

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 82 (1956)  
**Heft:** 22: Énergie nucléaire, fascicule no 2

**Artikel:** École polytechnique de l'Université de Lausanne: cours d'introduction à l'énergie atomique (suite et fin): divers types de réacteurs et leurs particularités  
**Autor:** Extermann, R.C.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-62089>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 26.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les quinze jours

**Abonnements:**  
Suisse: 1 an, 26 francs  
Etranger: 30 francs  
Pour sociétés:  
Suisse: 1 an, 22 francs  
Etranger: 27 francs  
Prix du numéro: Fr. 1.60  
Ch. post. « Bulletin technique de la Suisse romande »  
N° II. 57 75, à Lausanne.

Adresser toutes communications concernant abonnements, changements d'adresse, expédition à  
**Imprimerie La Concorde,**  
Terreaux 31, Lausanne

**Rédaction**  
et éditions de la S. A. du  
Bulletin technique (tirés à  
part), Case Chauderon 475  
**Administration de la S. A.**  
**du Bulletin Technique**  
Ch. de Rosneck 6 Lausanne

Organe de la Société suisse des ingénieurs et des architectes, des Sociétés vaudoise et genevoise des ingénieurs et des architectes, de l'Association des Anciens élèves de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne et des Groupes romands des anciens élèves de l'Ecole polytechnique fédérale.

Comité de patronage — Président: R. Neeser, ingénieur, à Genève; Vice-président: G. Epitoux, architecte, à Lausanne; Secrétaire: J. Calame, ingénieur, à Genève — Membres, Fribourg: MM. H. Gicot, ingénieur; M. Waeber, architecte — Vaud: MM. A. Gardel, ingénieur; A. Chevalley, ingénieur; E. d'Okolski, architecte; Ch. Thévenaz, architecte — Genève: MM. Cl. Grosgrain, architecte; E. Martin, architecte — Neuchâtel: MM. J. Béguin, architecte; R. Guye, ingénieur — Valais: MM. G. de Kalbermatten, ingénieur; D. Burgener, architecte.

Rédaction: D. Bonnard, ingénieur. Case postale Chauderon 475, Lausanne.

Conseil d'administration  
de la Société anonyme du Bulletin technique: A. Stucky, ingénieur, président;  
M. Bridel; G. Epitoux, architecte; R. Neeser, ingénieur.

## Tarif des annonces

1/1 page	Fr. 264.—
1/2 »	» 134.40
1/4 »	» 67.20
1/8 »	» 33.60

**Annonces Suisses S. A.**  
(ASSA)



Place Bel-Air 2. Tél. 22 33 26  
Lausanne et succursales

**SOMMAIRE:** Cours d'introduction à l'énergie atomique: *Divers types de réacteurs et leurs particularités*, par R.-C. EXTERMANN, professeur à l'Université de Genève; *Certaines actions physiques des radiations*, par R. MERCIER, professeur à l'E.P.U.L.; *Théorie de la séparation des isotopes*, par P. DE HALLER, directeur des Services scientifiques de Sulzer Frères, Winterthur; *Transmission de chaleur et cycles thermiques dans la centrale atomique*, par W. TRAUPEL, professeur à l'E.P.F., Zurich; *Les réacteurs expérimentaux*, par JACQUES LALIVE D'EPINAY, ingénieur E.P.F., S. A. Brown Boveri & Co, Baden. — Association suisse des électriciens et Union des centrales suisses d'électricité: *Assemblées générales du 6 octobre, à Soleure*. — **DIVERS:** *L'eau et l'eau usée*. — **CARNET DES CONCOURS.** — **AVIS A NOS ABONNÉS.** — **SERVICE DE PLACEMENT.** — **DOCUMENTATION GÉNÉRALE.** — **INFORMATIONS DIVERSES.**

## ECOLE POLYTECHNIQUE DE L'UNIVERSITÉ DE LAUSANNE COURS D'INTRODUCTION A L'ÉNERGIE ATOMIQUE

(Suite et fin)<sup>1</sup>

### DIVERS TYPES DE RÉACTEURS ET LEURS PARTICULARITÉS

par R. C. EXTERMANN, professeur à l'Université de Genève

Le fonctionnement d'une réaction en chaîne produit dans un réacteur divers effets dont on peut tirer parti:

1. Un flux de neutrons incomparablement plus intense que celui d'aucune autre source.
2. La création de produits divers: résultats des captures de neutrons.
3. Un dégagement de chaleur extraordinairement puissant et concentré.

Suivant les cas, on peut s'intéresser plus à un de ces aspects qu'à un autre; mais les trois effets sont toujours liés.

On distinguera donc:

1. Les réacteurs expérimentaux, où l'accent est mis sur l'intensité du flux de neutrons et l'utilisation

de ce flux pour des recherches et des transmutations.

2. Les convertisseurs destinés à la production de matière fissile.
3. Les réacteurs de puissance, dans lesquels on s'efforce de réaliser les meilleures conditions pour la conversion en énergie mécanique de l'énergie thermique produite dans le système.

#### 1. Réacteurs expérimentaux

Quand on calcule un réacteur expérimental, on désire disposer d'un flux important de neutrons pour en étudier les effets et les propriétés ou pour préparer des isotopes radioactifs par irradiation de substances qui capturent des neutrons. De toutes façons les neutrons utilisés pour des transmutations ou des expériences

<sup>1</sup> Voir *Bulletin technique* du 13 octobre 1956.

sont perdus pour le système ; un réacteur d'essai doit posséder un excès de réactivité pour équilibrer la perte de réactivité due aux absorptions parasites et aux fuites de neutrons consécutives à ce qu'on pourrait appeler la mise en perçe du réacteur.

Un excès de réactivité<sup>1</sup> doit être prévu pour permettre de compenser encore divers autres effets : la table I en énumère les principaux.

TABLE I  
*Excès de réactivité nécessaires au fonctionnement d'un réacteur*

Effet à compenser	Réactivité nécessaire	
	Réacteur de basse puissance	Réacteur de haute puissance
Température . . . . .	0,004	0,008
Epuisement du combustible . . . . .	0,002	0,035
Empoisonnement { équilibre . . . . .	0,005	0,050
départ après interruption . . . . .	—	0,050
Production d'isotopes . . . . .	0,020	0,020
Marge de fonctionnement . . . . .	0,003	—
Total	0,034	0,163

L'effet désigné sous le nom d'empoisonnement mérite une remarque spéciale. Parmi les produits de fission de l'uranium 235, le Xénon,  $\text{Xe}^{135}$  est particulièrement gênant à cause de sa section de capture importante pour les neutrons thermiques ( $3,5 \cdot 10^6$  barns). Il se forme, à partir d'un précurseur, l'iode  $\text{I}^{135}$ , formé lui-même en grande quantité (6 %) directement dans les fissions.

La variation de la quantité de Xénon dans le réacteur est intéressante à étudier, elle dépend de l'équilibre entre la production et la disparition de cet isotope (fig. 1).

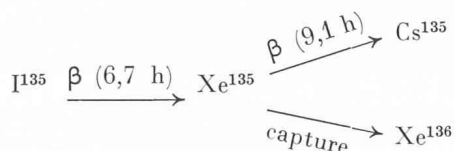


Fig. 1. — Schéma de désintégration de l'iode 135.

Dans les chaînes d'émissions  $\beta$  par lesquelles les fragments de fission se débarrassent de leur excès de neutrons, le rapport des concentrations aux divers échelons est en général égal au rapport des vies moyennes, comme dans les familles radioactives, et ne dépend en particulier pas du flux  $\Phi$  dans le réacteur. La situation est différente dans la chaîne qui commence par l'iode 135, parce que le xénon 135 formé possède dans le réacteur en fonctionnement deux modes de désintégration : la capture d'un neutron ou l'émission  $\beta$ , tandis qu'en l'absence d'un flux de neutrons seule l'émission  $\beta$  peut

se produire. Il en résulte que la concentration d'équilibre est moins élevée pendant le fonctionnement du réacteur qu'après une interruption de marche : quand celle-ci se produit, la concentration du xénon se met à augmenter et n'atteint qu'au bout de onze heures un maximum d'autant plus élevé que le flux avant l'arrêt était plus intense. C'est cette accumulation d'un isotope particulièrement absorbant qu'on désigne sous le nom d'empoisonnement ; elle se résorbe très lentement et ce n'est parfois qu'après deux jours ou davantage que l'excès de réactivité disponible est suffisant pour remettre le réacteur en marche (fig. 2).

Dans un réacteur fonctionnant à un niveau de  $10^{19} \frac{\text{neutrons}}{\text{m}^2 \text{ s}}$  il faudrait, pour surmonter l'empoisonnement consécutif à une interruption de service une réserve de réactivité de 2,5. Une telle réserve est évidemment irréalisable : le phénomène de l'empoisonnement est celui qui impose la limite la plus sévère aux flux réalisables aujourd'hui.

## 2. Convertisseurs

Quand un neutron est absorbé dans de l'uranium  $\text{U}^{235}$ , il donne en moyenne un peu plus de 2 neutrons (quelle que soit l'énergie du neutron qui provoque la fission). Un neutron est nécessaire pour entretenir la réaction en chaîne, il en reste donc un au moins pour d'autres buts.

Plutôt que de les perdre dans des absorptions inutiles, on peut s'efforcer de diriger la plus grande partie des neutrons en excès dans  ${}_{92}\text{U}^{238}$  ou  ${}_{90}\text{Th}^{232}$ , matières dites fertiles : la capture d'un neutron suivie de deux émissions  $\beta$  transforme ces noyaux en  ${}_{94}\text{Pu}^{239}$  et  ${}_{92}\text{U}^{233}$ , matières fissiles.

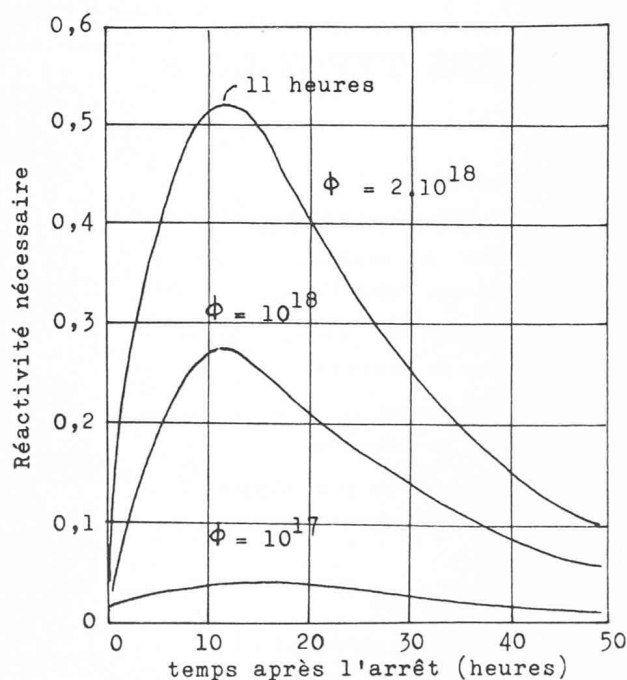


Fig. 2.

<sup>1</sup> La réactivité  $\rho$  d'un réacteur est définie à partir du facteur effectif de multiplication  $k_{\text{eff}}$  par l'équation

$$\rho = k_{\text{eff}} - 1.$$

*Rendement de conversion*

On appelle conversion cet échange d'une matière fissile ( $U^{235}$ ) contre une autre ( $Pu^{239}$  ou  $U^{233}$ ) et on définit un *rendement de conversion*, rapport du nombre d'atomes fissiles produits au nombre d'atomes fissiles détruits.

Pour  $U^{235}$  ( $\nu = 2,1$ ), le maximum possible du rendement de conversion est :

$$\frac{2,1 - 1}{1} = 110 \, \%$$

Fixons un ordre de grandeur de la production possible : au niveau de 1 megawatt, un réacteur convertisseur où l'économie de neutrons est bien réglée fournirait 1,1 gramme de  $Pu^{239}$  par jour (en consommant 1,0 gramme de  $U^{235}$ ).

Quel avantage peut-on trouver à transformer ainsi une matière fissile en une autre ? L'idée au début était d'isoler une matière fissile : la séparation de  $U^{235}$  dans des appareils de diffusion gazeuse est un procédé sûr mais lent, il est basé sur la faible différence de vitesse des atomes d'hexafluorure d' $U^{235}$  (poids moléculaire 349) sur ceux d'hexafluorure d' $U^{238}$  (poids moléculaire 352) : cette différence n'est que de 0,04 %.

On pouvait penser que la tâche de séparer le plutonium de l'uranium dans lequel il est formé serait plus aisée :

En réalité il faut faire de fréquentes séparations pour éviter que le plutonium formé se détruise à son tour, les séparations chimiques sont compliquées par la présence de trente éléments différents produits par les fissions ; enfin il y a un danger toxicologique énorme qui se double du danger des rayonnements. Quoiqu'il en soit, une séparation est nécessaire si on veut des combustibles enrichis ; et si même  $U^{235}$  semble avoir la préférence aujourd'hui, nous allons voir que les deux matières fissiles artificielles  $Pu^{239}$  et  $U^{233}$  représentent la solution de l'avenir.

La seule matière fissile existant dans la nature est  $U^{235}$ . Le premier réacteur ne pouvait donc pas fonctionner avec un autre combustible.

Il y a dans l'uranium naturel 1 atome d' $U^{235}$  sur 139 d' $U^{238}$ . Quand on aura « brûlé » tout l'uranium naturel dans des réacteurs, il ne restera donc plus d' $U^{235}$ . Si l'économie de neutrons a été bonne, le combustible épuisé en  $U^{235}$  contiendra 138 atomes d' $U^{238}$  et 1 atome de  $Pu^{239}$ . A ce moment, on sera obligé d'employer  $Pu$  comme combustible : voilà pourquoi nous disions plus haut que le plutonium est le combustible des réacteurs de l'avenir.

Si le rendement de conversion est de 100 %, les stocks de matière fissile se maintiennent ; si le rendement est inférieur, ils diminuent : il ne restera en fin de compte que de l' $U^{238}$  inutilisable.

Voilà ce qui fait l'intérêt majeur des réacteurs « convertisseurs » étudiés pour une économie maximum de neutrons, avec lesquels on réalise les rendements de conversion supérieurs à 100 %.

*Couvage*

L'utilisation d'une matière fissile pour en produire une quantité supérieure à partir d'une matière fertile s'appelle *couvage*. Si ce procédé était employé d'une façon générale, il permettrait d'augmenter les stocks du monde en matière fissile.

On peut exprimer cela d'une façon précise. Soit  $\nu$  le nombre de neutrons produits par une fission, 1 de ceux-ci est nécessaire à l'entretien de la réaction en chaîne ; si  $L$  désigne le nombre de neutrons perdus ou capturés dans des réactions étrangères à notre dessein, le rendement de conversion a la valeur  $C = \nu - 1 - L$ .

Si  $N$  atomes fissiles sont consommés,  $NC$  sont régénérés aux dépens d'autres atomes de matière fertile.

Utilisés dans d'autres réacteurs du même type, ils en donneront  $NC^2$  et ainsi de suite : la quantité de matière fertile consommée est donc, après qu'on a chargé  $m$  fois le réacteur :

$$NC + NC^2 + NC^3 + \dots + NC^m.$$

Si  $C > 1$  la série est divergente, mais si  $C < 1$  elle tend vers une limite

$$\Lambda = \frac{NC}{1 - C}.$$

Pour un rendement de 90 %, on a par exemple

$$\Lambda = \frac{N \cdot 0,9}{1 - 0,9} = 9N.$$

Si donc le rendement de conversion moyen des réacteurs dans le monde n'est que de 90 %, les stocks de matière fissile seront épuisés quand on n'aura utilisé que 9 atomes de  $U^{238}$  sur les 139 qui accompagnent chaque atome de  $U^{235}$  initialement présent : l'uranium restant, qui représente les 130/139 ou les 93 % des stocks de matière fertile (sans compter le thorium), sera à tout jamais inutilisable.

Il est certainement difficile de surveiller assez étroitement toutes les fuites de neutrons et toutes les séparations chimiques pour atteindre le maximum théorique du rendement de conversion. Mais la preuve a déjà été faite dans des réacteurs expérimentaux qu'on peut, dans l'état actuel de la technique, dépasser 100 %. Le couvage est donc possible, c'est un but auquel les ingénieurs qui calculent des réacteurs doivent vouer tous leurs efforts.

**3. Réacteurs de puissance**

Dans les deux types de réacteurs que nous venons de discuter on ne se préoccupe que du flux de neutrons et de son économie : la chaleur dégagée par les réactions nucléaires dans le système est considéré comme indésirable : on s'efforce de l'éliminer le plus rapidement possible pour éviter une élévation de température qui modifierait les propriétés du milieu et pourrait endommager les charpentes. Mais il est clair qu'en procédant comme on le faisait au début de la technique des grands convertisseurs, c'est-à-dire en jetant à la

rivière voisine les calories produites dans les réacteurs, on gaspille d'énormes quantités d'énergie. A raison de 25 millions de kilowattheure par kilo de plutonium produit, on peut évaluer à plusieurs millions de francs l'énergie qui a déjà été perdue dans le fonctionnement des réacteurs.

Il est clair, aujourd'hui que les besoins d'énergie augmentent dans le monde entier, qu'il est souhaitable de chercher à utiliser l'énergie fournie par les réacteurs. Mais il ne faut jamais perdre de vue que si cette utilisation est désirable pour suppléer à d'autres sources d'énergie, elle n'a pas le caractère d'impérieuse nécessité — de devoir envers l'humanité pourrait-on dire — de la conservation des stocks de matière fissile par une économie stricte des neutrons dans les réacteurs. Ainsi dans les réacteurs de puissance, où on se soucie de cette utilisation de l'énergie libérée au cours des réactions nucléaires, la tâche principale reste la conversion. L'utilisation de l'énergie est une récupération qui ne doit jamais prendre le pas sur l'économie des neutrons. Le réacteur de puissance parfait, l'idéal auquel il faut tendre, serait un convertisseur à plus de 100 % de rendement — une couveuse — dont le dégagement de chaleur serait récupéré pour produire de l'énergie.

Ceci dit, le désir d'utiliser au mieux la chaleur produite impose au réacteur de puissance des conditions de fonctionnement toutes différentes de celles des réacteurs décrits jusqu'ici : la thermodynamique enseigne en effet que la source qui fournit la chaleur à une machine thermique doit être à une température aussi élevée que possible, si on veut un rendement acceptable.

Un grand nombre de problèmes technologiques sont liés à cette exigence de marche à haute température ; ils concernent la résistance aux rayonnements aussi bien que la résistance à la température, le choix est plus difficile que dans les machines thermiques usuelles, à cause des exigences nucléaires qui demeurent entières ; l'absorption de neutrons, en particulier, doit être aussi faible que possible. L'usage de métaux naguère peu employés pourrait devenir courant pour ces constructions : le zirconium, convenablement purifié (débarassé des traces de l'élément voisin, le hafnium) possède une section efficace très petite. L'aluminium et le magnésium sont également employés. La température de fonctionnement est limitée en définitive par un des éléments du système qu'on ne peut pas solliciter au-delà d'un certain point. Mais la température de la source chaude est nécessairement plus basse que la température du point le plus chaud du circuit d'échanges thermiques : pour assurer un débit de chaleur suffisant, on doit consentir à un gradient de température important. Les exigences du débit vont à l'encontre de celles du rendement ; la meilleure solution est ici le meilleur compromis.

Pour éviter les très hautes pressions auxquelles on devrait travailler, si on employait l'eau naturelle ou l'eau lourde comme fluide dans les circuits de refroidissement aux hautes températures qui sont désirables,

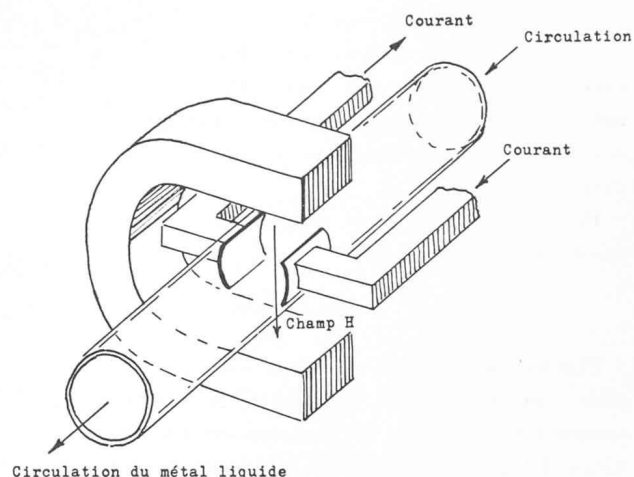


Fig. 3.

on emploie souvent un gaz ou des métaux liquides, du sodium fondu par exemple, pour lequel on a mis au point des pompes électromagnétiques très ingénieuses, sans pièces en mouvement, qui ne demandent aucun entretien, ce qui est important à cause de la radioactivité du  $\text{Na}^{24}$  formé dans le métal liquide (fig. 3).

On peut intercaler un circuit d'échange thermique contenant du mercure entre le sodium et l'eau des chaudières pour éviter tout contact entre le sodium et l'eau en cas de rupture des canalisations contenant le sodium.

Certains problèmes qui se posent quand on veut élever la température d'un réacteur relèvent de la physique nucléaire exclusivement. Ce sont ceux qui sont liés à la variation des sections efficaces avec la température, donc avec l'énergie des neutrons. On combine les résultats de cette étude avec ceux que fournit le calcul des variations du volume et de la densité des divers constituants du système pour montrer qu'en général la réactivité possède un coefficient de température négatif ; c'est une garantie bienvenue de stabilité : si le réacteur venait à s'emballer, il se modérerait de lui-même.

#### BIBLIOGRAPHIE

Il n'appartient pas au programme de cette conférence de décrire les détails techniques des machines existantes, les perfectionnements projetés ou les problèmes précis posés aux ingénieurs. Le but de cette introduction était, plus modestement, de rappeler les principales notions de physique qu'il faut connaître pour comprendre comment fonctionnent les réacteurs. Le lecteur qui désire aller plus avant dans cette étude trouvera d'utiles renseignements dans la littérature ; les quelques titres qui suivent ne représentent qu'une petite partie des ouvrages de valeur qu'il faudrait citer :

SOODAK & CAMPBELL : *Elementary Pile Theory*.

GOODMAN : *Introduction to Pile Theory*.

GLASSTONE and EDLUND : *Elements of Nuclear Reactors*.

De nombreux articles ont paru dans la revue *Nucleonics*, qu'il est utile de consulter sur ce sujet.