

Jean-Pierre Hutin
Préface de Laurent Stricker

Durée de vie d'une centrale nucléaire

Jean-Pierre Hutin, *Durée de vie d'une centrale nucléaire*, Paris, Presses des Mines, collection Énergie et développement durable, 2024.

© Presses des MINES - TRANSVALOR, 2024
60, boulevard Saint-Michel - 75272 Paris Cedex 06 - France
presses@mines-paristech.fr
www.pressesdesmines.com

ISBN: 978-2-38542-606-4
Dépôt légal: 2024
Achevé d'imprimer en 2024 (Paris)

Photo de couverture: © EDF, Thomas D'Aram de Valada, *Piscine réacteur pendant le remplacement du combustible à la centrale de Nogent-sur-Seine*.

Cette publication a bénéficié du soutien de l'Institut Carnot M.I.N.E.S.

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et d'exécution réservés pour tous les pays.

Durée de vie d'une centrale nucléaire

Jean-Pierre Hutin

Durée de vie d'une centrale nucléaire

Préface de Laurent Stricker

Table des matières

PRÉFACE	13
AVANT-PROPOS	15
AVERTISSEMENT	17
CHAPITRE 1 - LA DURÉE DE VIE... DE QUOI?	19
Une centrale nucléaire, de quoi s'agit-il exactement?.....	19
Une centrale électrique	19
Une tranche.....	20
Un parc.....	21
La réaction nucléaire et le cœur du réacteur	22
Le «combustible»	22
Le contrôle de la réaction.....	23
Les trois circuits... et le reste.....	24
Le circuit primaire.....	25
Le circuit secondaire.....	27
Le circuit de refroidissement	29
Les circuits auxiliaires, circuits de secours, circuits de sauvegarde.....	30
La production d'électricité	31
Le contrôle-commande.....	31
Les bâtiments	32
Les installations annexes	34
Les principes de la sûreté nucléaire	35
Définition et objectif.....	35
Les trois barrières	36
La défense en profondeur	36
Les redondances	36
La sûreté nucléaire, c'est la qualité.....	37
La vie quotidienne d'une tranche nucléaire.....	37
Calme et sérénité.....	37
Le combustible, ça s'use!.....	38
Les arrêts de tranche	38
CHAPITRE 2 - VOUS AVEZ DIT «DURÉE DE VIE»?	41
Ce que c'est et ce que ça n'est pas	41
Les obstacles à la poursuite du fonctionnement	41
Que dit la loi?	42
Les choix de l'exploitant	43
Pourquoi parle-t-on souvent de «40 ans»?	44

Vous avez dit «vieillessement»?	44
40 ans: une hypothèse d'études	45
Et après 40 ans?	45
Et les matériels non-remplaçables?.....	46
Quand les études se trompent... ..	46
La situation du parc français	47
Comment l'exploitant gère-t-il la durée de vie de ses centrales?.....	48
CHAPITRE 3 - L'EXCELLENCE AU QUOTIDIEN	49
Pour durer, il «suffit» d'être très bon... ..	49
Conduire en douceur.....	50
Le vieillissement: une fatalité qu'il faut savoir gérer.....	52
Comprendre les mécanismes de vieillissement	52
Vieillessement et sûreté	52
La surveillance en fonctionnement	53
Surveiller sans démonter.....	54
La maintenance conditionnelle	55
Du diagnostic au pronostic	56
La maintenance en arrêt de tranche	57
Arrêt de tranche: tout le monde sur le pont!	57
Qualité, qualité et encore qualité.....	59
La préoccupation «durée de vie».....	59
Commencer dès le premier jour... ..	59
Objectif «60 ans au moins»	60
L'imagination au service de la durée de vie	60
La collecte des données.....	60
Du papier à l'écran	61
Le retour d'expérience (REX).....	61
L'analyse des événements.....	62
Mais au fait, qu'appelle-t-on «événement»?!	62
Tirer aussi les leçons de ce qui va bien	63
Aller voir chez les autres	64
CHAPITRE 4 - LA GESTION DE LA DURÉE DE VIE DES MATÉRIELS.....	65
De quels matériels parle-t-on?.....	65
Essayons de faire le tri... ..	65
«Petits» matériels à remplacement fréquent	67
Éviter les urgences	67
«Petits» matériels à remplacement peu fréquent	68
Viser juste pour le stock.....	69
Rénovation/remplacement des «gros» composants	70
De quels composants parle-t-on?	70
Des prévisions à 10 ans au moins	71

Et si on se trompe?.....	72
La solution tient en un mot: anticiper	72
Une stratégie pour chaque gros composant	73
Un exemple complet: les générateurs de vapeur.....	75
Conception	75
Retour d'expérience.....	77
Maintenance	78
Politique de remplacement des GV.....	79
Quelques autres exemples.....	81
Les tuyauteries primaires.....	81
Les turbines.....	83
Le contrôle-commande.....	85
Avant de clore ce paragraphe.....	89
Le stockage des pièces de rechange	89
Les conditions de stockage.....	89
L'obsolescence réglementaire	90
La localisation des stocks	90
Une stratégie globale au niveau de la tranche	91
Les effets croisés.....	91
Les modèles et méthodes d'aide à la décision.....	92
Des outils qui aident... mais c'est à vous de décider!.....	93
Une stratégie globale au niveau «parc».....	94
CHAPITRE 5 - LES COMPOSANTS NON REMPLAÇABLES	95
La cuve.....	95
Conception et construction.....	95
Problèmes courants rencontrés en exploitation.....	96
La fragilisation par irradiation	97
Conclusion	100
Le bâtiment réacteur (ou enceinte de confinement).....	101
Conception	101
Problèmes potentiels communs à toutes les tranches.....	103
Cas des tranches 900	103
Problèmes spécifiques des tranches 1 300 et 1 450	104
Conclusion	104
CHAPITRE 6 - LES ARRÊTS ET LES RÉEXAMENS DÉCENNAUX	105
Pourquoi tous les dix ans?	105
Le contenu d'un arrêt décennal en bref	106
Inspections et contrôles approfondis.....	107
Deux exemples	107
Épreuve hydraulique du circuit primaire.....	108
Le réexamen périodique et son volet «sûreté».....	109
Le principe.....	110

Le volet «Sûreté nucléaire»	110
Quelques exemples d'intégration du retour d'expérience.....	112
Pourquoi attendre les décennales?	114
Maintenance lourde et modifications non liées à la sûreté	116
Conclusions.....	117
CHAPITRE 7 - LA PÉRENNITÉ DU SUPPORT INDUSTRIEL.....	119
Un avenir incertain.....	119
Les fabricants de composants	121
Les «gros» composants	121
Les «petits» matériels	123
Les fournisseurs de services	125
Corrigeons d'abord les idées reçues	125
La crise et la charte de progrès	126
Prestataires et partenaires.....	127
Ré-internaliser?.....	128
L'obsolescence.....	130
Attention, cela ne touche pas que le numérique!	131
Alors que faire?	132
L'observatoire de la pérennité des industriels.....	132
Conclusions.....	133
CHAPITRE 8 - COMPÉTENCES ET CONNAISSANCES :	
ACTIONS EN SUPPORT	135
Compétences et formation.....	135
Documentation et systèmes d'information.....	136
Veilles	138
Les fiches d'analyse du vieillissement	138
Les observatoires	138
Recherche et développement (R&D).....	139
CHAPITRE 9 - AUTRES OBSTACLES À LA POURSUITE DE L'EXPLOITATION	143
Évolutions des exigences réglementaires	143
Environnement des centrales.....	145
Aspects économiques	145
Dépenses d'exploitation et de maintenance courante	146
Dépenses de maintenance lourde.....	146
Dépenses de combustible	147
Conclusion.....	147
Acceptabilité du nucléaire.....	148
Impact environnemental.....	149
Gestion des déchets radioactifs	150
Impact socio-économique.....	151

Risque d'accident	151
Transparence et démocratie	152
CHAPITRE 10 - ET AILLEURS, QUE FONT-ILS ?	153
Le parc nucléaire mondial	153
Les exploitants	155
Aspects réglementaires	156
Sûreté constante ou sûreté croissante?	157
La maîtrise du vieillissement	158
Les stratégies industrielles	160
Les causes d'arrêt définitif	161
La coopération internationale	162
Le rôle des organismes internationaux	162
Les échanges bilatéraux entre exploitants	164
La coopération en R&D	164
CHAPITRE 11 - POUR CONCLURE...	167
Évolution des indicateurs globaux	167
Conclusions générales	169
GLOSSAIRE	171
REMERCIEMENTS	177

L'accès à l'énergie est, avec la gestion des ressources en eau et la sécurité alimentaire, un enjeu majeur du XXI^e siècle. Le recours à l'énergie nucléaire, à côté de l'utilisation des énergies renouvelables, fait partie des solutions à condition que celle-ci soit sûre et durable. De très nombreux pays ont inclus le nucléaire dans ce qu'on appelle leur mix énergétique, que ce soit aux États-Unis, disposant d'un «parc de réacteurs» depuis plusieurs décennies, en Asie, ou en Europe. Dès lors se pose très vite la question de la «durée de vie» des installations: combien d'années peut-on exploiter en toute sûreté une centrale nucléaire? Et de quelle durée parle-t-on? Celle de l'amortissement de l'investissement? De la longévité des éléments techniques? Que font les autres pays? Le dicton populaire dit qu'on a l'âge de ses artères: mais quelles sont les artères d'une installation nucléaire? On se doute que de nombreux composants peuvent être remplacés, «rajeunissant» ainsi la centrale, à l'image du couteau de Jeannot dont on change une fois la lame, une autre fois le manche et qui reste pourtant le couteau de Jeannot! On verra dans cet ouvrage qu'en effet, hormis la cuve d'acier du réacteur et l'enceinte de confinement en béton, tous les autres composants peuvent être remplacés. Alors, que faut-il faire pour maîtriser au mieux le «vieillessement»?

La maintenance d'une installation nucléaire concerne aussi bien les pompes de plusieurs MW, les moteurs diesels de secours, les câbles et appareillages électriques, la robinetterie, les composants électroniques, les énormes turbo-alternateurs de 900, 1 300 ou 1 450 MW et bien sûr le réacteur et ses gigantesques générateurs de vapeur. Ce sont ces nombreux domaines dont nous parle Jean-Pierre Hutin, nous livrant ses années d'expérience. Jean-Pierre Hutin, spécialiste mondialement reconnu, a pendant de nombreuses années été en charge de la durée de vie des réacteurs exploités par EDF. Il est le père de nombreuses idées astucieuses – on dirait aujourd'hui innovantes – en particulier pour le contrôle et l'entretien des tubes de générateurs de vapeur. C'est lui qui est à l'origine de la politique de remplacement de ces appareils «à bon escient», c'est-à-dire ni trop tôt ce qui occasionnerait de lourdes dépenses et des arrêts de production inutiles, ni trop tard sous peine d'arrêter l'installation sur défaillance technique. Tout cela sous l'œil attentif de l'Autorité de sûreté nucléaire.

L'ouvrage de Jean-Pierre Hutin apporte un éclairage complet et objectif sur cette importante question d'un approvisionnement énergétique durable et non émetteur de gaz à effet de serre, pour le monde en général et la France en particulier.

Laurent Stricker

Ancien directeur de la production nucléaire d'EDF,
Ancien Chairman de la World Association of Nuclear Operators.

Avant-propos

Le choix d'une politique énergétique revient aux citoyens et à leurs élus, ce qui peut aller jusqu'à la décision de fermer ou non des centrales électronucléaires. Mais avant de prendre une orientation, il y a des éléments objectifs qu'il est bon de connaître. C'est ce que je veux présenter ici: pour quelle durée les centrales ont-elles été construites? Quelles sont les menaces techniques ou non-techniques qui pourraient empêcher de poursuivre leur fonctionnement? Comment faire face à ces menaces? Comment faire pour gérer au mieux le vieillissement des matériels et, dans le même temps, accroître le niveau de sûreté nucléaire? Quelles sont les options possibles? Quelles solutions l'exploitant met-il en œuvre et avec l'aide de qui? Quelles sont les données technologiques, économiques, sociales et industrielles à prendre en compte pour faire les meilleurs choix?

Mon intention n'est pas de prêcher une doctrine ou de défendre une politique, ni même de convaincre qui que ce soit de quoi que ce soit. Mais simplement de fournir des informations et des explications objectives, des faits avérés, des constatations qui relèvent de la science, des éléments solides et démontrables, ce que l'on pourrait appeler la partie tangible du débat. Sur ces bases, chacun pourra se faire une «opinion».

Vous trouverez peut-être que je manque d'ambition, vous me reprocherez peut-être de fuir le débat d'idées... Mais je préfère me limiter à parler de ce que je connais... et j'en vois bien d'autres qui devraient faire pareil! Cela dit, il m'arrivera d'apporter des éléments historiques dont je garantis l'authenticité parce que je les ai vécus moi-même, mais je conçois que d'autres aient pu les vivre autrement. Je m'attacherai donc à vous alerter sur leur caractère plus subjectif.

Bien des informations et des explications fournies sont valables pour n'importe quelle centrale électronucléaire ou presque. Mais je parlerai surtout du parc des centrales françaises et de la façon dont l'exploitant EDF le gère dans la durée, en tenant compte de ses spécificités, à savoir sa taille et sa standardisation.

Et que les non-scientifiques ne s'affolent pas, toutes ces choses peuvent être expliquées de façon très simple. C'est, en tout cas, ce à quoi je vais m'employer.

Avertissement

Vulgariser, c'est forcément simplifier. J'ai donc omis de nombreux détails, j'ai fait des raccourcis parfois audacieux... mais je pense ne pas avoir trahi l'esprit et le sens des choses. Que les experts ne perdent pas trop de temps à m'expliquer que la réalité est beaucoup plus compliquée: oui, je le sais, mais mon intention n'est pas que mes lecteurs deviennent des savants. Je souhaite seulement leur expliquer à grands traits les tenants et aboutissants de la durée de vie des centrales. Ni plus, ni moins.

Comme dans tous les secteurs de la vie, les professionnels du nucléaire utilisent un jargon qui leur est propre, avec des subtilités changeantes et des effets de mode. Ainsi une même activité réalisée dans une centrale peut porter des noms différents selon l'époque ou selon l'organisme qui en est chargé (les organismes eux-mêmes changeant de noms fréquemment!). Bien entendu, je ne suis pas rentré dans ces petites distinctions sans grand intérêt.

Pour me faire comprendre, il m'arrivera souvent de faire des comparaisons avec des situations de la vie courante où il est aussi question de «gérer dans la durée». Mon exemple favori est l'automobile parce qu'il est aisément compréhensible, mais rassurez-vous, je sais que la sûreté d'une centrale nucléaire représente un enjeu plus important qu'une voiture! Et pourtant, la façon dont on se pose les questions est très semblable. Il en est d'ailleurs de même pour n'importe quel objet que l'on souhaite utiliser longtemps, tout en tenant compte des risques que cela implique: les réponses apportées ne sont pas les mêmes d'un objet à l'autre, mais la façon de poser les problèmes est assez universelle. C'est tout aussi vrai avec notre propre santé, un autre exemple que je trouve très parlant.

Les mots techniques ou spécialisés sont expliqués à leur première occurrence et, pour les plus importants, repris dans le glossaire en fin d'ouvrage.

Dernière chose: si le cœur du sujet ne commence qu'au chapitre 2, c'est qu'il m'a semblé utile de rappeler d'abord de quel «objet» nous allons parler: sa conception, son fonctionnement et son exploitation. Si vous êtes familier du sujet, vous pouvez vous contenter de survoler le premier chapitre...

Une centrale nucléaire, de quoi s'agit-il exactement ?

Une centrale électrique

Une centrale électrique est une installation industrielle dans laquelle différents phénomènes physiques et différentes techniques sont mis en œuvre pour produire de l'électricité. Selon les cas, la centrale sera qualifiée de : thermique, hydraulique, solaire, éolienne, etc.

Une centrale est dite «thermique» quand on utilise de la vapeur pour faire tourner une turbine qui elle-même entraîne un alternateur qui produit l'électricité. Pour fabriquer cette vapeur, on chauffe de l'eau dans une «chaudière», soit en brûlant un combustible fossile (charbon, gaz ou fuel), soit en utilisant la chaleur dégagée par une réaction nucléaire : c'est alors que l'on parle de «centrale électronucléaire» ou, en abrégé, de centrale nucléaire¹.

Une centrale nucléaire est donc composée de deux parties distinctes :

- une partie qui est véritablement «nucléaire» et dont la fonction est de produire de la vapeur ; on l'appelle souvent «réacteur» (parce que c'est là qu'est entretenue la réaction nucléaire dont on va utiliser la chaleur) ou «chaudière» (parce que c'est un système à fabriquer de la vapeur).
- une autre partie, dite «classique» (ou «conventionnelle»), qui va utiliser cette vapeur pour faire tourner le groupe turbo-alternateur qui lui, produira l'électricité.

Ce qui différencie une centrale nucléaire d'une centrale à combustible fossile, c'est donc uniquement la façon dont on produit la chaleur qui sert à faire de la vapeur : ce qu'il advient ensuite de la vapeur et comment on l'utilise pour faire de l'électricité, c'est quasiment la même chose dans les deux types d'installation. Quant à l'entreprise qui fait fonctionner une centrale et qui l'entretient, on l'appelle généralement «l'exploitant» (il en est aussi souvent le propriétaire). C'est d'ailleurs au vu de son rôle d'exploitant des centrales françaises que «EDF» sera, dans ce livre, considéré comme un nom masculin !

1 À noter que l'on peut aussi faire tourner une turbine entraînant un alternateur, directement avec des gaz issus de la combustion d'un carburant (gazeux ou liquide) : c'est le cas des turbines à gaz.

Une tranche

Sur un même site géographique couramment appelé «centrale», il y a souvent plusieurs installations autonomes qui fonctionnent en parallèle et produisent de l'électricité indépendamment l'une de l'autre. Chacune de ces installations constitue une «tranche». Voilà pourquoi on parle de centrales à une tranche, à deux tranches, à trois tranches, etc. Or, sur un site donné, les tranches n'ont pas forcément été construites au même moment et par ailleurs, rien ne dit qu'elles «vieilliront» de la même façon. Donc, même si le mot «centrale» revient régulièrement, retenons que l'objet exploité pour faire de l'électricité, l'objet que le professionnel entretient, l'objet dont la durée de vie va nous importer, c'est une tranche.

Pour que tout cela soit plus parlant, regardons la figure 1. On y voit une centrale qui comporte deux tranches quasiment identiques, chacune étant entourée en jaune. Si on regarde celle de droite, on voit deux parties bien distinctes :

- l'une, entourée de rouge, est la partie nucléaire dont les principaux circuits sont logés dans un bâtiment cylindrique que l'on appelle «bâtiment réacteur» ou «enceinte de confinement (nous expliquerons pourquoi plus tard) ;
- l'autre, entourée en vert, est la partie classique abritée dans un bâtiment baptisé «salle des machines».



Figure 1. Une centrale comportant deux tranches nucléaires

À côté de ces deux gros morceaux, on aperçoit plusieurs petits bâtiments et des structures diverses qui abritent des systèmes auxiliaires, nucléaires ou non. Ils ne participent pas directement à la production d'électricité mais sont néanmoins indispensables. Beaucoup d'entre eux sont des systèmes de secours

qui, normalement, ne servent jamais mais qui doivent quand même rester en bon état «au cas où» (un peu comme les extincteurs dans une maison).

Un parc

En France, en 2024, il y a 56 tranches nucléaires en fonctionnement, réparties sur 18 sites (figure 2). Sur certains sites il y a deux tranches, sur d'autres il y en a quatre et un site (Gravelines) a six tranches. L'ensemble forme ce que l'on appelle le «parc» (sous-entendu «le parc de production nucléaire français»). Deux tranches, du même modèle que celles en fonctionnement, ont été fermées à Fessenheim et par ailleurs, une nouvelle tranche de type EPR est en construction sur le site de Flamanville. Sur un site, chaque tranche porte un numéro ; par exemple, les quatre tranches de Paluel sont dénommées Paluel 1, Paluel 2, Paluel 3 et Paluel 4.

Les tranches sont relativement identiques dans leur conception, elles sont toutes de type REP ce qui signifie «Réacteur à Eau sous Pression», nous verrons plus tard pourquoi. Elles diffèrent un peu par les technologies utilisées (il s'est écoulé 20 ans entre les premières et les dernières construites) ; mais surtout elles diffèrent par leur puissance électrique : il y a 32 tranches de 900 MWe chacune, 20 tranches de 1 300 MWe et 4 de 1 450 MWe (MWe est l'abréviation de «mégawatt électrique», soit un million de watts). Pour faire court, on parle de tranches 900, 1 300 et 1 450, toutes les tranches d'une même puissance formant un «palier». À ce jour, toutes les tranches nucléaires françaises ont le même exploitant, à savoir l'entreprise EDF.

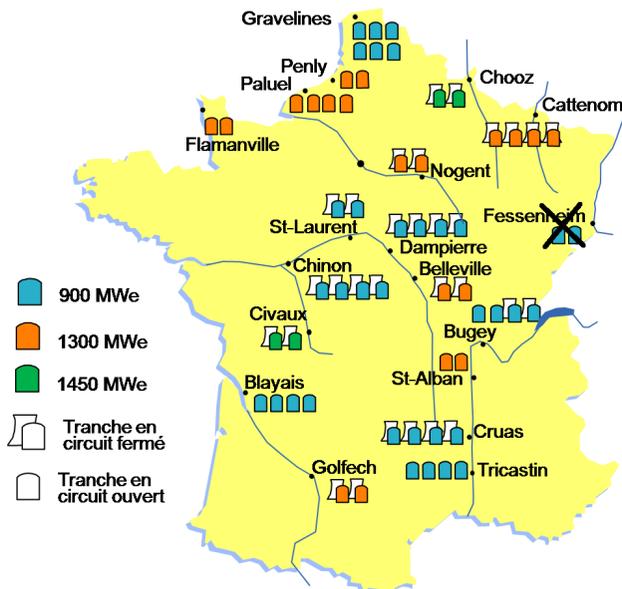


Figure 2. Les centrales nucléaires françaises en exploitation

Le parc nucléaire français est à comparer au parc nucléaire mondial : plus de 400 tranches réparties dans une trentaine de pays (les États-Unis arrivent en tête avec une centaine, mais cela représente moins de 20% de la production d'électricité du pays).

Voilà le décor planté. Plongeons maintenant au cœur de l'installation, c'est le cas de le dire...

La réaction nucléaire et le cœur du réacteur

Le combustible nucléaire est de l'uranium au sein duquel se passe une réaction. En quoi consiste-t-elle ? Pour faire simple, disons qu'une partie de cet uranium est naturellement radioactive. Cela veut dire que les atomes qui le constituent émettent spontanément des neutrons (rappelons que toute matière est faite d'atomes et qu'un atome est principalement constitué de protons et de neutrons formant un «noyau» et d'électrons qui «tournent» autour). Quand un neutron frappe le noyau d'un autre atome d'uranium, il le casse en deux, d'où le mot «fission» nucléaire. Cette fission va avoir, entre autres, deux effets intéressants : elle produit de l'énergie qui se transforme en chaleur que l'on va pouvoir utiliser et elle libère de nouveaux neutrons. Ceux-ci vont, à leur tour, percuter d'autres noyaux qui, en se cassant, vont produire de la chaleur et encore d'autres neutrons qui, à leur tour... et ainsi de suite. C'est la réaction en chaîne... qu'il ne faut pas laisser s'emballer. Pour qu'elle reste à un niveau constant, il suffit de faire en sorte que parmi les neutrons issus d'une fission, un seul aille provoquer une autre fission. Il faut donc «absorber» les autres : nous verrons plus loin les moyens dont on dispose pour ce faire.

Le « combustible »

L'uranium utilisé est de l'uranium «enrichi», c'est-à-dire que l'on a préalablement augmenté la part de la matière (on parle «d'isotope») qui est naturellement radioactive. Cet uranium (il s'agit en réalité d'oxyde d'uranium mais cela ne change rien à nos explications) se présente sous forme de petites pastilles cylindriques qui sont placées dans des tubes de 4 mètres de long et d'environ un centimètre de diamètre. Ces tubes sont appelés «crayons combustible» (parce qu'ils contiennent le combustible). La réaction nucléaire qui dégage de la chaleur a donc lieu à l'intérieur de ces crayons qui agissent comme des éléments chauffants pour l'eau qui circule autour (un peu comme la résistance dans une bouilloire électrique).

Les crayons sont regroupés par «paquets» qui forment des faisceaux de section carrée. Chacun de ces faisceaux comporte environ 260 crayons et constitue un «assemblage combustible», tel qu'on peut le voir sur la figure 3. Les crayons tiennent ensemble par un système d'embouts et de grilles qui les maintient un peu écartés pour que l'eau puisse circuler entre eux et se réchauffer à leur contact. Un tel assemblage pèse de 600 à 800 kg.

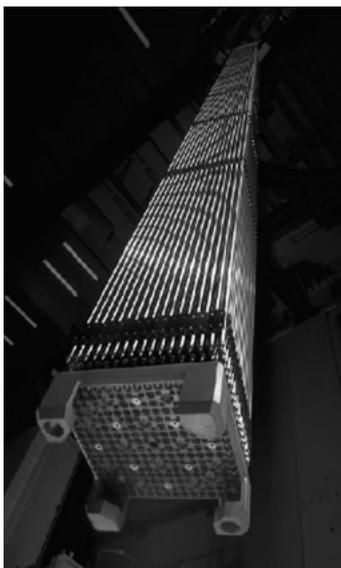


Figure 3. Un assemblage combustible

En juxtaposant 150 à 200 assemblages combustible, on forme le «cœur» qui sera placé dans un énorme récipient, la «cuve». Celle-ci est munie d'un couvercle amovible (car il faudra de temps en temps remplacer les assemblages combustible) et de tubulures par où de l'eau va entrer à une certaine température, passer dans le cœur qui dégage de la chaleur et ressortir à une température plus élevée.

Si le cœur réchauffe de l'eau, on peut aussi dire que cette eau refroidit le cœur, ce qui est indispensable pour éviter une montée en température excessive et une fusion des assemblages combustible, un accident que l'on veut éviter à tout prix.

Le contrôle de la réaction

Revenons sur le contrôle de la réaction nucléaire qui nécessite – on l'a vu – d'absorber une partie des neutrons qu'elle émet. Deux moyens pour ce faire :

- d'une part, ajouter un peu d'acide borique à l'eau qui passe dans la cuve car le bore qu'il contient est «neutrophage» (= absorbeur de neutrons) ;
- d'autre part, introduire dans le cœur, des tubes qui contiennent un matériau lui aussi «neutrophage»; ces tubes sont associés par «grappes» de 24 qui peuvent être insérées ou extraites du cœur ce qui permet d'absorber plus ou moins de neutrons, donc de ralentir ou d'accélérer la réaction et donc de contrôler la chaleur produite (d'où l'appellation de «grappes de contrôle»).

Si on a mis beaucoup de bore et/ou si les grappes de contrôle sont complètement insérées dans le cœur, la réaction s'arrête complètement. Mais attention, dans