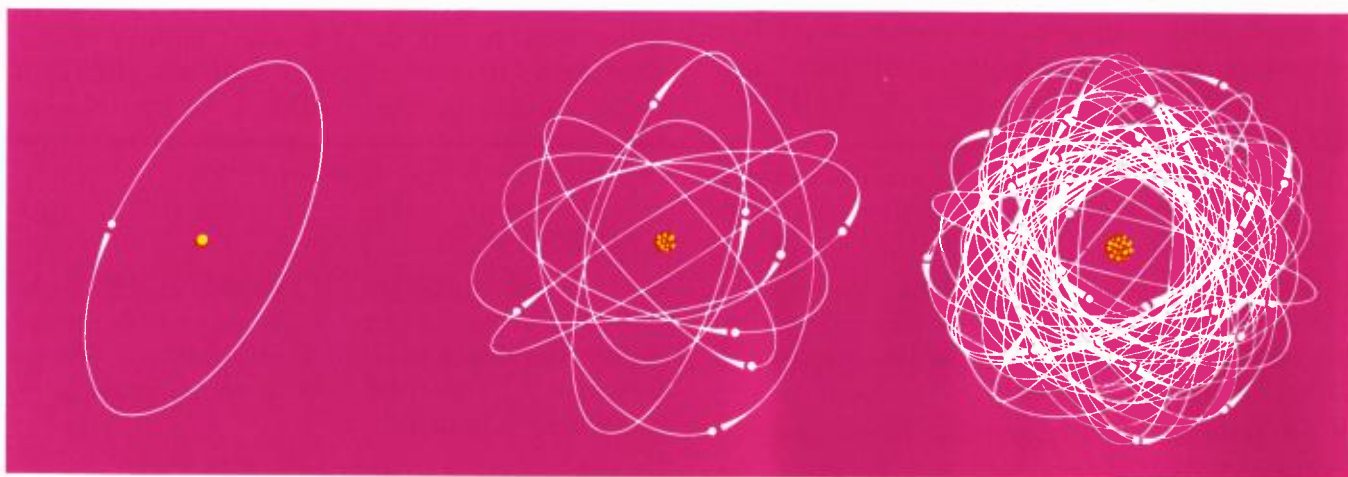
la fission nucléaire

L'utilisation, à l'échelle industrielle, de l'énergie nucléaire est basée sur la fission nucléaire. On appelle fission nucléaire la rupture d'un noyau lourd (3), provoqué dans certaines conditions par un neutron. Quand le noyau capture le neutron, il se trouve déséquilibré, il oscille et se sépare en deux : il y a rupture.

(1) Négaton ou électron négatif.

(2) Par exemple, dans l'uranium tel qu'on le trouve dans la nature il y a 0,7 % d'uranium 235 et 99,3 % d'uranium 238.

(3) C'est-à-dire comportant un grand nombre de protons et de neutrons, tel l'uranium 235.



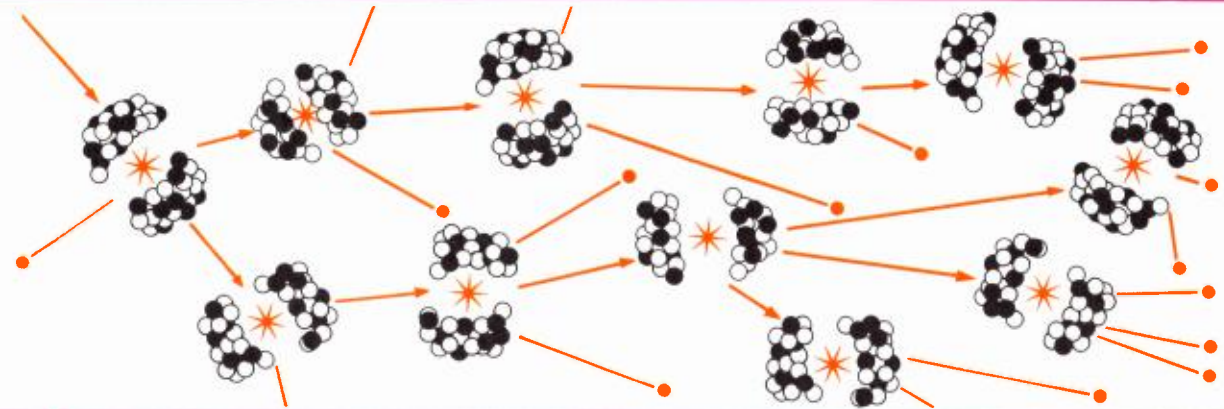
La rupture a trois effets principaux :

- Le noyau se sépare en plusieurs « morceaux » qui constituent les noyaux de nouveaux atomes que l'on appelle produits de fission ;
- En moyenne 2,5 neutrons, animés d'une vitesse de l'ordre de 20 000 km/s, s'échappent du noyau ;
- Une certaine quantité d'énergie est libérée et apparaît sous forme de chaleur.

matières fissiles, matières fertiles

Pour augmenter les chances de rencontre d'un neutron avec un noyau, on est souvent conduit à ralentir volontairement les neutrons. On dispose alors de neutrons plus lents (2 km/s au lieu de 20 000 km/s) ayant perdu une grande partie de leur énergie. Les noyaux réagissent en effet de façon différente à l'action des neutrons suivant que ceux-ci sont rapides ou lents.

Certains isotopes, tel l'uranium 235, ont des noyaux lourds, peu stables, qui subissent la fission sous l'action des neutrons lents : ils sont dits « fissiles ». D'autres isotopes plus stables, comme l'uranium 238, ne sont fissiles que sous l'action de neutrons « rapides », c'est-à-dire ayant une grande énergie. Toutefois, ils peuvent capturer des neutrons « lents » ; la capture dans ces conditions n'entraîne pas de rupture, mais peut, par une série de transformations, engendrer une nouvelle matière fissile. Ces isotopes sont dits « fertiles » parce que leur transformation crée de nouvelles matières fissiles.



la réaction en chaîne

Les neutrons expulsés du noyau brisé peuvent avoir plusieurs destinées :

- Certains d'entre eux frappent d'autres noyaux fissiles, les brisent, et, libérant d'autres neutrons, entretiennent ainsi une réaction en chaîne.
- D'autres peuvent être capturés par des noyaux d'atomes fertiles (comme l'uranium 238) et amorcer ainsi la formation de nouvelles matières fissiles (comme le plutonium 239).
- D'autres peuvent être capturés par les matériaux de structure du réacteur ou par les produits de fission.
- D'autres enfin peuvent s'échapper vers l'extérieur de la cuve, mais sont arrêtés par les murs de béton.

Une partie seulement des neutrons émis participe donc à la fission de nouveaux atomes. Si les conditions sont telles que le nombre de

fissions croisse très rapidement, la libération de l'énergie peut se faire de façon massive et instantanée : c'est ce qui se produit dans la bombe atomique.

Si, au contraire, cette partie est telle que le nombre de neutrons disponibles reste stable, la réaction en chaîne s'entretient et l'énergie est libérée progressivement ; c'est ce qui se passe dans un réacteur nucléaire.

LA DECOUVERTE ET LA DOMESTICATION DE L'ENERGIE NUCLEAIRE SONT L'ABOUTISSEMENT DES TRAVAUX D'UN GRAND NOMBRE DE SAVANTS DE TOUTES NATIONALITES. COMME BEAUCOUP D'AUTRES DECOUVERTES HUMAINES, BIEN QUE MISE AU POINT A DES FINS MILITAIRES, ELLE PEUT ETRE SANS DANGER UTILISEE A DES USAGES CIVILS.

le fonctionnement d'une centrale nucléaire

son principe

Dans une centrale nucléaire, comme dans une centrale thermique, on transforme l'énergie thermique libérée par un combustible en énergie mécanique, puis électrique. La chaleur produite vaporise de l'eau. La vapeur est ensuite détendue dans une turbine qui entraîne un alternateur produisant de l'énergie électrique.

Mais, dans une centrale thermique classique, la chaleur provient de la combustion dans la chaudière, avec l'oxygène de l'air, d'un combustible fossile (charbon, lignite, fuel-oil, gaz, etc.) alors que, dans une centrale nucléaire, la chaleur provient de la fission des noyaux d'uranium dans le « **réacteur nucléaire** ».

Cette chaleur produite dans le réacteur est prélevée par le passage, autour du combustible, d'un fluide appelé « fluide caloporteur ».

La vapeur qui alimente la turbine peut être produite soit directement dans le réacteur, soit par l'intermédiaire d'un **échangeur**.

Dans tous les cas cette vapeur, après détente dans la turbine, passe dans un condenseur où elle est refroidie au contact de tubes dans lesquels passe l'eau prélevée dans la rivière. Le circuit eau-vapeur est ainsi un circuit fermé complètement indépendant du circuit de la rivière.

la production de vapeur à partir de l'énergie nucléaire

La production de vapeur est assurée par un ensemble d'appareils que l'on appelle parfois la « chaudière nucléaire » et qui comporte :

- le cœur : composé essentiellement du combustible, du modérateur et du fluide caloporteur,
- le dispositif de réglage et de sécurité,
- une enveloppe étanche dans laquelle ce matériel est installé,
- un circuit de transmission de chaleur.

le cœur

Le cœur d'un réacteur est comparable au foyer d'une chaudière, c'est-à-dire qu'il assure la production de la chaleur.

Il est d'usage de définir les différents types de réacteurs par les trois principaux éléments qui caractérisent le cœur :

- le combustible,
- le modérateur,
- le fluide caloporteur.

le combustible

Le combustible le plus fréquemment utilisé dans les centrales nucléaires est l'**uranium**. Il peut être employé soit sous sa forme naturelle qui contient 0,7 % d'uranium 235 et 99,3 % d'uranium 238, soit sous une forme créée artificiellement : l'uranium enrichi, dans laquelle on a augmenté la proportion de l'isotope fissile (uranium 235) (1).

L'uranium naturel est utilisé le plus souvent sous forme de barreaux pleins ou creux (tubes) d'uranium métallique de quelques centimètres de diamètre et de quelques dizaines de centimètres de longueur.

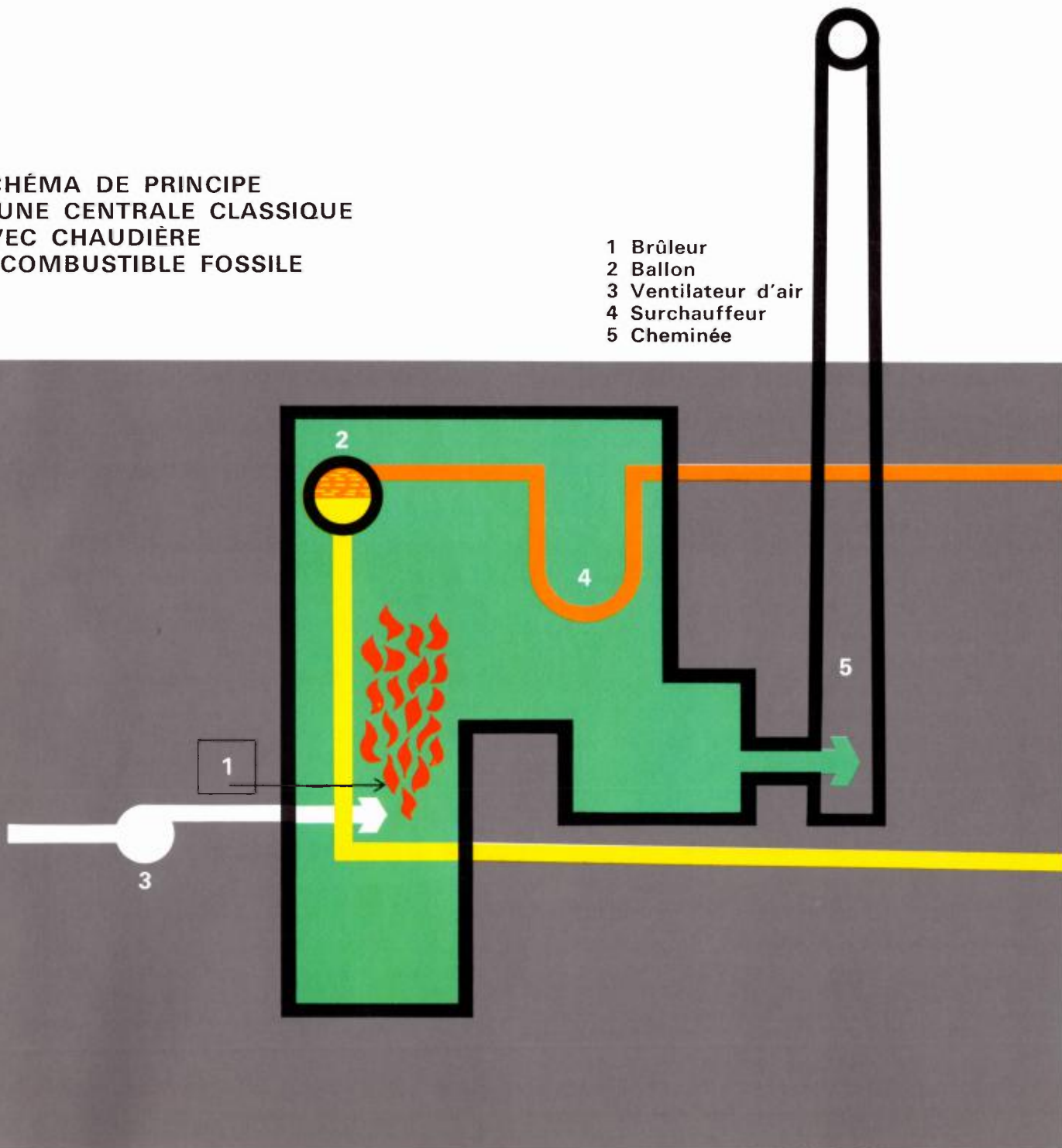
L'uranium enrichi est généralement utilisé à l'état d'oxyde d'uranium (UO_2) sous forme de petits cylindres de quelques millimètres de diamètre et d'une quinzaine de millimètres de longueur environ, empilés dans des tubes métalliques.

Pour retenir les produits de fission qui se forment dans le combustible, il est indispensable d'entourer celui-ci d'une **gaine** parfaitement étanche, qui le protège également de la corrosion et de l'érosion par le fluide calo-

(1) Cette proportion est d'environ 3 à 4 % dans les réacteurs à eau ordinaire qui sont les réacteurs les plus couramment employés.

**SCHÉMA DE PRINCIPE
D'UNE CENTRALE CLASSIQUE
AVEC CHAUDIÈRE
A COMBUSTIBLE FOSSILE**

- 1 Brûleur
- 2 Ballon
- 3 Ventilateur d'air
- 4 Surchauffeur
- 5 Cheminée



porteur. Cette gaine peut être suivant les cas en magnésium, en acier inoxydable ou en alliage de zirconium.

le modérateur

Pour entretenir plus facilement la réaction en chaîne, il faut ralentir les neutrons depuis leur vitesse d'émission de 20 000 km/s jusqu'à une vitesse de l'ordre de 2 km/s. Tel est le rôle du modérateur. Celui-ci doit ralentir les neutrons en les capturant le moins possible. Il doit être formé d'atomes légers de façon que les neutrons, en rebondissant par choc élastique sur les noyaux du modérateur, à la manière des billes de billard, soient ralentis le plus vite possible. C'est par ces chocs successifs que les neutrons sont ralentis. Ainsi, contrairement à ce que ce terme pourrait suggérer, le modérateur n'atténue pas la réaction mais il la rend possible.

Les modérateurs les plus employés sont : le graphite, l'eau ordinaire, l'eau lourde ou certains liquides organiques.

le fluide caloporteur

La chaleur libérée au sein du combustible par la fission nucléaire et qui sert à produire la vapeur, est évacuée hors du cœur du réacteur par un fluide, gaz ou liquide, mis en mouvement par une soufflante ou une pompe.

Le fluide caloporteur doit :

- être suffisamment stable chimiquement en présence des réactions nucléaires,
- capturer le moins possible les neutrons,
- avoir une capacité et une conductivité calorifiques élevées,
- ne corroder ni la gaine du combustible ni les autres constituants du réacteur.

Le fluide caloporteur peut être :

- du gaz carbonique dans le cas des réacteurs à uranium naturel,
- de l'eau dans le cas des réacteurs à uranium enrichi-eau ordinaire,
- du sodium dans le cas des réacteurs surrégénérateurs,
- de l'hélium, de l'eau lourde, des liquides organiques, pour d'autres types de réacteurs.

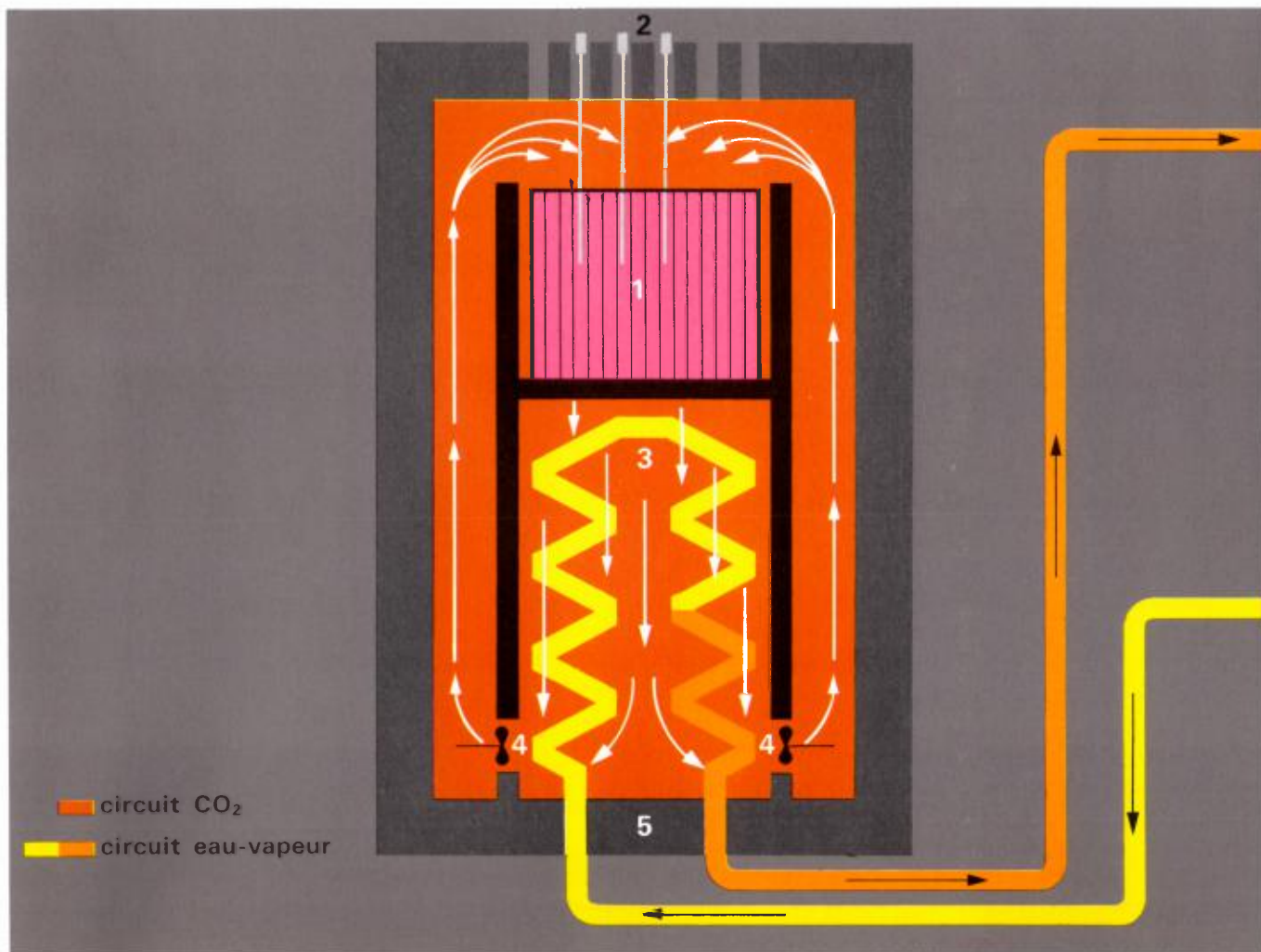
dispositif de réglage et de sécurité

Ce dispositif sert à maintenir la réaction en chaîne à un niveau déterminé et à l'arrêter immédiatement si une situation anormale est détectée. Il est composé de barres formées de matériaux ayant la propriété de capturer très avidement les neutrons. A l'arrêt du réacteur, ces barres sont enfoncées dans le cœur.

Schématiquement, on peut distinguer deux types de barres : les barres de réglage et les barres de sécurité.

SCHÉMA DE PRINCIPE
D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE
AVEC RÉACTEUR
A URANIUM NATUREL

- 1 Cœur du réacteur
- 2 Barres de contrôle
- 3 Echangeur
- 4 Soufflante
- 5 Caisson



Le réglage normal de la réaction en chaîne est obtenu en enfonçant plus ou moins les barres de réglage dans le cœur du réacteur. Les barres de sécurité sont destinées à arrêter la réaction nucléaire en cas d'incident ; ces barres sont disposées de manière à pénétrer dans le cœur dans un temps extrêmement court, sous l'action de leur propre poids ou d'un mécanisme approprié et à action rapide ; elles sont en nombre suffisant pour que le risque de non-fonctionnement simultané soit exclu.

Les barres de réglage et de sécurité sont commandées par des mécanismes reliés à des automatismes de réglage et d'alarme.

Dans certains types de réacteurs le réglage est assuré par introduction ou retrait dans le fluide caloporteur d'un corps avide de neutrons : le bore.

enveloppe étanche (cuve)

L'enveloppe étanche dans laquelle sont installés le cœur et le dispositif de réglage (et parfois d'autres matériels tels que des sécheurs de vapeur ou même des échangeurs) est calculée pour résister à la pression interne du fluide caloporteur. Elle peut être soit un caisson en béton précontraint de plusieurs mètres d'épaisseur dans le cas des réacteurs à uranium naturel graphite-gaz, soit une cuve métallique pouvant atteindre une vingtaine de centimètres d'épaisseur revêtue intérieurement d'acier inoxydable dans le cas des réacteurs à eau ordinaire.



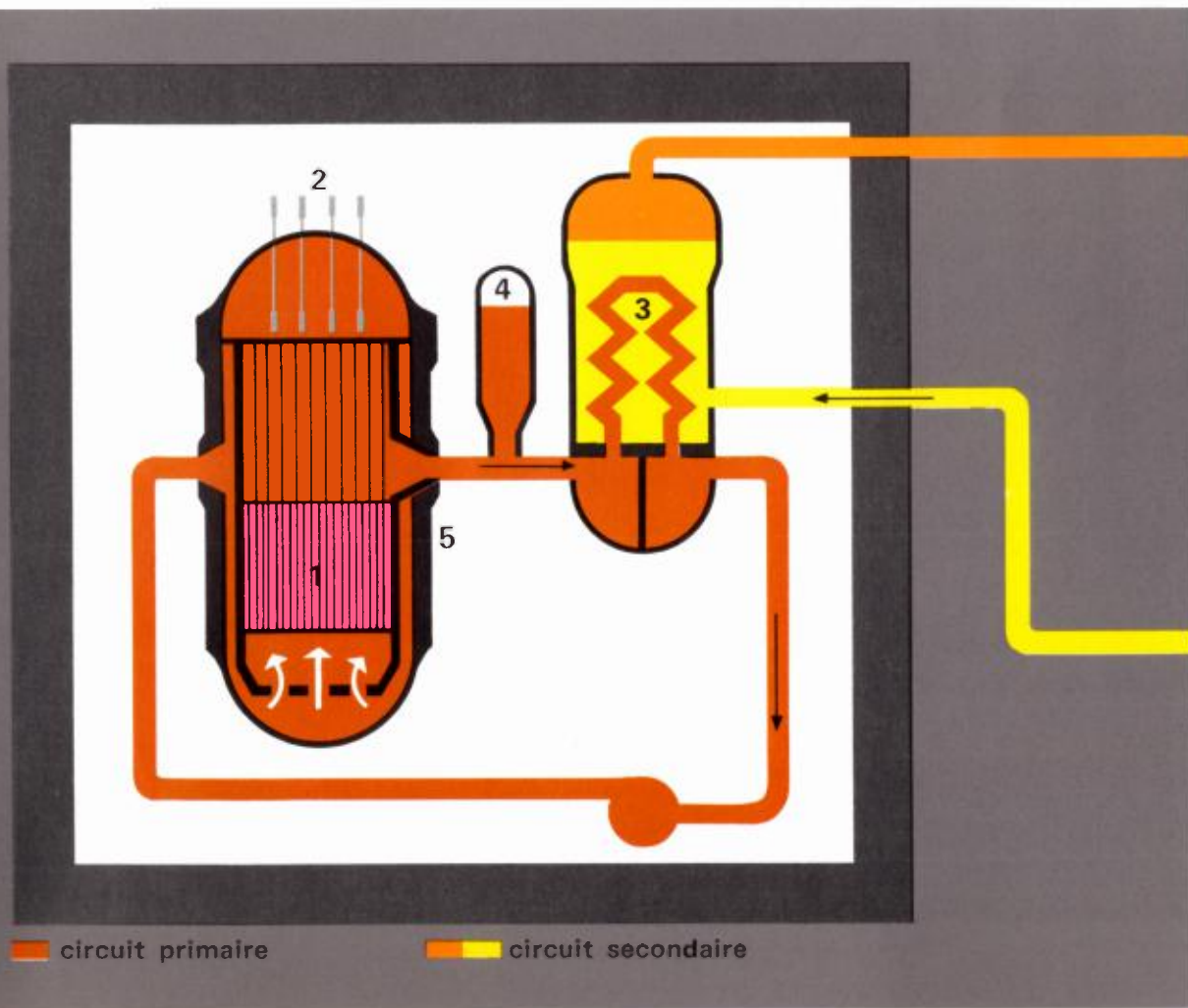
Cuve



Échangeur

**SCHEMA DE PRINCIPE
D'UNE CENTRALE NUCLEAIRE
AVEC REACTEUR A URANIUM ENRICHI
ET EAU SOUS PRESSION**

- 1 Cœur du réacteur
- 2 Barres de contrôle
- 3 Echangeur
- 4 Pressuriseur
- 5 Cuve



le circuit de transmission de chaleur comporte :

- des échangeurs qui transmettent la chaleur du fluide caloporteur au circuit eau-vapeur,
- des tuyauteries et des pompes.

La chaleur est extraite du cœur du réacteur par le fluide caloporteur. Elle est transmise généralement au circuit eau-vapeur qui alimente la turbine par l'intermédiaire d'échangeurs de chaleur. Ceux-ci jouent le rôle des tubes de la chaudière d'une centrale thermique classique. Ils sont constitués par des faisceaux de tubes à l'extérieur desquels circule le fluide caloporteur sous haute pression et à l'intérieur desquels l'eau est vaporisée. Des tuyauteries en acier assurent, en circuit fermé, les liaisons entre la cuve du réacteur et les échangeurs d'une part, entre les échangeurs et la turbine d'autre part. Des pompes assurent la circulation des fluides dans les tuyauteries.

EN RESUME, IL APPARAÎT QU'UN REACTEUR NUCLEAIRE, DU FAIT MEME DE SA CONCEPTION, NE FAIT APPEL QU'A DES TECHNIQUES SIMPLES, DEJA UTILISEES ET BIEN AU POINT.

comparaison entre les différentes filières

Les schémas ci-contre indiquent les principaux organes et circuits de fluides pour quatre « filières » nucléaires, la filière graphite-gaz, la filière à eau ordinaire, système PWR et système BWR qui constitueront la majeure partie du parc et la filière dite « rapide » dont le prototype actuel est Phénix. Une extrapolation industrielle Super-Phénix est prévue sur le site de Creys-Malville, (Isère).

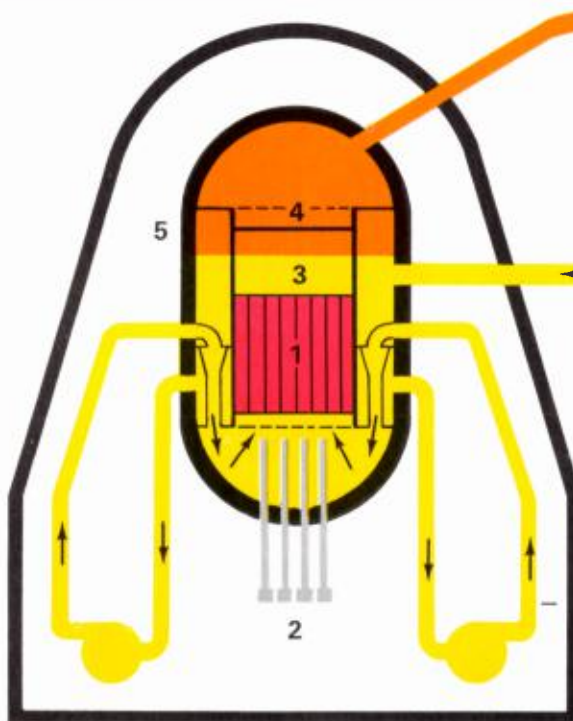
Dans la filière PWR l'eau du « circuit primaire » destiné à extraire la chaleur est maintenue sous pression élevée de façon à éviter l'ébullition dans la cuve.

Dans la filière BWR, au contraire, l'eau entre en ébullition dans la cuve et la vapeur produite actionne directement la turbine.

Ceci conduit à prendre quelques précautions contre la radioactivité tout au long du parcours de la vapeur y compris le groupe turbo-alternateur, les produits radioactifs emportés par la vapeur sont de vie courte et le temps de démontage du groupe turbo-alternateur suffit généralement à s'en préserver.

SCHÉMA DE PRINCIPE
D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE
AVEC RÉACTEUR A URANIUM ENRICHI
ET EAU BOUILLANTE

- 1 Cœur du réacteur
- 2 Barres de contrôle
- 3 Séparateur
- 4 Sécheur
- 5 Cuve



les réacteurs “rapides”

Dans un réacteur à uranium naturel du type gaz-graphite ou dans un réacteur à uranium faiblement enrichi (3 à 4 ‰), du type à eau ordinaire, il est nécessaire pour entretenir la réaction en chaîne de ralentir les neutrons afin d'augmenter les chances de rencontre d'un neutron et d'un noyau.

Au contraire, dans un réacteur à neutrons rapides, le pourcentage de matière fissile étant plus élevé, le nombre de neutrons émis est plus grand et il n'est pas besoin de les ralentir.

Le dégagement de chaleur par unité de volume de cœur, très élevé, nécessite l'emploi d'un fluide caloporteur de grande capacité calorifique, capable d'extraire la chaleur produite, sans que la température du cœur ne soit excessive et sans ralentir les neutrons.

On a choisi un métal fondu, le sodium. Il présente une grande affinité pour l'oxygène et ses composés, mais l'expérience acquise dans des installations industrielles a prouvé qu'il était possible de réaliser des circuits isolant parfaitement le sodium de l'eau et de l'air. L'absence de pression dans les circuits de sodium facilite d'ailleurs beaucoup la prévention de fuites éventuelles.

L'eau ne peut pas être utilisée dans les réacteurs à neutrons rapides. Sa présence dans le cœur ralentirait trop les neutrons ; en outre le sodium liquide a l'avantage de permettre contrairement aux autres fluides qui produisent de la vapeur entre 300 et 400 °C de produire de la vapeur à 500 °C environ

comme dans des centrales thermiques classiques.

Le cœur est formé de deux parties :

- une partie centrale, composée d'un mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium dans lequel la réaction en chaîne se développe ;
- une partie périphérique, « la couverture », composée d'uranium naturel dont une partie de l'U 238 se transforme progressivement en plutonium sous l'effet des neutrons.

Une cuve métallique remplie de sodium contient cet ensemble ainsi que l'échangeur primaire et la pompe de circulation ; un matelas d'argon, neutre vis-à-vis du sodium, permet la dilatation.

Une deuxième cuve métallique double la précédente en laissant entre les deux cuves un espace libre qui est rempli d'azote.

L'échangeur primaire, situé dans la cuve, transmet la chaleur à un circuit secondaire de sodium qui, lui, sort de la cuve au niveau de la dalle supérieure.

Ce deuxième circuit transmet la chaleur au générateur de vapeur.

Les deux circuits de sodium liquide ne sont pas sous pression et constituent des circuits fermés étanches.

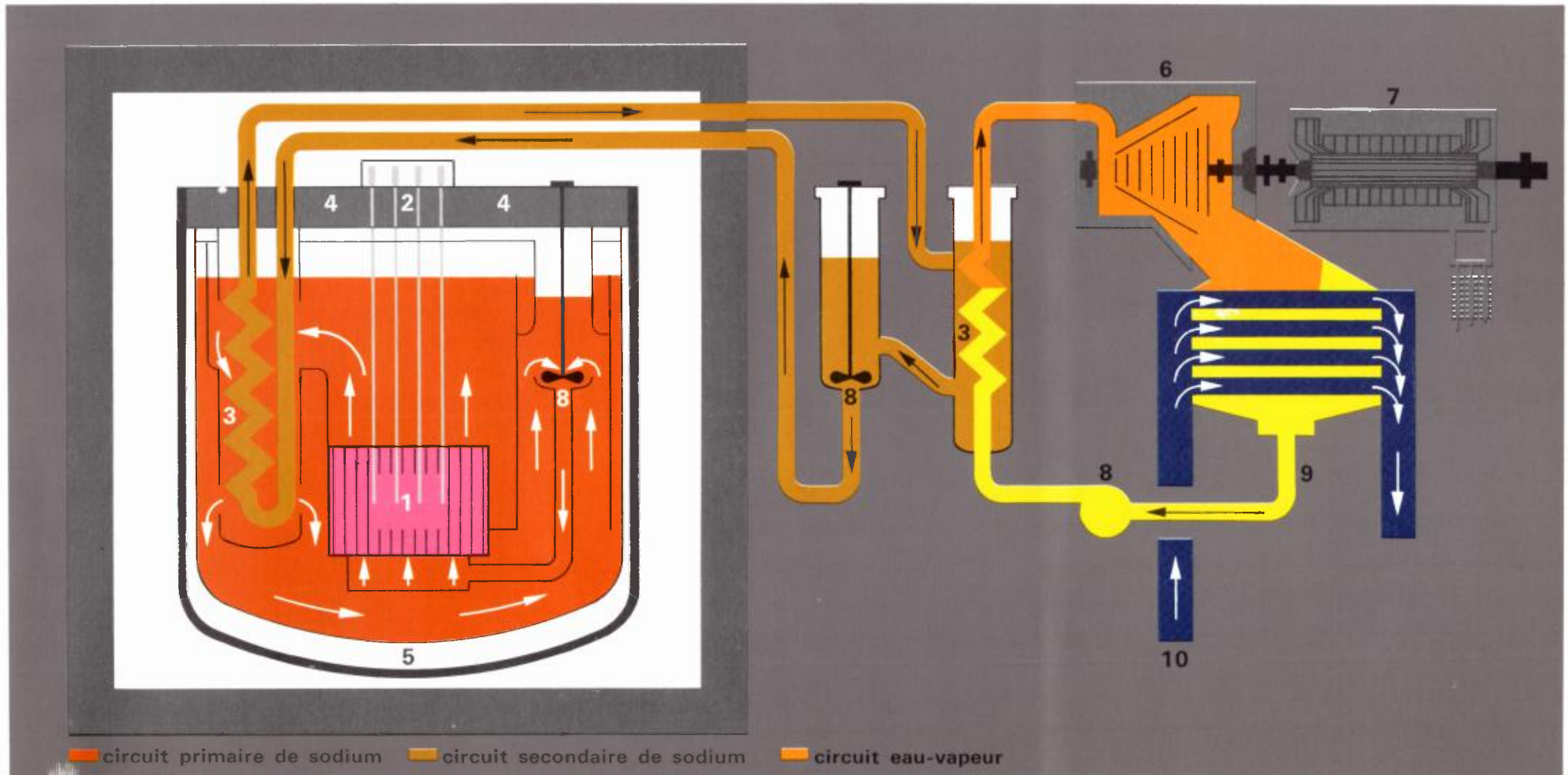
Le circuit primaire est constamment épuré et ne sera pas renouvelé pendant la vie de la centrale.

Le circuit secondaire, dont le rôle est d'isoler le circuit primaire du circuit « eau vapeur », possède des réservoirs d'expansion avec matelas d'argon capables d'absorber les surpressions éventuelles.

SCHÉMA DE PRINCIPE
D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE
AVEC REACTEUR SURRÉGÉNÉRATEUR
A NEUTRONS RAPIDES

- 1 Cœur
- 2 Barres de contrôle
- 3 Echangeur
- 4 Dalle de fermeture
- 5 Cuve

- 6 Turbine
- 7 Alternateur
- 8 Pompe
- 9 Condenseur
- 10 Eau de la rivière



**les
rayonnements
la
radioactivité**

généralités

les différents types de rayonnements

Il existe **dans la nature** un certain nombre d'éléments comme le radium et l'uranium qui s'épuisent lentement en se désintégrant noyau par noyau ; ils donnent alors naissance à d'autres corps qui, à leur tour, peuvent avoir un destin analogue ; ces éléments instables sont les éléments radioactifs naturels.

Depuis la découverte, en 1934, de la radioactivité artificielle par Irène et Frédéric Joliot-Curie, on sait fabriquer de nombreux radioéléments à partir d'atomes stables.

Il en existe actuellement plus de 1 500 dont la plupart sont des radioisotopes d'éléments naturels.

Le mécanisme de désintégration dit **radioactivité** est le même pour les éléments radioactifs naturels ou artificiels.

Il se manifeste par l'émission d'énergie sous forme de particules électrisées α ou β , ou de rayonnements électromagnétiques γ , analogues aux rayons X et à la lumière.

■ **les rayons α** sont formés de noyaux d'hélium ; ils sont peu pénétrants : toute l'énergie qu'ils transportent est cédée le long d'un par-

cours très court : quelques centimètres dans l'air, quelques dizaines de millièmes de millimètre dans les tissus vivants.

■ **les rayons β** sont formés de négatons ; ils sont un peu plus pénétrants que les rayons α : quelques dizaines de centimètres dans l'air.

■ **les rayons γ** sont de nature électromagnétique ; ils sont très pénétrants ; ils peuvent parcourir une grande distance dans l'air sans qu'une fraction notable ne soit absorbée.

durée de vie des radioéléments

La radioactivité décroît avec le temps. Pour préciser le phénomène de décroissance on définit la **période** : temps nécessaire pour que la moitié des atomes de cette substance se désintègre ; ce temps est constant pour un rayonnement donné d'une substance donnée. Certains radioéléments, comme l'uranium 238, ont des périodes très longues se chiffrant en milliards d'années ; pour d'autres, comme le polonium 215, la période se compte en millièmes de seconde.

Ceux des radioéléments naturels dont la période est courte auraient depuis longtemps disparu de la terre s'ils n'étaient pas produits à partir de radioéléments à vie plus longue.

détection et mesure des rayonnements

Les rayonnements nucléaires ne sont pas perçus par les sens de l'homme. Ils ne peuvent être observés que par les effets qu'ils produisent dans le milieu qu'ils traversent. Les compteurs de Geiger Müller, utilisent la propriété qu'ont les rayonnements de faire apparaître des charges électriques dans les gaz (ionisation).

unités en radioactivité

La **radioactivité** d'un corps est caractérisée par le nombre de désintégrations qui s'y produisent en une seconde. L'unité de l'activité est le **curie** (1). La quantité d'énergie libérée par les rayonnements par gramme de matière irradiée, la **dose absorbée**, est mesurée en **rad**. L'action des divers rayonnements sur les organismes vivants dépend aussi de leur nature et de celle des tissus irradiés. On utilise alors une unité d'**équivalent de dose** qui est le **rem** ou le millirem, (1/1 000 rem).

(1) Le curie est égal à 37 milliards de désintégrations par seconde, c'est-à-dire approximativement l'activité de 1 g de radium.

les rayonnements nucléaires dans la nature et les rayonnements créés par l'homme

la radioactivité naturelle

Les rayonnements nucléaires font partie de l'environnement naturel de l'homme ; ils proviennent de trois sources :

- les rayons cosmiques, particules de haute énergie venant du soleil et des étoiles,
- les éléments radioactifs qui se trouvent dans le sol, dans les matériaux des habitations,
- les radioéléments qui sont présents dans le corps humain provenant de l'air que l'on respire, de l'eau que l'on boit, des aliments que l'on mange (1).

En France, la dose moyenne annuelle de rayonnement naturel reçue par un individu est d'environ 125 millirems.

Mais des populations entières reçoivent des doses atteignant 1 000 millirems. Il y a en effet des différences importantes suivant la nature géologique du sol, l'altitude et la latitude.

la radioactivité artificielle

Chaque individu reçoit une dose de rayonnements variable provenant des sources créées par l'homme.

Ce sont, pour une faible part, les retombées provenant des essais d'armes nucléaires, la radioactivité dégagée par les installations nucléaires, les appareils de télévision, les montres à cadrans lumineux, le tabac, etc. La part principale est due à l'exposition aux rayonnements à des fins médicales ; dans les pays développés, celle-ci représente en moyenne une dose au moins équivalente à la moitié de la dose due à la radioactivité naturelle.

Enfin certaines habitudes nouvelles de vie, si elles ne créent pas de radioactivité artificielle, contribuent à augmenter la quantité de radioactivité naturelle reçue ; ce sont par exemple la pratique des sports d'hiver ou de l'alpinisme et les voyages en avion.

la radioactivité des centrales

L'augmentation de la radioactivité ambiante autour des centrales nucléaires existantes est à peine décelable par les appareils les plus précis et, de toute façon, bien inférieure aux variations de la radioactivité naturelle.

En fait, on peut estimer que à la limite même du site de la centrale, la dose d'irradiation pour une personne y séjournant toute l'année serait de l'ordre de un mrem/an. A dix kilomètres, elle serait de l'ordre de 0,1 mrem/an.

On notera que 5 mrem/an est la dose supplémentaire à laquelle on s'expose lorsqu'on quitte une localité pour habiter une localité 250 m plus haut (en gros, la dénivellation entre Paris et Epinal). Tout ceci est négligeable non seulement vis-à-vis de la radioactivité naturelle mais aussi de ses variations courantes d'un point à un autre.

(1) Principalement les isotopes radioactifs du potassium et du carbone.

rayons
cosmiques

50
MILLIREMS

téléviseur

10
MILLIREMS

centrale
nucléaire

< 1
MILLIREM

25
MILLIREMS

50
MILLIREMS

examens
radiologiques

matériaux
terrestres

50
MILLIREMS

2
MILLIREMS

cadran
lumineux
de montre

radioactivité naturelle

radioactivité artificielle



reconcentration dans la chaîne alimentaire

Le transfert d'un polluant chimique qu'il soit radioactif ou non comprend plusieurs étapes.

- tout d'abord transfert du polluant depuis son émission jusqu'aux produits bruts utilisés pour l'alimentation de l'homme.

Ce transfert peut être direct s'il s'agit par exemple de retombées sur des végétaux directement absorbés par l'homme. Par contre il peut être plus long s'il s'agit de polluants rejetés dans le sol ou dans les eaux puis absorbés par des animaux se nourrissant l'un de l'autre remontant ainsi jusqu'à l'homme.

- Ensuite transfert depuis le produit brut jusqu'aux aliments au stade de la consommation. Ceci tient compte des pratiques de préparation des aliments, des quantités absorbées, des parties consommées.

- Enfin transfert après injection dans l'organisme de l'homme et accumulation éventuelle dans certains organes.

Il est donc indispensable de connaître les taux de passage des polluants du milieu physique aux divers niveaux de la chaîne alimentaire.

Ces taux résultent de l'ensemble des phénomènes physico-chimiques et biologiques de dilution et de transfert. Ces taux de passage peuvent se traduire par une concentration ou une épuration. Ils sont exprimés sous la forme d'un facteur de concentration. C'est le rapport entre la quantité de polluant contenu

dans l'unité de poids d'un maillon de la chaîne par rapport à la quantité de polluant existant par unité de poids du milieu dans lequel il se trouve.

On cite généralement des facteurs de concentration très importants de l'ordre de 10 000 pour les algues microscopiques.

Il faut bien souligner que cette contamination des algues est purement physique et de surface elle n'affecte le métabolisme de la plante que d'une façon négligeable.

Ce qui explique que l'algue se décontamine lorsqu'elle baigne dans une eau qui n'est plus contaminée.

Quel que soit le degré de contamination de ces algues les poissons qui s'en nourrissent ne fixent certaines substances que dans la mesure où leur métabolisme l'accepte, par exemple le Césium 137 n'est assimilé qu'en raison de sa parenté chimique avec le potassium dont l'organisme du poisson a besoin et en concurrence avec celui-ci.

Ceci explique que les poissons adultes ne concentrent que très peu les radioéléments. Les poissons peuvent d'ailleurs se décontaminer par élimination biologique et ceci d'autant plus que le poisson se déplacera et fréquentera des zones non contaminées.

En conclusion on doit retenir qu'un corps quelconque n'a pas plus de chance d'être assimilé par l'organisme s'il est radioactif que s'il ne l'est pas.

Ce qui est important de connaître c'est le facteur de concentration global c'est-à-dire le rapport entre la quantité d'éléments radio-

actifs en présence de laquelle on se trouve et la quantité qu'on assimile réellement.

Les rejets autorisés, radioéléments par radioéléments, tiennent compte du cheminement possible de ces radioéléments au travers de la chaîne alimentaire pour que l'homme le plus exposé ne reçoive aucune dose supérieure à ce que la réglementation autorise.

modalités d'atteinte de l'homme

- la **contamination** peut être **externe**, par contact de la peau ;

- la **contamination** peut être **interne** par pénétration de radioéléments dans l'organisme, par inhalation, ingestion ou introduction à travers la peau.

Les radioéléments peuvent, suivant leur nature chimique, se répartir de manière à peu près homogène dans tout l'organisme, ou se concentrer de façon sélective dans un ou plusieurs organes.

La quantité de radioéléments présente dans un organe dépend de plusieurs facteurs, en particulier du pouvoir d'assimilation de l'organe et de sa vitesse d'élimination vis-à-vis du corps considéré. En biologie ce n'est pas seulement la période physique du radioélément qui intervient mais le temps toujours plus court nécessaire pour que la moitié de la radioactivité présente dans l'organe soit éliminée.

les rayonnements nucléaires et le corps humain

les effets biologiques des rayonnements

Les rayonnements agissent sur les organismes vivants par ionisation ou par excitation des molécules cellulaires.

De nombreux facteurs interviennent lors d'une irradiation, et, parmi eux, sont prépondérants : la dose, l'étendue et la durée.

Les effets somatiques (1) peuvent être différents, selon le ou les organes intéressés. Par exemple, les organes formateurs du sang sont particulièrement sensibles aux rayonnements.

■ Les effets précoces

ne mettent la vie en danger qu'après des irradiations étendues, à doses fortes et brèves : ainsi 500 rems instantanés sont-ils nécessaires pour provoquer la mort d'un homme sur deux, si l'irradiation est étendue au corps entier ; limitée à un doigt, il n'y a plus d'effet. De même, la diminution de la dose ou l'augmentation de la durée de l'irradiation annulent l'effet.

■ Les effets différés

les plus redoutés sont les cancers dont les leucémies. Ils nécessitent, eux aussi, des

doses fortes : c'est ainsi que la population survivante de NAGASAKI n'a manifesté une augmentation significative de leucémies et de cancers que pour des doses supérieures à 200 rems.

Des doses plus faibles, **a fortiori** étalées sur un an ou plus, ne provoquent aucun effet.

Ainsi des populations soumises à une irradiation naturelle bien supérieure à la moyenne en France (125 mrem/an), telles celles du Kérala aux Indes (moyenne de 1 000 mrem/an), n'ont pas manifesté d'élévation du nombre de leucémies et cancers.

Des expérimentations d'irradiation continue de mammifères ont permis de montrer que des doses quotidiennes demeurent sans effet sur leur durée de vie et que certaines même sont susceptibles d'allonger cette durée.

Les effets génétiques se traduisent par des mutations, c'est-à-dire par l'induction de caractères nouveaux pouvant porter sur la constitution du descendant ou sur son aptitude à se reproduire.

Ces effets ne sont observés que pour des doses très élevées, délivrées en un temps bref. Une expérimentation animale d'irradiation systématique de mâles, à doses élevées, poursuivie sur plusieurs dizaines de générations, n'a pas réussi à faire naître des « mutés ».

réactions de l'organisme à une irradiation

Les effets observés demeurent inférieurs aux prévisions, par un double processus de défense, l'un de réparation et l'autre de sélection.

■ **Réparation** : dans le cas où la cellule est lésée sans être tuée, un mécanisme de réparation enzymatique intervient sur place ; si la cellule est tuée, elle disparaît et est remplacée par une cellule neuve, grâce à une activation des processus normaux de renouvellement cellulaire (2).

■ **Sélection** : en génétique, une forte sélection intervient à tous les stades du développement de la cellule de reproduction, puis de l'œuf fécondé.

Ainsi, les doses de rayonnement ne se cumulent, ni au cours de la vie de l'individu, ni au cours des générations successives.

Les faibles doses de rayonnement ne produisent aucun effet nocif, ni somatique ni génétique. En particulier, on n'a pu déceler de tels effets, ni sur des populations soumises en permanence à une irradiation naturelle élevée, ni même sur des animaux irradiés à doses plus importantes sur des générations successives.

(2) Ainsi, dans l'organisme humain d'un adulte normal, 500 milliards de cellules sont-elles renouvelées chaque jour, soit à peu près 1 % du stock cellulaire total.

(1) C'est-à-dire qui se manifestent sur le corps de l'individu.

protection contre les rayonnements nucléaires les normes de radioprotection

sources de rayonnement dans une centrale nucléaire

Le réacteur est le siège de formation de produits radioactifs dont il faut se protéger.

Ces produits radioactifs sont :

- Les « produits de fission » créés par la fission des noyaux d'uranium au sein du combustible ;
- Les « produits d'activation » ainsi dénommés parce qu'ils résultent de la transformation en isotopes radioactifs, sous l'action de neutrons émis lors de la fission, de matériaux autres que le combustible (matériaux de structures, impuretés du fluide caloporteur).

Les produits de fission sont des mélanges de divers éléments : certains sont gazeux, d'autres solides. La masse de produits de fission formés est cependant faible.

Un très grand nombre de ces radioéléments étant à vie courte, l'activité du cœur **décroît très vite** dans les premières heures qui suivent l'arrêt du réacteur : elle est réduite de moitié après 3 heures.

de la sûreté. A ce point de vue d'ailleurs, il importe d'observer que même en cas de rupture de gaine les produits de fission non volatils, qui représentent 75 % environ de l'activité totale, restent confinés dans le combustible.

Beaucoup de **produits d'activation** ont une vie très courte, et sont d'importance mineure comparée à celle des produits de fission. La majeure partie de ces produits se trouve dans le fluide caloporteur, et est éliminée en permanence par le traitement continu de ce fluide.

Les dispositions adoptées dans la conception des centrales nucléaires, ainsi que les mesures de contrôle imposées tant au cours de la construction que lors de l'exploitation, répondent à la préoccupation de limiter au maximum la dissémination des produits de fission et d'activation.

protection contre les rayonnements nucléaires

Il n'existe, actuellement du moins, que trois moyens efficaces de se protéger des rayonne-

ments : le temps, l'éloignement de la source et les écrans.

- **Le temps** : intervient de deux façons :
 - dans la limitation de la durée d'exposition,
 - dans le stockage des éléments à vie courte ou moyenne pour attendre leur décroissance radioactive (1).
- **La distance** : la dose reçue varie comme l'inverse du carré de la distance à la source (2).
- **Les écrans** : un écran absorbe d'autant mieux les rayonnements qu'il est plus épais et constitué d'un matériau plus lourd (3).

les normes de radioprotection

Les principes généraux de protection contre les rayonnements ont été fixés, en France, par le décret n° 66-450 du 20 juin 1966. Ce décret et les textes qui le complètent sont en

(1) Exemple : un corps ayant une période de une heure n'aura plus :

- après une heure que la moitié de sa radioactivité initiale,
- après 2 heures que le quart de sa radioactivité initiale,
- après 10 heures que 1/1 000 de sa radioactivité initiale,
- après 20 heures que 1/1 000 000 de sa radioactivité initiale.

(2) Un rem à 5 mètres n'est plus que 1/100 de rem à 50 mètres.

(3) Contre les rayons les plus pénétrants, on utilise le plomb et le béton.

accord avec les directives de la Communauté Européenne de l'Energie Atomique.

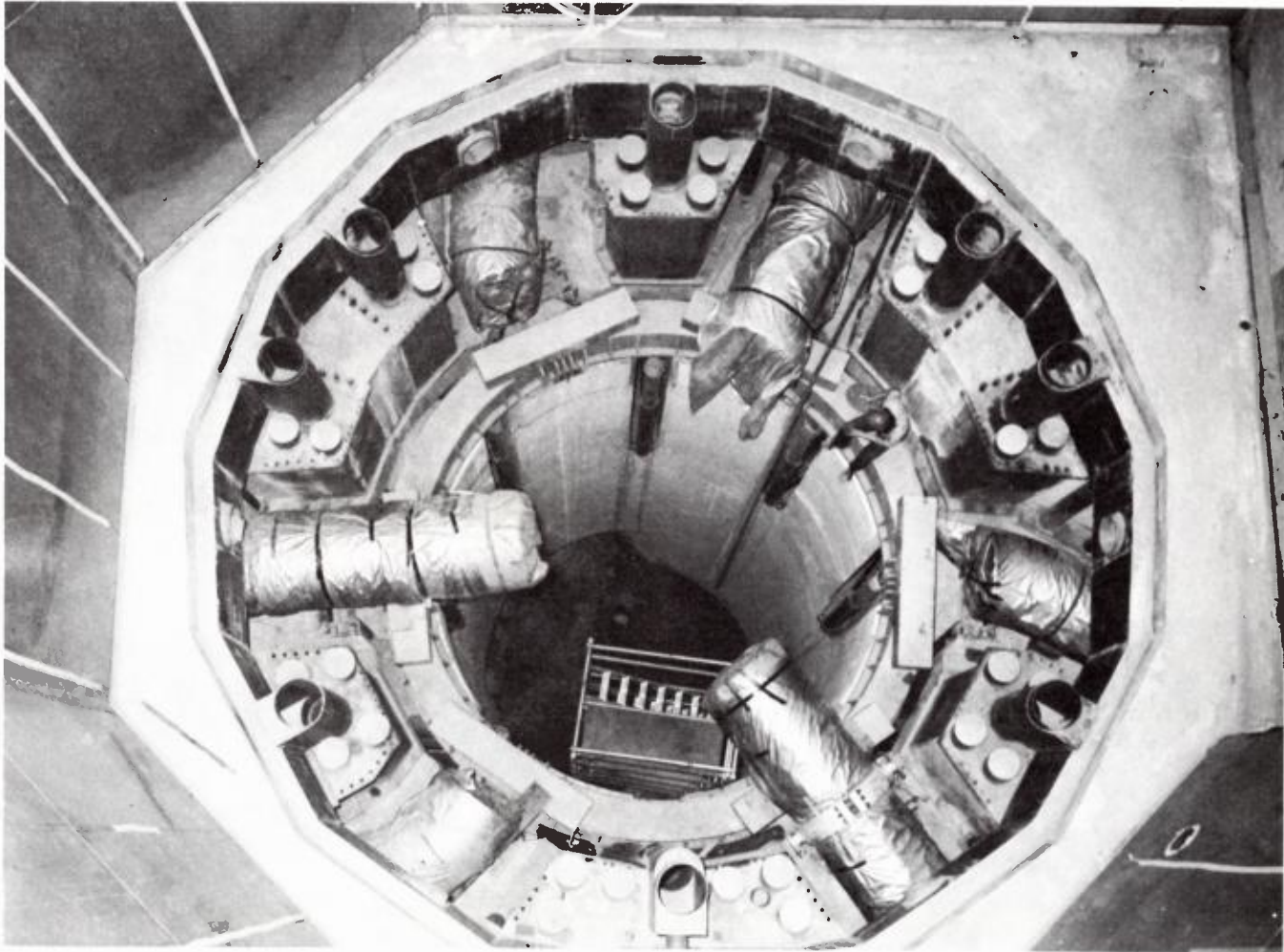
Cette réglementation impose des limites aux niveaux d'irradiation ou de contamination, de telle sorte qu'ils n'entraînent pas de dommages appréciables, tant pour les individus que pour les populations.

Les normes fondamentales de radioprotection définissent des équivalents de doses d'irradiation maximales admissibles (1). Elles s'appliquent à toutes les irradiations artificielles, à l'exclusion de celles qui résultent de l'usage médical des rayonnements.

Les normes établies pour les travailleurs et les « personnes du public » tiennent compte surtout des risques somatiques ; par contre, pour l'ensemble de la population, la norme est principalement déterminée par des considérations d'ordre génétique ; c'est pourquoi, elle fixe une limite de 5 rems pour la dose accumulée par génération, soit en moyenne 30 ans.

Dans le cas de contamination, des normes particulières dérivant des normes fondamentales ont été définies. Elles fixent les concentrations maximales admissibles dans l'air ou dans l'eau de boisson pour chaque radioélément correspondant à l'organe considéré comme critique.

(1) L'équivalent de dose maximal admissible diffère suivant qu'il s'agit de personnes travaillant dans les installations nucléaires et qui peuvent donc être surveillées individuellement ou de personnes du public.
Les valeurs principales sont les suivantes, pour une irradiation générale de l'organisme :
• Agents directement affectés à des travaux sous rayonnements : en fonctionnement normal 5 rems



en 3 mois consécutifs	3 rems
Exposition exceptionnelle concertée, en une ou plusieurs fois	12 rems
• Agents non affectés à des travaux sous rayonnements : par an	1,5 rem
• Personnes du public : par an	0,5 rem
• Population dans son ensemble : pour 30 ans	5 rems

Centrale de Fessenheim : puits dans lequel sera placée la cuve du réacteur. On distingue les 6 tubulures de raccordement au circuit primaire et l'important écran en béton destiné à absorber les rayonnements. L'échelle est donnée par la présence d'un monteur.



**la sûreté
des réacteurs**

radioprotection et sûreté

La radioprotection correspond aux dispositions prises pour protéger les travailleurs et le public contre les risques éventuels présentés par l'installation, aussi bien pendant son fonctionnement normal qu'en cas d'incident. Elle concerne l'homme et son milieu, c'est donc une responsabilité de médecins et de radiobiologistes.

La sûreté recouvre l'ensemble des dispositions techniques imposées au stade de la conception, de la construction, puis de l'exploitation et finalement du déclassement des installations, pour assurer le fonctionnement normal, prévenir les accidents et en limiter les effets. Elle fait appel à la compétence technique des ingénieurs : ceux de l'exploitant et des constructeurs d'une part, ceux de l'administration et des organismes techniques qui l'assistent d'autre part.

On est donc conduit à examiner :

le fonctionnement normal de la centrale et la radioprotection ;

la prévention des accidents et la limitation de leurs conséquences.

fonctionnement normal et radioprotection

D'une manière schématique, les très faibles doses d'irradiation à l'extérieur de la centrale sont dues :

- au fait que la quasi-totalité des produits radioactifs se trouvent dans le combustible et y restent. Ils sont séparés de l'extérieur par des barrières successives, généralement au nombre de **trois** :

- le combustible, source de chaleur, est contenu dans des tubes métalliques formant une **première barrière** destinée à empêcher la dispersion des matières radioactives qu'il contient et qui se forment au fur et à mesure des réaction de fission ;

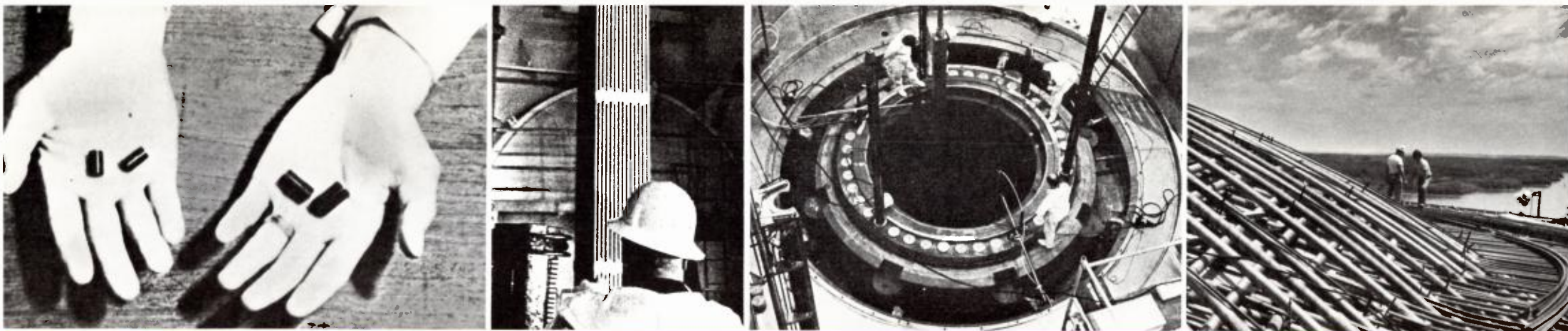
- l'eau refroidissant le combustible nucléaire, ainsi protégé par sa gaine, est elle-même contenue dans une enveloppe sous pression (ensemble de la cuve et des tuyauteries), constituant une **seconde barrière** ;

- la chaudière nucléaire, enfin, est contenue dans un bâtiment étanche appelé enceinte de confinement, qui constitue une **troisième barrière** contre la dispersion éventuelle des produits radioactifs en cas d'incident sur les barrières précédentes ;

- au contrôle extrêmement strict des rejets radioactifs.

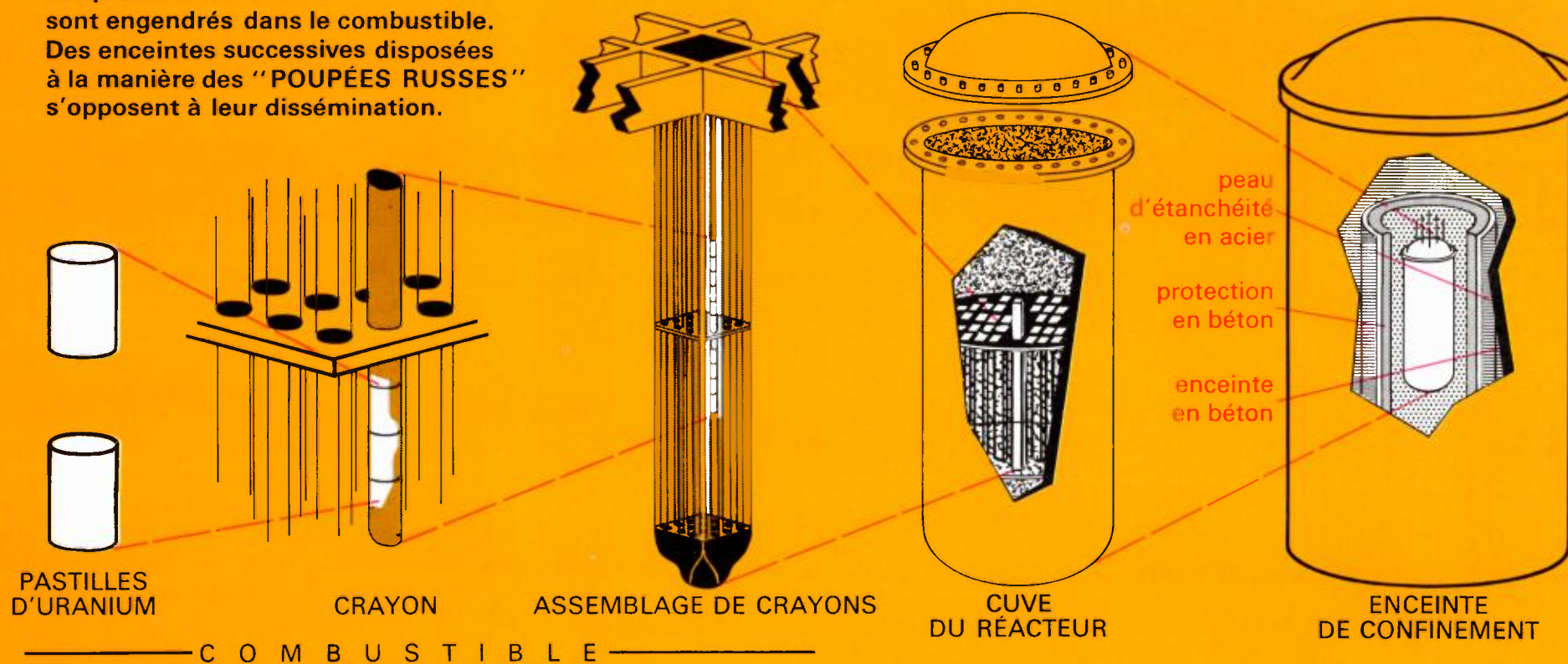
En régime normal, une centrale électronucléaire produit quelques effluents faiblement radioactifs qui proviennent essentiellement de l'eau de la chaudière en contact avec les assemblages combustibles et avec les structures du cœur. Le contrôle et la décontamination sont effectués dans des circuits spécialisés de la centrale (circuit de contrôle volumétrique et chimique, circuit de traitement des effluents). Seule une part très faible des produits radioactifs est rejetée à l'extérieur, toujours après un traitement approprié. Qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, ils ne sont évacués de la centrale que sous le strict contrôle du Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants (SCPRI). Les déchets solides sont stockés dans les dépôts spécialisés. Les effluents liquides ou gazeux ne sont rejetés dans le milieu ambiant que si la radioactivité qu'ils ajoutent ne représente qu'une faible fraction de la radioactivité naturelle, conformément aux recommandations de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) (1).

(1) Créée en 1927 par des médecins, cette commission regroupe les plus grandes autorités médicales compétentes et ses recommandations sont suivies par tous les Etats et les Institutions Internationales.



PRÉCAUTIONS PRISES POUR CONTENIR LES RAYONNEMENTS

Les produits radioactifs
sont engendrés dans le combustible.
Des enceintes successives disposées
à la manière des "POUPÉES RUSSES"
s'opposent à leur dissémination.



la prévention des accidents

La prévention des accidents repose sur la rigueur apportée dans la conception, la construction et les consignes d'exploitation et d'entretien. On imagine en outre, par avance et de façon systématique, les différents types d'accidents (même les moins vraisemblables) qui pourraient se produire et dont on évalue la probabilité. Les conséquences sont analysées et la centrale est construite de façon à donner au public et au personnel une protection contre tout accident.

un réacteur n'est pas une bombe

En réalité, il est physiquement impossible à un réacteur de centrale nucléaire d'exploser comme une bombe atomique : Alors que dans une bombe, lors du déclenchement, les pièces contenant la matière fissile presque pure (U 235 ou plutonium) sont assemblées avec force dans un temps extrêmement court et maintenues rapprochées pour former une masse explosive, dans un réacteur, la matière fissile est très dispersée

au milieu des matières inertes (U 238, modérateur, fluide de refroidissement). D'autre part, dans la plupart des types de réacteurs il y a moins de 4 % de matière fissile (U 235) dans le combustible - alors que le combustible de la bombe comprend plus de 90 % de matière fissile.

De plus, la sécurité de fonctionnement d'un réacteur est assurée par son autostabilité. Tous les réacteurs sont conçus de manière que la réaction en chaîne ait tendance instantanément à se ralentir lorsque la température augmente. Donc, si la température du réacteur s'élève accidentellement, la réaction en chaîne s'arrête.

exemples de précautions

Pour dimensionner les principaux dispositifs de sécurité et notamment l'enceinte de confinement (3^e barrière), on prend en compte un des accidents qui pourraient conduire aux conséquences les plus graves : l'arrêt momentané de la réfrigération du cœur du réacteur. Aucun accident de ce type ne s'est produit depuis le début de l'exploitation des centrales nucléaires. On possède une expérience industrielle des circuits haute pression, tels que ceux qui contiennent l'eau de réfrigération, mais on apporte une rigueur accrue dans la

conception, la construction et la surveillance en service des circuits des centrales nucléaires.

Par ailleurs, une rupture de canalisation ne conduit pas forcément à l'arrêt de réfrigération du cœur du réacteur. Néanmoins les réacteurs possèdent un système de réfrigération de secours constitué par plusieurs circuits identiques et indépendants, chacun d'entre eux étant capable d'assurer à lui seul la réfrigération même si l'alimentation en énergie électrique vient à manquer.

La centrale est construite pour résister aux agressions de l'environnement : séismes, inondations, chutes d'avion, incendies ou explosions dus par exemple à des installations industrielles proches.

En outre, E.D.F. et les différentes sociétés industrielles ont mis en place les structures nécessaires pour que chaque action susceptible de concerner la sûreté et la fiabilité lors de la construction d'une centrale nucléaire subisse un double contrôle.

Un premier contrôle, nommé contrôle interne, s'exerce à l'intérieur du service. Le second contrôle, nommé contrôle externe, est assuré par des personnes hiérarchiquement indépendantes des services contrôlés et engageant personnellement leur responsabilité.

contrôle de sûreté et de radioprotection

Pour être autorisé à construire et mettre en service une centrale nucléaire, l'exploitant est tenu de remettre à l'administration un certain nombre de rapports décrivant les différentes dispositions techniques prévues tant en matière de sûreté que de radioprotection.

- Tout d'abord, E.D.F. dépose auprès du Ministère de l'Industrie et de la Recherche une demande **d'autorisation de création** accompagnée de rapports traitant de la sûreté et de la radioprotection.

Ces éléments relatifs à la sûreté sont examinés par le Service Central de Sûreté des Installations Nucléaires (Service du Ministère de l'Industrie et de la Recherche) qui prend l'avis d'un groupe permanent chargé de l'étude des problèmes techniques que posent en matière de sûreté la création, la mise en œuvre, le fonctionnement et l'arrêt définitif des réacteurs nucléaires.

Ce groupe permanent comprend des représentants du Ministère de l'Industrie et des experts nommés par le ministre. Les conclusions du groupe devant lequel sont présentés les résultats de « l'analyse de sûreté » pratiquée par le Commissariat à l'Energie Atomique à la demande du Service Central de Sûreté des Installations Nucléaires, sont un des éléments importants pour l'élaboration du projet de décret d'autorisation de création.

examinés par le SCPRI qui vérifie que le fonctionnement de la centrale est sans conséquences pour la santé de l'homme et la sauvegarde du milieu.

Les conclusions du SCPRI constituent le second élément important du projet de décret.

Ce projet est soumis à la Commission Interministérielle des Installations Nucléaires de Base, qui regroupe tous les ministères intéressés dont ceux de la Santé, de la Qualité de la vie (Environnement), de l'Intérieur (Direction Générale des Collectivités locales, Direction du Service National de la Protection Civile) et du Travail.

De toute façon, l'autorisation ne peut être accordée sans l'accord du Ministère de la Santé qui doit donner un avis « conforme » et dispose ainsi d'un droit de veto en la matière.

- Six mois avant la date prévue pour le premier chargement en combustible nucléaire, E.D.F. doit présenter au ministre de l'Industrie et de la Recherche une proposition de règles générales d'exploitation.

Ce rapport est examiné par le Service Central de Sûreté des Installations Nucléaires qui prend de nouveau l'avis du groupe permanent dans les mêmes conditions que ci-dessus.

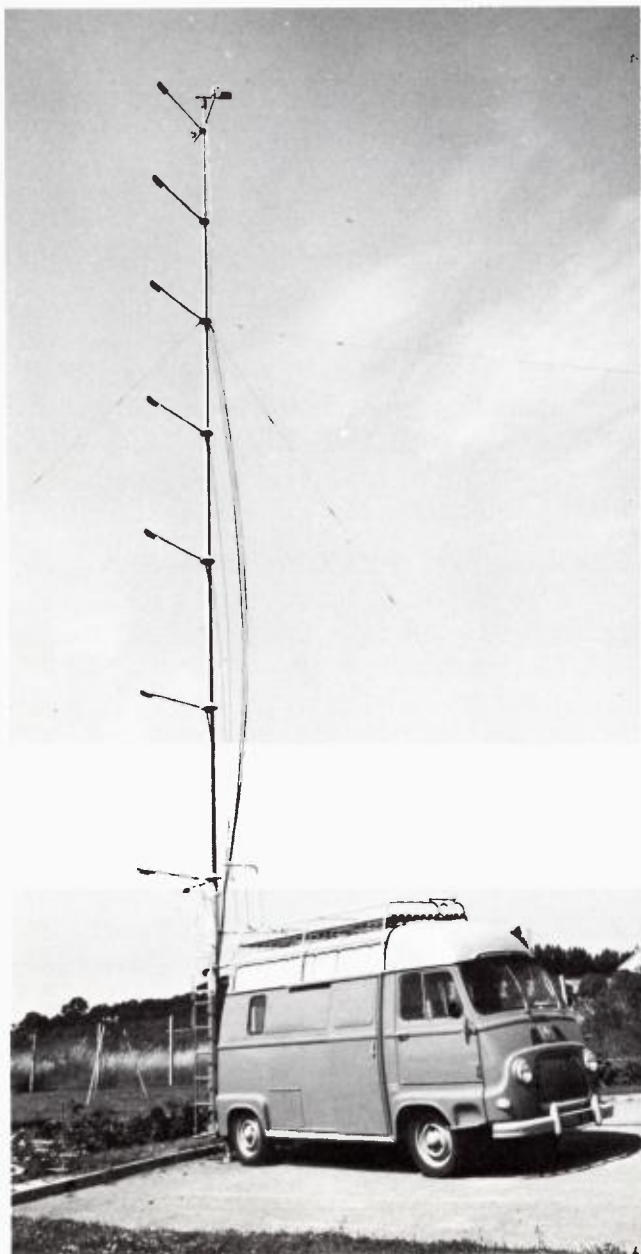
L'autorisation de procéder au chargement et aux essais de fonctionnement est accordée par le ministre de l'Industrie et de la Recherche.

- L'approbation de mise en exploitation normale est subordonnée à l'examen par le Ser-

vice Central de Sûreté des Installations Nucléaires des enseignements tirés des essais de mise en service.

L'autorisation de mise en exploitation est accordée par le ministre de l'Industrie et de la Recherche ; celui-ci peut également la suspendre à tout moment, notamment sur proposition du ministre de la Santé publique.





surveillance de la radioactivité du milieu en cours d'exploitation

Afin de s'assurer que toutes les mesures prises pour réduire et contrôler la quantité de déchets radioactifs sont efficaces, un réseau de surveillance est mis en place à l'extérieur du site pour déceler une éventuelle contamination du milieu.

Il comprend :

- Un contrôle permanent, après filtration, de la radioactivité de l'air des circuits de ventilation.
- Des analyses périodiques de poussière et d'eau de pluie prélevées à proximité et à une certaine distance de la centrale.
- Des analyses périodiques de l'herbe, du lait des vaches et des eaux souterraines.
- Une surveillance des appareils fixes et la prise de mesures en d'autres points, au moyen de véhicules spécialisés.
- Des examens périodiques, sur les prélèvements d'eau et de boues dans le fleuve, au moyen d'une station de contrôle installée en aval de l'usine.

Cette surveillance, à la charge de l'exploitant, est contrôlée étroitement par le Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants (S.C.P.R.I.), service technique du Ministère de la Santé publique, qui reçoit mensuellement les résultats des mesures effectuées et qui fait lui-même un certain nombre de mesures complémentaires.

sûreté des réacteurs nucléaires à la lumière de l'expérience

Les efforts faits en vue de la sécurité des réacteurs et qui viennent d'être décrits ne sont pas tous connus du public. C'est pourquoi les installations nucléaires continuent de susciter un sentiment de méfiance, qui est entretenu par des informations alarmistes. Le témoignage de l'expérience devrait faire justice de ces informations.

Il y a actuellement dans le monde plus de 170 réacteurs électronucléaires en service correspondant à une puissance totale de 70 000 MW et à une durée cumulée de marche de plus de 1 000 années.

Ces chiffres soulignent l'importance qu'il faut accorder aux résultats de l'expérience acquise par l'exploitation des réacteurs nucléaires, dans le domaine de la sûreté.

les rejets de radioactivité des centrales nucléaires en fonctionnement

En France, les résultats des mesures de radioactivité faites au voisinage des centrales nucléaires de Chinon, des Ardennes et de Saint-Laurent-des-Eaux et leur comparaison avec les différentes mesures effectuées sur l'en-

semble du territoire français n'ont jamais permis de mettre en évidence une différence quelconque du fait de la présence de ces centrales. L'augmentation de la radioactivité ambiante qu'on leur attribue est à peine décelable par les appareils les plus précis et de toute façon bien inférieure aux variations de la radioactivité naturelle.

A partir des valeurs des rejets des 39 centrales en service en 1973, les Américains ont calculé que la dose moyenne résultant pour l'ensemble de la population vivant à moins de 80 kilomètres d'une de ces centrales, représentait moins de 0,1 % de la dose annuelle due à l'irradiation naturelle au niveau de la mer aux Etats-Unis.

Les résultats confirment donc que les mesures actuellement retenues pour construire et exploiter une centrale nucléaire ont atteint leur objectif, à savoir : faire en sorte que ces centrales n'entraînent pas d'irradiations significatives de la population.

les accidents survenus

Les seuls accidents mortels se sont produits dans des installations expérimentales, pour la plupart à usage militaire ; ils ont entraîné, depuis 30 ans et pour le monde entier, la mort

d'un nombre total de personnes inférieur à dix.

Il s'est produit comme dans toute technique nouvelle certains accidents mécaniques. L'accident de Saint-Laurent-des-Eaux en est un exemple ; il a nécessité un an de réparation, mais il n'a entraîné strictement aucune contamination extérieure.

Les premiers réacteurs industriels de production d'électricité sont maintenant en service depuis plus de dix-huit ans et il n'y a eu, du fait de ces réacteurs, ni en France, ni dans les autres pays possédant des centrales nucléaires, **aucun accident de personne** du fait de la radioactivité, ni parmi le personnel ni parmi la population.

Ce tribut, payé pour le développement d'une nouvelle technologie, est exceptionnellement faible en regard des réalisations obtenues : ce résultat est dû à la rigueur des précautions prises dans tous les domaines qui touchent à l'énergie nucléaire. Aucune autre technique ne peut annoncer aussi peu d'accidents. Par opposition, on peut rappeler qu'il y a eu en 1973 en France :

15 636 décès par accidents d'automobile.

traitement et transport du combustible et des déchets

les effluents

Les effluents liquides ou gazeux provenant de fuites accidentelles ou des opérations de routine (vidange des circuits et de la piscine de stockage, renouvellement de l'air des locaux, etc.) sont traités à l'intérieur de la centrale dans des locaux isolés de l'extérieur et, notamment de la nappe phréatique, par un cuvelage étanche.

On dispose pour ce traitement d'un ensemble de moyens :

- dispositifs de mesure de radioactivité,
- filtres ou procédés de captation de très haute efficacité,
- réservoirs de rétention pour attendre le temps nécessaire à la décroissance radioactive,
- pour les effluents à vie courte, dispositifs de ventilation, de dilution et de dispersion,
- pour les effluents à vie longue, stockage sous pression dans des réservoirs (1).

les déchets

Enfin, certaines pièces activées, les filtres

(1) Par exemple, le Krypton produit par un réacteur de 1 000 MW pendant un an et comprimé dans une bouteille représente quelques litres seulement.

d'épuration des effluents, les boues des installations de traitement d'effluents liquides, les détritiques divers contaminés qui constituent les déchets solides sont stockés dans des récipients étanches et évacués vers un centre de stockage national. Ces déchets, une fois compactés, sont mis dans des blocs de béton et entreposés dans des silos en béton ou simplement couverts de terre suivant leur niveau de radioactivité, généralement faible.

Des précautions sont prises néanmoins pour détecter toute fissure et cheminement de produits radioactifs dans le sol et dans les eaux de ruissellement.

les combustibles irradiés

Dans les réacteurs à eau ordinaire, le combustible est renouvelé par tiers tous les ans.

Ce renouvellement intéresse pour une tranche de 1 000 MW, 25 à 27 tonnes d'uranium. Après avoir séjourné 3 mois dans la piscine de la centrale pendant lesquels 98 % de l'activité a disparu, cet uranium encore fortement radioactif est transporté dans des containers blindés vers l'usine de retraitement située à La Hague. Dans cette usine, une première opération mécanique consiste à découper les crayons de combustible.

Ensuite divers traitements chimiques permettent d'isoler les gaines, l'uranium, le plutonium et les produits de fission.

L'uranium ainsi isolé est peu radioactif comme il est encore légèrement enrichi il représente une valeur non négligeable et sa réutilisation est prévue dans les réacteurs. Il en est de même du plutonium.

Les produits de fission très radioactifs sont isolés. Une faible partie est réutilisée par l'industrie et la médecine (2). Le reste ne représente qu'un très faible volume (quelques mètres cubes) est conservé temporairement (5 ans aux U.S.A.) sous forme liquide. Cette solution est conservée dans des réservoirs à double enveloppe en acier inoxydable placés dans des caves bétonnées.

Des réservoirs de secours sont disposés au cas où des transferts s'avèreraient nécessaires.

Après cette conservation sous phase liquide pendant laquelle la radioactivité décroît d'une façon appréciable la France a décidé de vitrifier ces solutions.

Après des essais concluants sur le pilote PIVER à Marcoule le C.E.A. a entrepris la

(2) Traitement du cancer, stimulateurs cardiaques, etc.

construction d'une chaîne de vitrification à la Hague.

Une fois vitrifiés sous forme de petits blocs les produits radioactifs sont conservés pendant plusieurs années dans des conteneurs eux-mêmes placés dans des puits en acier inoxydable ventilés pour permettre le dégagement des calories encore produites.

Lorsque la température de ces blocs permettra de ne plus avoir recours à une ventilation ils seront définitivement stockés dans les couches profondes et stables du sous-sol.

On entend souvent parler d'autres solutions envisagées pour se débarrasser des produits à vie très longue telle que stockage extra-terrestre, transmutation en éléments à vie plus courte etc...

Ces solutions font l'objet d'études mais n'ont pas encore débouché sur des projets fiables et économiques.

transport des déchets

Le règlement national de transport des matières dangereuses, édicté par le ministère des Transports prévoit pour les matières radioactives des dispositions extrêmement sévères et des conditionnements adaptés à la radioactivité et à la nocivité radiologique

potentielle des produits transportés. C'est ainsi que pour les déchets de moyenne ou de haute activité, les containers doivent pouvoir résister à la série d'épreuves suivantes : chute de 9 mètres sur une surface indéformable, feu de 30 minutes à 800 degrés, immersion sous 15 mètres d'eau. Les transports sont effectués par la route ou par la voie ferrée. Aucun transport de matières radioactives, n'a jusqu'à présent, entraîné, lors d'accident, de

conséquences en ce qui concerne la contamination ou l'irradiation.

démantèlement des centrales

On parle souvent d'une durée de vie de 20 ans pour les centrales nucléaires. En fait, ces 20 années représentent la durée de fonctionne-



ment qui est utilisée dans les calculs économiques. Elle est inférieure à celle qui est adoptée pour les calculs économiques concernant les centrales thermiques classiques (30 ans) de façon à tenir compte d'une évolution possible de la rentabilité des centrales existantes qui conduirait à leur arrêt anticipé.

Mais le matériel lui-même est conçu pour durer plus longtemps. Une centrale nucléaire pourrait donc, comme une centrale classique, fonctionner au moins 30 ans.

Lorsque l'arrêt définitif d'une centrale nucléaire est décidé (c'est le cas actuellement pour la tranche n° 1 de la centrale de Chinon) plusieurs possibilités techniquement réalisables se présentent :

- « mise en cocon » temporaire de l'installation avec surveillance ;
- démantèlement partiel ;
- démantèlement total.

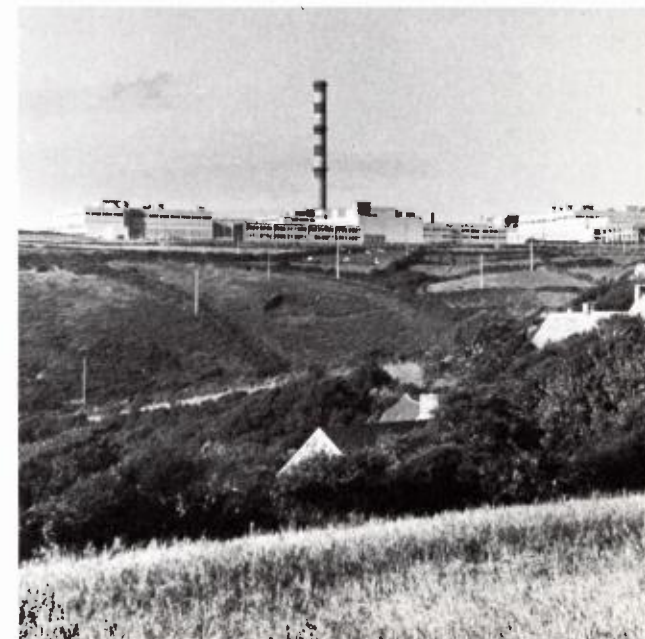
Dans tous les cas le combustible sera déchargé. Un certain délai entre l'arrêt et le démontage reste favorable car il permet une diminution importante de la radioactivité. (5 ans).

L'emprise au sol d'un réacteur nucléaire étant faible, il serait alors possible de réutiliser le terrain de la centrale pour la construction d'autres réacteurs.

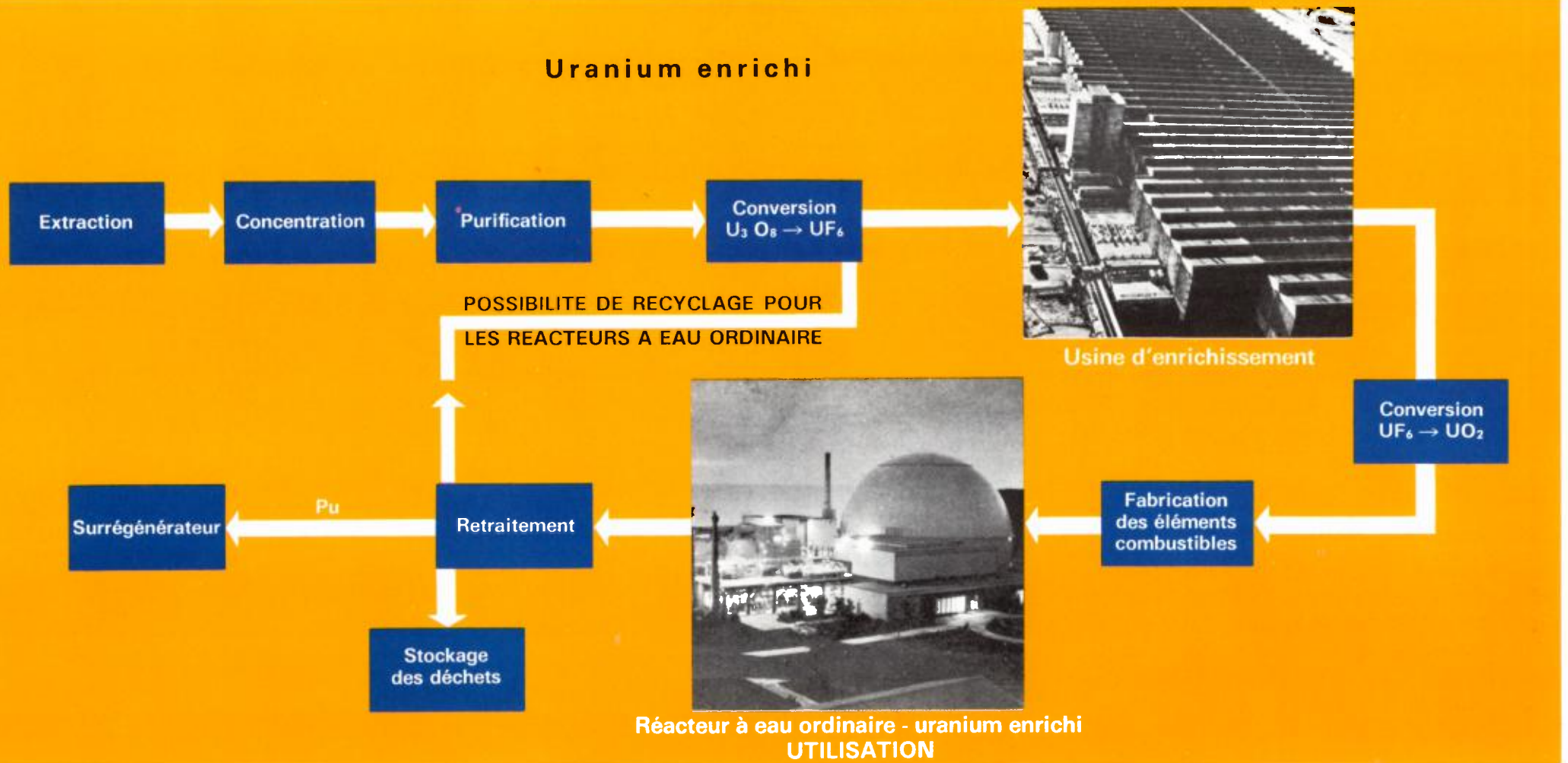
Le démantèlement partiel ou total exige de découper le matériel radioactif, de le placer dans des conteneurs spécialement protégés et de le transporter sur un lieu de stockage définitif.

Des travaux analogues ont déjà été réalisés pour des petites installations de faible puissance et lors des travaux de remise en état de réacteurs. Le coût du démantèlement a été chiffré à environ 5 % du prix de construction de la centrale.

Usine de retraitement de La Hague.



Uranium enrichi



cycle de combustible

A la différence du charbon, l'uranium ne peut pas être utilisé dans la centrale tel qu'il sort de la mine ; il doit subir de nombreuses transformations avant de pouvoir être utilisé dans un réacteur. D'autre part, de nouvelles transformations sont opérées après le séjour de l'uranium dans le réacteur. En effet, alors que les résidus provenant de la combustion du charbon ne peuvent pas être recyclés, le combustible irradié sortant d'un réacteur contient toujours du plutonium et éventuellement de l'uranium encore enrichi qui peuvent être utilisés dans d'autres réacteurs. L'ensemble de ces transformations (y compris celles qui s'effectuent dans le réacteur) est appelé le cycle de combustible.

Ce cycle dure plusieurs années (dont 2 à 3 ans de séjour dans le réacteur) et, compte tenu du prix élevé de l'uranium, correspond à des immobilisations financières très importantes.

■ Principales étapes du cycle.

Les minerais sont exploités s'ils contiennent 1 à 2 ‰ d'uranium au moins.

Le minerai, débarrassé de sa gangue, est traité dans des usines de concentration chimique où l'uranium est mis en solution, puis extrait par solvant organique.

● Uranium naturel

A sa sortie des usines de concentration, l'uranium est purifié avant d'être transformé en métal avec lequel on fabrique les éléments combustibles à uranium naturel.

● Uranium à enrichir

L'uranium sortant des usines de raffinage est transformé en hexafluore gazeux : UF_6 , qui est la matière première utilisée pour l'enrichissement de l'uranium.

■ Enrichissement de l'uranium en uranium 235

On peut envisager plusieurs procédés de séparation des deux isotopes de l'uranium ; tous sont basés sur la très faible différence des masses atomiques de l' U_{235} et l' U_{238} ; les plus importants sont :

la diffusion gazeuse,
l'ultracentrifugation.

Actuellement, la diffusion gazeuse est le seul procédé utilisé à l'échelle industrielle. Le principe en est le suivant :

Lorsqu'on fait passer l' UF_6 gazeux à travers une paroi poreuse très mince dont les pores sont infiniment petits (de l'ordre du milliard de pores par cm^2) les atomes d'Uranium 235 diffusent légèrement plus vite et la portion du gaz qui a franchi la paroi en un temps donné

est donc très légèrement enrichie en atomes d' U_{235} .

Comme les masses atomiques de l' U_{235} et de l' U_{238} sont très voisines, l'enrichissement est presque insensible et il faut recommencer l'opération un très grand nombre de fois pour obtenir une concentration appréciable en U_{235} . C'est ainsi que pour réaliser un enrichissement à 3,5 ‰ il faut plus de 1000 étages, c'est-à-dire plus de mille opérations successives de diffusion.

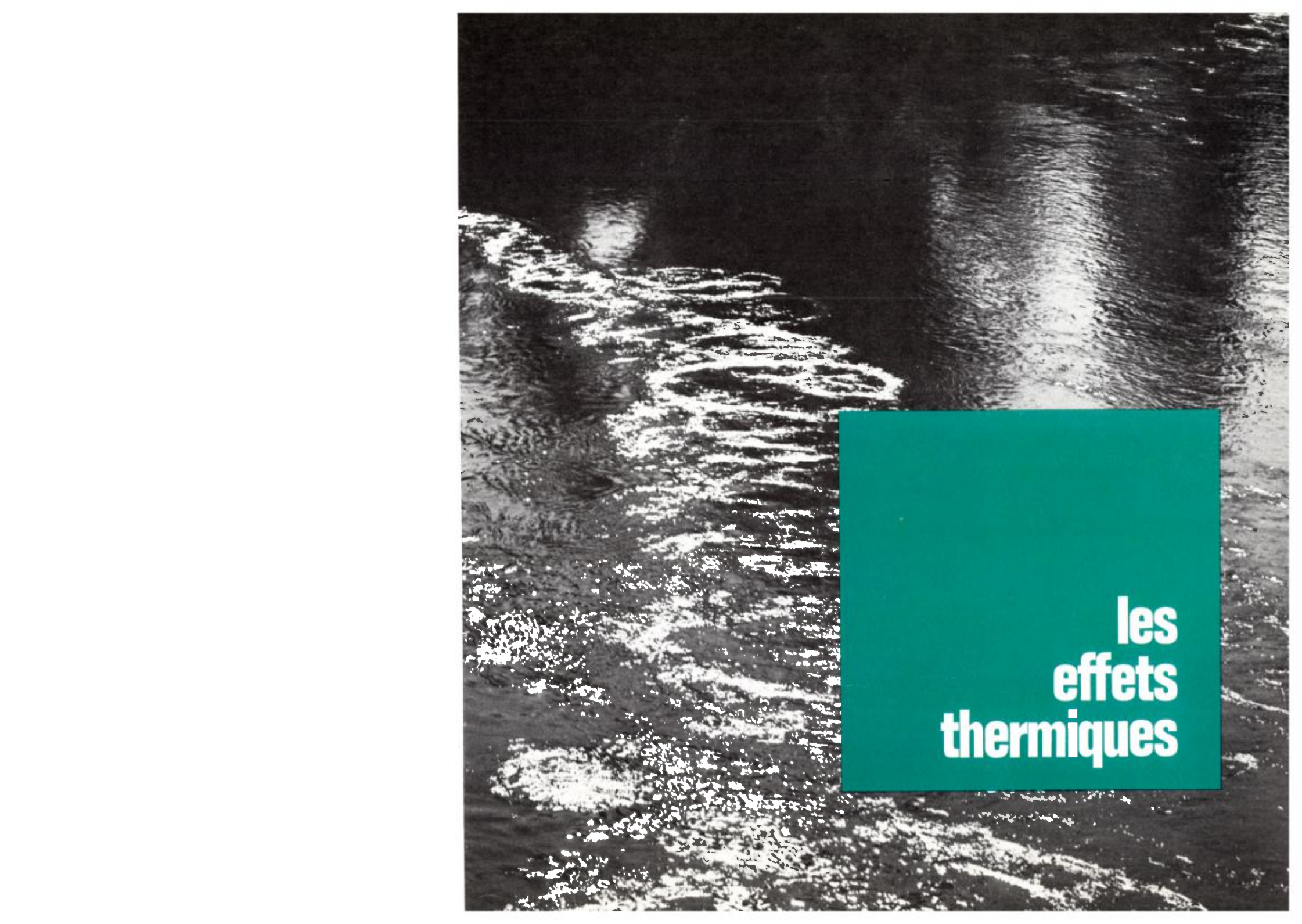
■ A la sortie des usines d'enrichissement l' UF_6 est transformé à nouveau en produits solides pour permettre la préparation et la fabrication des éléments combustibles.

■ Séjour dans le réacteur et la piscine de désactivation

Lorsqu'il est placé dans le réacteur, le combustible subit la fission nucléaire et sa composition se transforme progressivement par disparition partielle de l' U_{235} (appauvrissement) et apparition de produits nouveaux : le Plutonium et les produits de fission.

Après son utilisation dans le réacteur, le combustible irradié est placé dans une piscine de désactivation où il séjourne au moins 3 mois et perd environ 98 ‰ de sa radioactivité.

■ Retraitement des combustibles irradiés (voir page 35).

An aerial photograph of a river. A bright, turbulent plume of water flows from the top right towards the bottom left, contrasting sharply with the darker, calmer water of the rest of the river. This plume represents a thermal discharge.

les effets thermiques

les eaux de refroidissement des condenseurs

comment se pose le problème

La condensation de la vapeur sortant d'une turbine associée à un réacteur nucléaire nécessite un débit d'eau de réfrigération de l'ordre de 45 m³/s pour une tranche de 1 000 MW.

Cette eau se réchauffe d'environ 12 à 15° dans les tubes du condenseur avant de retourner dans le fleuve ou la mer d'où elle a été prélevée.

Il faut ajouter que ce problème n'est pas spécifique des centrales nucléaires, toute transformation de chaleur en force motrice implique, lorsqu'un fluide travaille en cycle fermé le rejet d'une partie de la chaleur produite à la source froide. Notons que l'importance des pertes d'énergie sous forme de chaleur ainsi rejetée ne doit pas être exagérée.

Il s'agit en fait de chaleur très « pauvre » c'est-à-dire à basse température ne convenant pas pour les usages habituels de chauffage domestique ou industriel. Néanmoins les

études et essais en cours devraient permettre d'utiliser une partie de ces calories rejetées. On peut aussi songer à moins « dégrader » la chaleur produite quitte à perdre sur le rendement de l'installation. Mais il serait illusoire de penser que le problème des rejets thermiques des centrales pourrait être totalement résolu par la réutilisation des calories perdues. Les ordres de grandeur sont fort différents et, en période chaude les utilisations négligeables.

ordre de grandeur des températures constatées

Il est habituellement admis de pouvoir rejeter l'eau chaude à une température inférieure ou égale à 30 °C sans que cette limite constitue un seuil rigoureux. Cela dépend avant tout des caractéristiques du milieu récepteur, de l'usage qu'on fait de l'eau, de la faune et flore qu'elle abrite.

Ce milieu aquatique subit naturellement des variations de température qui sont loin d'être négligeables.

La température des eaux de rivière, celle du Rhône par exemple, en amont de Lyon est soumise à des amplitudes saisonnières atteignant 16 à 20 °C, des variations de moyennes mensuelles d'une année sur l'autre de 3 à 4 °C, des fluctuations au cours d'un même mois de 8 à 10 °C, enfin des brusques variations atteignant 8 à 9 °C sur quelques jours, dues vraisemblablement à des remontées en surface des eaux profondes du Léman.

En mer on constate des phénomènes similaires aussi bien en Méditerranée qu'en Manche ; par exemple à Port-La-Nouvelle il a été noté des écarts de 3 °C en quelques heures en période estivale, en Manche des fluctuations de 2 °C sur quelques kilomètres de distance.

Ces fluctuations naturelles de température sont en fait du même ordre de grandeur que les échauffements résultant des rejets de centrale.

La chaleur rejetée au milieu aquatique n'y

reste pas car, finalement, c'est l'atmosphère le grand régulateur de la température des rivières et de la mer. Elle constitue le « puits récepteur » de la chaleur que l'on y introduit. De surcroît le transfert des calories dans l'atmosphère se fait d'autant plus rapidement que les masses d'eau rejetées sont plus chaudes que celles du milieu naturel.

refroidissement en circuit ouvert

CAS DES CENTRALES EN BORD DE MER
L'étendue des panaches formés par l'eau chaude rejetée par les centrales varie suivant les sites considérés.

D'une manière générale, les échauffements supérieurs à quelques degrés restent limités dans une zone restreinte aux abords du rejet tandis que les échauffements plus faibles, de l'ordre de grandeur des variations naturelles,

des températures, concernent de plus grandes étendues.

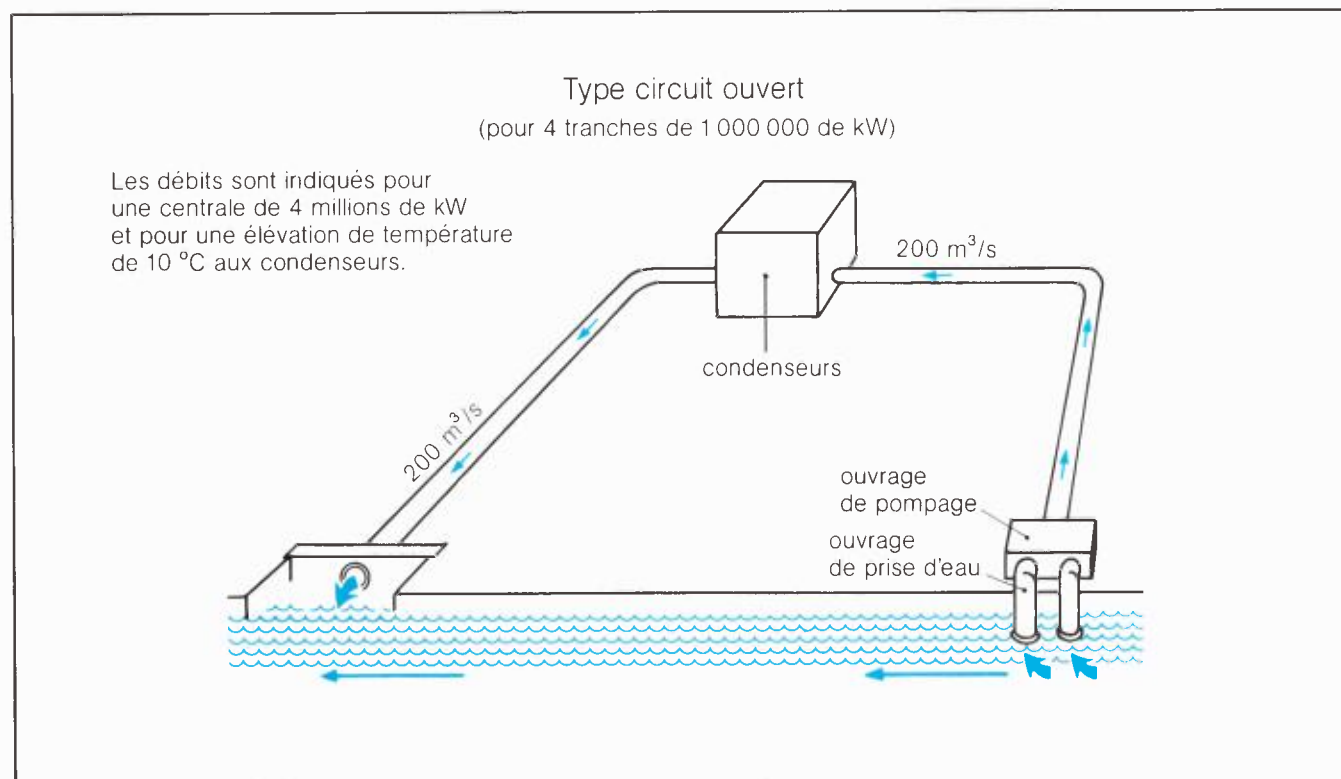
Si l'on considère la zone où l'échauffement dépasse 3 °C, elle est d'environ 5 km² pour une centrale de 5 000 MW. Dans cette zone la baisse de température se fait essentiellement par mélange du jet avec de l'eau plus fraîche. Au-delà, la part des échanges avec l'atmosphère prend de plus en plus d'importance dans le processus de refroidissement du fait des dimensions de la surface intéressée et du temps d'exposition.

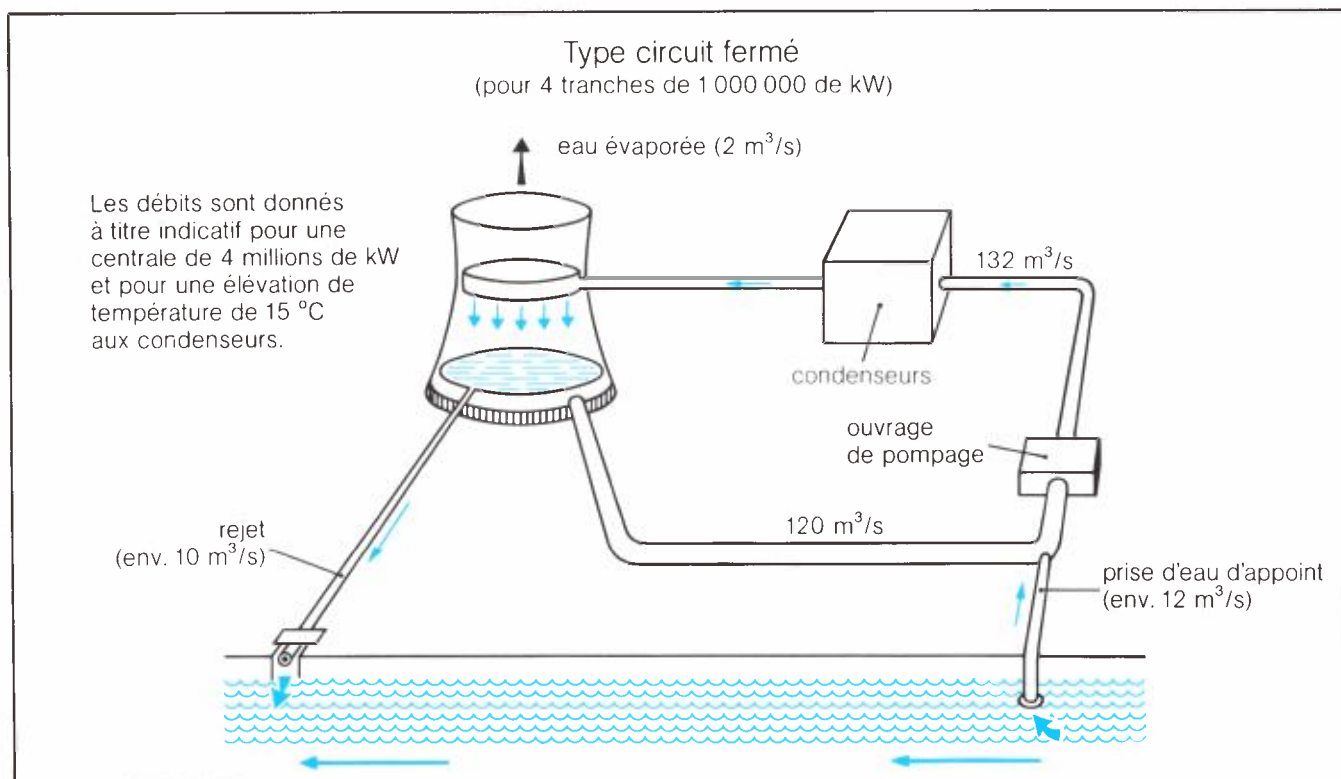
C'est l'action combinée de la dérive, des courants de marée, du vent, de l'impulsion due au jet et des échanges à l'interface eau-atmosphère qui définissent « in fine » la superficie et la forme des zones marines échauffées.

CAS DES CENTRALES SUR RIVIERE

Le plus souvent les eaux servant au refroidissement des centrales n'intéressent qu'une fraction du débit des rivières. Ces eaux sont rejetées le long des rives et se mélangent progressivement vers l'aval ; dans certains cas il a été jugé utile de forcer le mélange au moyen de diffuseurs placés dans la rivière. Les eaux échauffées se refroidissent au contact de l'atmosphère dans leur parcours aval. Il faut noter que les échauffements maximums correspondent aux périodes d'étiages qui pour le Rhône ou le Rhin se produisent durant la saison froide.

Enfin en période chaude l'utilisation des centrales est fréquemment réduite du fait de la baisse de la demande en énergie et de l'entretien obligatoire.





refroidissement en circuit fermé

Quand les débits d'eau des rivières ne sont pas suffisants on utilise des tours de réfrigération humides à tirage naturel. Le principe consiste à pulvériser une certaine quantité d'eau en la fractionnant pour augmenter sa surface d'échange.

Il existe deux types de réfrigérants : à film d'eau ou à gouttes.

Dans les réfrigérants à film d'eau, la disper-

sion est assurée par des plaques de grande dimension placées verticalement à l'intérieur de la tour et sur lesquelles l'eau ruisselle en film mince à contre-courant avec l'air mis en mouvement par l'effet de cheminée créé par la tour qui se prolonge bien au-dessus du système de dispersion.

Dans les réfrigérants à gouttes la dispersion est assurée par des lattes de faible largeur sur lesquelles l'eau cascade en gouttes.

Ces lattes sont généralement placées en deux zones concentriques :

■ l'une dite zone de dispersion extérieure

dans laquelle l'air circule horizontalement en courant croisé avec l'eau,

■ l'autre dite zone de dispersion intérieure dans laquelle l'air s'élève à contre-courant de l'eau.

Quelque soit le principe adopté les réfrigérants humides peuvent être à tirage naturel, créé par de hautes tours, ou à tirage artificiel par ventilateurs qui, alors, ne nécessitent pas de hautes tours.

incidence des réfrigérants atmosphériques sur le climat local

L'entraînement de gouttelettes d'eau par le courant d'air dû au tirage (primage) qui provoquait autrefois de faibles précipitations et même parfois — mais très localement — du verglas sur les routes, au voisinage de la tour, est supprimé dans les réfrigérants modernes ; en effet, les techniques actuelles assurent un débit de primage inférieur à 0,005 % du débit total de l'eau refroidie, soit environ 2 kg/s pour une tranche de 1 000 MW. En conséquence, les risques de précipitations directes sont supprimés.

Il faut noter en outre que les précipitations induites du fait du rejet de grandes quantités de vapeur d'eau dans l'atmosphère sont pratiquement impossibles. En effet, le débit d'alimentation naturelle d'un cumulus précipitant est beaucoup plus grand que le débit de vapeur d'eau dû aux réfrigérants, même pour

un ensemble de 4 tranches de 1 000 MW (le débit sortant de tels réfrigérants serait de l'ordre de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, alors que l'alimentation d'un cumulo nimbus se chiffre en centaines ou milliers de m^3/s).

Les panaches de condensation qui s'échappent des réfrigérants sont surtout l'objet de reproches d'ordre esthétique et de réduction par ombre portée de l'ensoleillement.

Des études sont entreprises sur la forme, les dimensions et les risques d'occurrence de tels panaches sur les sites des centrales : la forme et les dimensions d'un panache de condensation dépendent de la température de l'humidité et de la stabilité (gradient thermique vertical) de l'air ainsi que de la vitesse du vent. Les panaches apparaissent surtout le matin ou le soir, à l'automne et au printemps. La réduction du rayonnement solaire dans les zones intéressées est inférieure à quelques heures par an de plein ensoleillement.

les études d'environnement entreprises

Les études du milieu naturel soumis à l'influence des rejets thermiques commencent au niveau de la recherche des sites. Elles consistent en études hydrodynamiques et hydrologiques.

Un premier inventaire des caractéristiques écologiques est dressé afin de rendre compte de la sensibilité du site.

Au stade du projet, des études écologiques très complètes sont engagées sur le terrain.

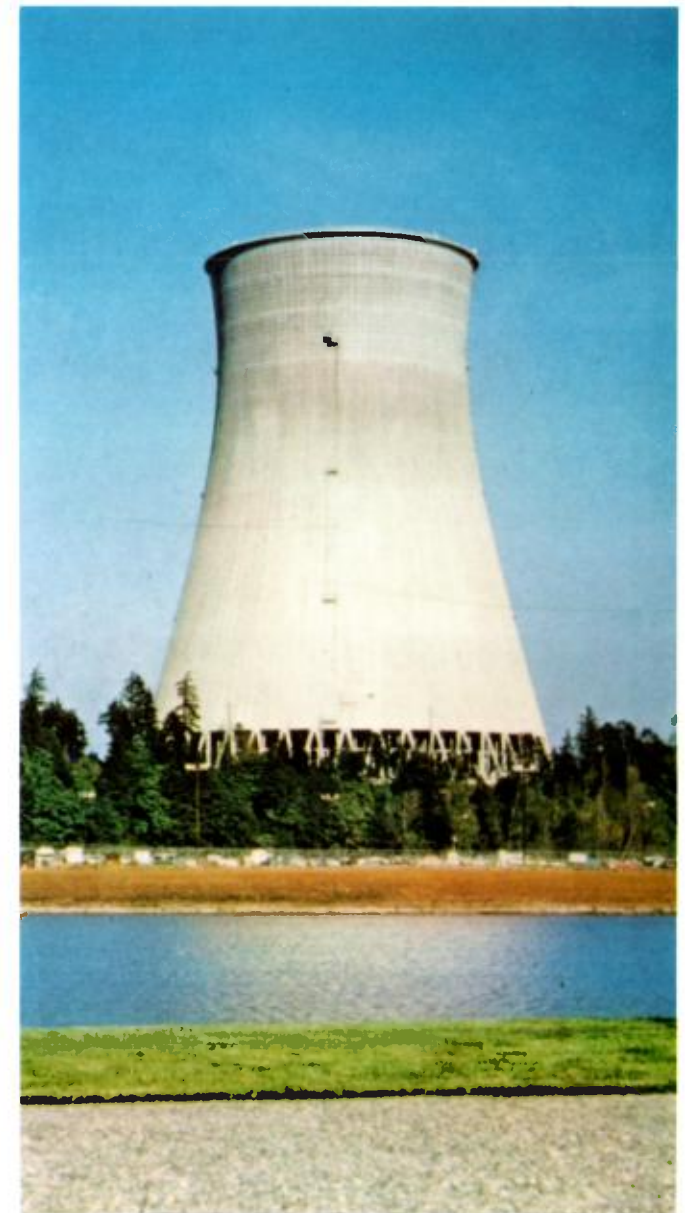
Deux objectifs essentiels sont recherchés par ces études qui comportent des campagnes de mesure « in situ » et des expériences de laboratoire :

- Etablir un inventaire quantitatif et qualitatif des espèces (plancton, poissons, algues), afin de disposer d'un état de référence auquel se rapporteront les évolutions observées durant le « suivi-écologique de la centrale ».
- Etablir, par des bilans de production primaire et secondaire, les ordres de grandeur des impacts des rejets sur les stocks d'organismes vivants et leur équilibre.

Pour cela des relevés seront effectués en différents points du panache thermique, sur le fond de la mer, en divers niveaux, en surface et ce autant de fois qu'il sera nécessaire pour suivre l'évolution des espèces et ceci plus spécialement au printemps.

Les relevés sur une année ne suffiront pas car il existe des fluctuations interannuelles dues principalement aux conditions atmosphériques. Les relevés permettront de connaître la qualité des eaux, leur peuplement ainsi que la composition des fonds (sédiments et benthos). Ces relevés seront poursuivis quand la centrale sera en fonctionnement et les données comparées.

De telles méthodes ont déjà été employées en Grande-Bretagne. Aucune différence significative n'a été décelée bien que les eaux souvent polluées par des industries locales aient été soumises à des échauffements comparables à ceux envisagés à l'avenir.



Tour de réfrigération pour centrale de 1 200 MW aux U.S.A.

ESTHETIQUE ET CENTRALES NUCLEAIRES



R. et A. Bourdon
Esquisse de la centrale de Gravelines.



Maquette de la centrale de Dampierre-en-Burly.



Esquisses de centrales nucléaires
par Claude Parent, architecte.



récupération des calories

La récupération des calories dissipées dans les rivières, dans la mer et dans l'atmosphère à l'occasion de la condensation de la vapeur des grandes centrales électriques fait actuellement l'objet de nombreuses études. Electricité de France y participe dans le cadre de la campagne menée pour économiser l'énergie. Les quantités de calories dissipées sont très largement supérieures aux utilisations que l'on peut en faire sur le plan local aussi bien dans le domaine de l'agriculture que du chauffage domestique et industriel.

Ce qui limite le réemploi de ces calories c'est le bas niveau de température auquel elles sont fournies.

En effet dans le cadre d'une réfrigération en circuit ouvert les eaux sont réchauffées de 12 à 15° pendant leur passage dans les tubes du condenseur. Par contre en cas de réfrigération en circuit fermé sur tours de réfrigération l'eau avant dispersion dans les tours atteint 25 à 35° selon les conditions atmosphériques et les conditions d'exploitation.

Enfin on peut envisager des solutions mixtes où l'eau rejetée serait revalorisée par une augmentation de sa température soit par des pompes à chaleur soit par un réchauffage par de la vapeur soutirée avant ou après son utilisation dans la turbine.

Ceci conduit en fonction des différents niveaux de température à toute une gamme d'utilisations possible.

Les faibles échauffements de l'ordre de 10° peuvent être utilisés en aquaculture. Des expériences de croissance accélérée sont en cours sur plusieurs espèces et semblent donner des résultats satisfaisants. Mais les laboratoires souhaitent aussi reproduire le cycle complet de la croissance et non pas seulement accélérer une étape.

Les échauffements de 25 à 35° correspondent aux besoins de l'agriculture. Dans ce domaine de nombreuses expériences sont en cours certaines même à l'échelle suffisamment grande pour que l'on puisse envisager non seulement la faisabilité mais aussi l'économie du procédé.

Parmi les expériences en cours notons à Cadarache le chauffage du sol par tuyaux enterrés, l'irrigation en eau chaude de plantations forestières.

En Alsace il s'agit de mettre au point un arrosage en eau chaude pour développer des rideaux de verdure.

Le chauffage des serres, surtout depuis l'augmentation du prix du fuel-oil peut être assuré économiquement avec l'eau chaude des centrales sur réfrigérant.

Divers procédés ont été mis au point notamment à Grenoble par le CEA. Mais l'expérience la plus spectaculaire est celle qui se développe à Saint-Laurent-des-Eaux où 3 000 m² de serres sont chauffées à partir des rejets thermiques de la centrale.

Dans le domaine agro-industriel on peut citer le séchage des céréales pour lequel plusieurs expériences sont en cours.

Le chauffage des locaux d'habitation nécessite soit de la vapeur soit de l'eau chaude à température plus élevée.

Il est donc nécessaire de revaloriser les calories des rejets thermiques en portant la température de l'eau à plus de 50° sur le lieu de l'utilisation (chauffage par plancher) et 80° (chauffage par radiateur), au moyen de pompes à chaleur.

Si à la centrale on ne dispose pas d'eau à 30 °C on procède à un réchauffage par soutirage de vapeur.

Dans le domaine industriel c'est généralement la vapeur qui est demandée à des niveaux de pression et de température très variables. Ces besoins ne peuvent être satisfaits que par soutirage de vapeur en aval de la turbine ou si nécessaire en amont.



Serres de Saint-Laurent-des-Eaux.

conclusion

A une époque où l'on se préoccupe tant des problèmes de pollution, il faut savoir que, grâce au développement des applications diverses de l'électricité, la production de celle-ci à partir de l'énergie nucléaire permettra de réduire, dans des proportions importantes, la pollution due aux foyers industriels et domestiques ainsi qu'aux centrales brûlant du charbon ou du fuel-oil et, qui sait? peut-être même aux automobiles. En effet, ces installations font appel à des combustibles dont l'utilisation entraîne le rejet dans l'atmosphère d'une grande quantité de poussières et de produits toxiques, alors que l'énergie nucléaire crée une petite quantité de produits qui, s'ils sont dangereux, peuvent par contre être **facilement rassemblés et stockés** pendant le temps nécessaire pour les rendre inoffensifs; on évite ainsi cet effet de dispersion et de pollution généralisée qu'accompagne le sentiment d'irresponsabilité collective qui caractérise actuellement les pollutions chimiques.

Il serait infiniment dommage que le développement de l'énergie nucléaire soit mal accepté par le grand public du fait d'une mauvaise information qui, entraînant un comportement irrationnel, le conduirait à exagérer les inconvénients, qui sont minimes, et à dissimuler les avantages, qui sont très importants.

Il est certain que l'énergie électrique, surtout lorsqu'on peut la produire économiquement, est un facteur important d'élévation du niveau de vie; cela est si vrai que l'on mesure souvent le degré de développement économique d'un pays par sa consommation d'électricité par habitant.

L'homme ne saurait plus admettre d'être l'esclave de travaux pénibles; son génie inventif lui a permis de leur substituer la machine mais celle-ci est consommatrice d'énergie.

Pour répondre à l'augmentation constante de la consommation d'énergie, certains pays peuvent encore faire appel à l'hydraulique, mais le plus grand nombre, et notamment la France, ne disposent que de l'alternative suivante :

■ ENERGIE THERMIQUE REPOSANT SUR LA COMBUSTION DU CHARBON ET SURTOUT DE FUEL-OIL ENTRAINANT UNE POLLUTION ATMOSPHERIQUE CROISSANTE ET SUJETTE AUX ALEAS ECONOMIQUES ET POLITIQUES.

■ ENERGIE NUCLEAIRE, QUI DANS L'IMMEDIAT MET L'HUMANITE A L'ABRI D'UNE PENURIE D'ENERGIE ET QUI A L'AVANTAGE D'UNE MEILLEURE PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT.

Cette plaquette, réalisée pour Electricité de France, a été éditée par Sodel, d'après la maquette de Gallian Saint-Clair. Juin 1975.

Photographies : couverture, P. Bérenger ; page 2, Photothèque E.D.F. : P. Bérenger, L. Coirier, G. Ehrmann ; p. 14, Framatome ; p. 20, Commissariat au Tourisme ; p. 23, De Broca, Studios Villeurbannais ; p. 27, Mammy ; p. 28, P. Hodbert ; p. 31, L. Coirier, Gibbs and Hill ; pp. 32 et 33, La Photothèque, Studios Villeurbannais, M. Crépin ; p. 36, F. Lazennec ; p. 37, C.E.A. ; p. 40, Roux ; p. 45, J. Pilté, M. Morceau ; p. 47, Techniques des fluides, R.E. Tours.

L'ENVIRONNEMENT SE PROLONGE AUSSI DANS VOTRE MAISON



PRINTED IN FRANCE