

Séparation des isotopes de l'uranium

Notion de puissance de séparation et d'unité de travail de séparation (UTS)*

La séparation isotopique de l'uranium, ou enrichissement, est l'opération qui consiste à augmenter sa teneur en isotope fissile 235. La principale application industrielle consiste à fournir l'uranium enrichi, combustible des réacteurs nucléaires à eau légère. Les installations réalisant cette opération, appelées cascades de séparation, portent la teneur en isotope 235 de 0,7 %, teneur de l'uranium naturel, à une teneur voisine de 3 %. La notion de puissance de séparation est destinée à fournir une mesure caractéristique de la capacité à séparer de ces installations.

La puissance de séparation est définie comme l'accroissement par unité de temps d'une fonction d'état du mélange isotopique traité. Cette notion peut être éclairée par une analogie avec une machine de compression, par exemple un groupe moto-compresseur, dans laquelle un fluide reçoit une certaine quantité d'énergie, mesurée par l'accroissement de son enthalpie. L'accroissement par unité de temps est une caractéristique de la machine, sa puissance, et est indépendante du fluide comprimé et des conditions de fonctionnement, du moins en première approximation. De même, pour mesurer la puissance de séparation, on utilise une fonction d'état dépendant de la composition du mélange, mais telle que son accroissement n'en dépende pas. Cet accroissement fournira donc une mesure caractéristique du travail de séparation réalisé et l'accroissement par unité de temps définira la puissance de séparation de l'installation.

PUISSANCE DE SEPARATION D'UN SEPARATEUR UNITAIRE.

Considérons un élément séparateur unitaire partageant un débit entrant en deux fractions de composition différente, l'une enrichie en isotope 235, l'autre appauvrie (*) :

(*) On considère des mélanges binaires, ce qui est le cas de l'uranium où les deux isotopes 235 et 238 sont très largement prépondérants.

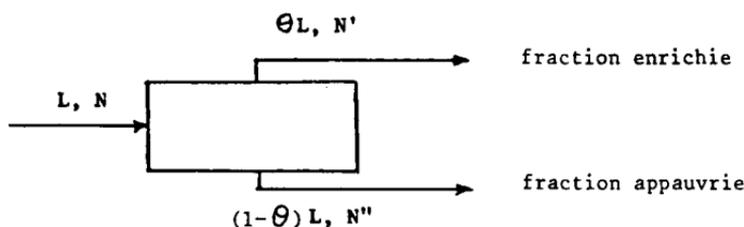


Fig. 1

Soient L le débit molaire entrant, ϑ le coefficient de partage et N, N', N'' les fractions molaires en isotope 235 respectivement à l'entrée et aux sorties riche et pauvre. Le séparateur est

dit symétrique si ϑ est égal à $\frac{1}{2}$.

Le bilan en uranium 235 du séparateur s'écrit :

$$L N = \vartheta L N' + (1 - \vartheta) L N'' \quad (1)$$

La plupart des procédés utilisés pour enrichir l'uranium sont bien représentés par une loi du type :

$$\left(\frac{N'}{1 - N'} \right) \Big/ \left(\frac{N}{1 - N} \right) = \beta = 1 + \varepsilon, \quad (2)$$

où β et ε sont deux constantes nommées respectivement facteur d'enrichissement et coefficient d'enrichissement, avec $\varepsilon \ll 1$.

Soit $V(N)$ la valeur, pour une mole de mélange, de la fonction d'état utilisée, ne dépendant que de la teneur N du mélange. La variation δU de la fonction V , créée par unité de temps dans le séparateur, est obtenue par le bilan :

$$\frac{\delta U}{\delta t} = \vartheta L \cdot V(N') + (1 - \vartheta) L \cdot V(N'') - L \cdot V(N) \quad (3)$$

En utilisant les développements limités à l'ordre 2 de $V(N')$ et de $V(N'')$ et en reportant dans l'équation (3), les termes en $V(N)$ et $dV(N)/dN$ s'éliminent. Considérant que ε est très petit devant 1, les équations (1) et (2) permettent de trouver :

$$\frac{\delta U}{\delta t} = \frac{1}{2} L \varepsilon^2 \frac{\vartheta}{1 - \vartheta} \frac{d^2 V(N)}{dN^2} [N(1 - N)]^2 \quad (4)$$

La variation $\frac{\delta U}{\delta t}$ devant être caractéristique du séparateur,

elle est indépendante des conditions opératoires et en particulier de la concentration N . La fonction V est donc telle que :

$$\frac{d^2V(N)}{dN^2} \cdot [N(1-N)]^2 = \text{Constante.} \quad (5)$$

La fonction d'état V est alors définie à une constante près par :

$$V(N) = (2N - 1) \text{Log} \frac{N}{1-N} + aN + b \quad (6)$$

La valeur des constantes d'intégration a et b est sans importance car le terme $(aN + b)$ disparaît lorsqu'on considère des variations de V , d'après les équations de bilan (1) et (2). On peut donc fixer $a = b = 0$ et avoir simplement :

$$V(N) = (2N - 1) \text{Log} \frac{N}{1-N}. \quad (7)$$

La constante de l'équation (5) est ainsi fixée arbitrairement égale à 1.

La fonction V ainsi définie est usuellement nommée « fonction de valeur » car elle intervient dans la détermination du coût de l'uranium enrichi. Sa variation par unité de temps $\frac{\delta U}{\delta t}$, qui est bien caractéristique du séparateur considéré, est nommée « puissance de séparation » :

$$\frac{\delta U}{\delta t} = \frac{1}{2} L \varepsilon^2 \frac{\phi}{1-\phi} \quad (8)$$

Pour un séparateur symétrique, on aura :

$$\frac{\delta U}{\delta t} = \frac{1}{2} L \varepsilon^2 \quad (9)$$

Cette grandeur a les dimensions d'un débit molaire. Usuellement, on considère le débit massique traité et $\frac{\delta U}{\delta t}$ est exprimé en kg d'Unités de Travail de Séparation par unité de temps (UTS/an par exemple).

Notons que, pour les faibles teneurs correspondant à l'alimentation des réacteurs à eau légère, une bonne approximation de la fonction de valeur est donnée par :

$$V(N) \simeq -\text{Log} N.$$

PUISSANCE DE SEPARATION D'UNE CASCADE.

En fait, pour réaliser les enrichissements requis pour l'uranium, il est nécessaire de répéter l'opération élémentaire dans un grand nombre de séparateurs montés en série et constituant les étages d'une cascade de séparation. Le type de montage le plus couramment adopté, représenté en fig. 2, est composé d'étages symétriques : c'est le cas que nous considérerons maintenant. La puissance de séparation d'une cascade est mesurée comme précédemment par l'accroissement de valeur du débit d'uranium traité. Si F , P , W sont respectivement les débits d'alimentation, de production enrichie, de rejet appauvri et N_f , N_p , N_w

les teneurs correspondantes, la puissance de séparation $\frac{\Delta U}{\delta t}$ de la cascade est déterminée par le bilan :

$$\frac{\Delta U}{\delta t} = P \cdot V(N_p) + W \cdot V(N_w) - F \cdot V(N_f) \quad (10)$$

Une cascade est dite idéale si elle ne comporte aux points de jonction aucun remélange de débits à des teneurs différentes. On peut montrer que cette condition est réalisée si le débit L à l'entrée de chaque étage varie avec la teneur N à l'entrée de l'étage, suivant la loi :

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{2 P (N_p - N)}{N (1 - N)} \quad \text{pour } N_f \leq N \leq N_p \quad (\text{section d'enrichissement}) \\ L &= \frac{-2 W (N_w - N)}{N (1 - N)} \quad \text{pour } N_w \leq N \leq N_f \quad (\text{section d'appauvrissement}) \end{aligned} \right\} (11)$$

On obtient ainsi une structure particulière de cascade, où le débit d'étage est maximum au niveau de l'alimentation, et plus faible au fur et à mesure que l'on se rapproche des étages d'extrémité (fig. 3).

On peut montrer que la puissance de séparation totale $\frac{\Delta U}{\delta t}$

d'une cascade idéale est égale à la somme des puissances de séparation de ses étages :

$$\frac{\Delta U}{\delta t} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} L_i \epsilon^2 = \frac{\epsilon^2}{2} \sum_{i=1}^n L_i. \quad (12)$$

Ainsi, la puissance de séparation d'une cascade idéale est proportionnelle à la somme des débits traités, et elle est donc directement reliée d'une part à l'énergie consommée, d'autre part

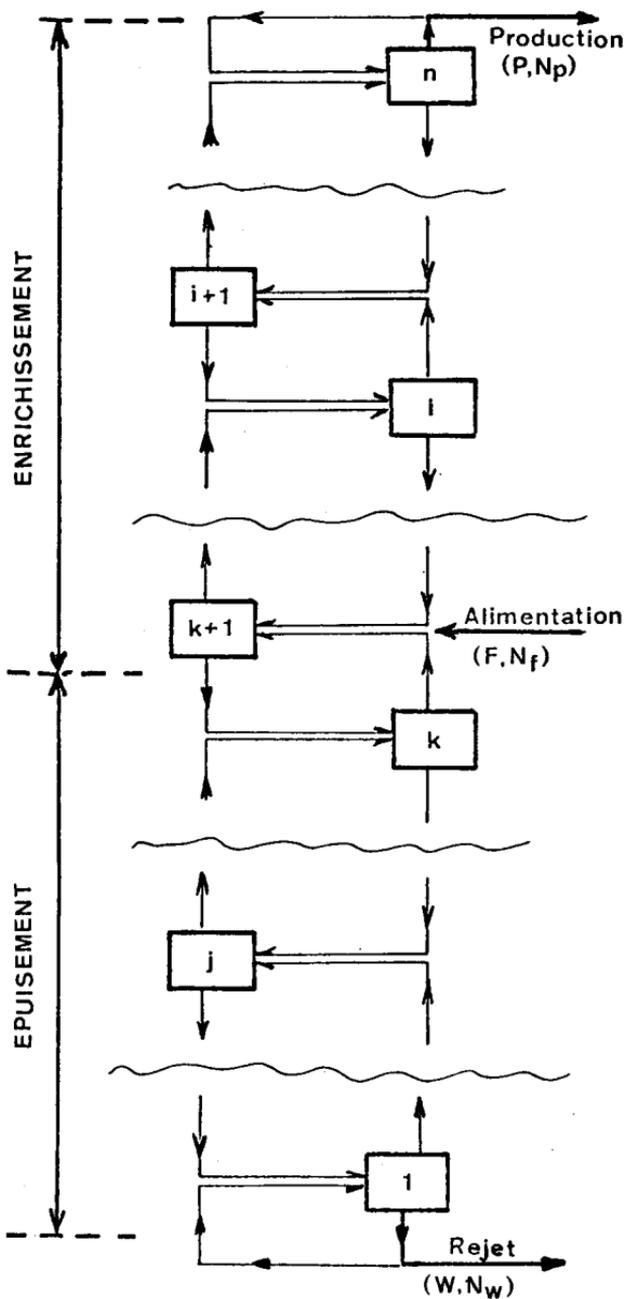


Fig. 2. — La mise en cascade.

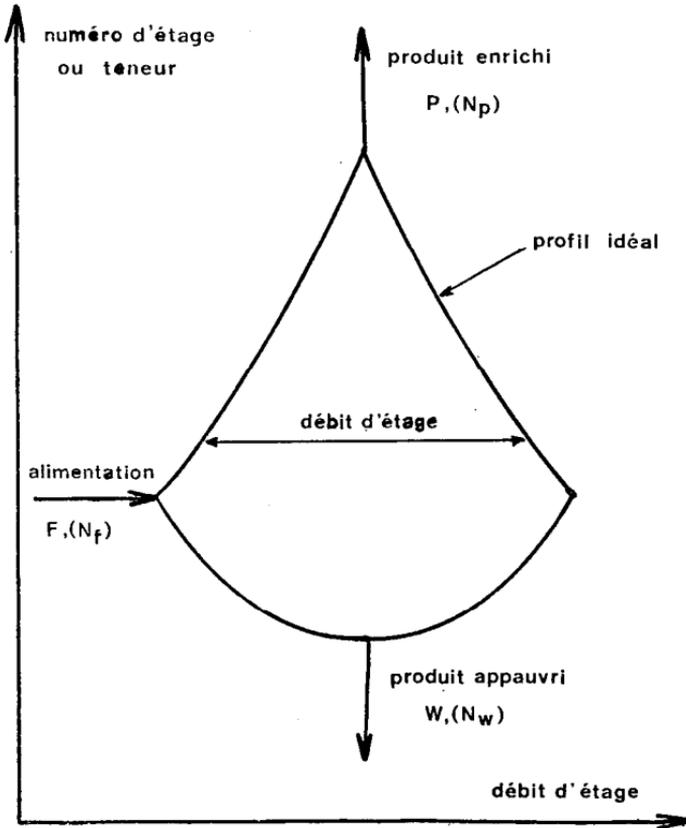


Fig. 3. — Cascade idéale de séparation isotopique.

à la taille et au coût des installations. C'est cette propriété qui fait l'intérêt pratique de la notion de puissance de séparation.

En pratique et pour des raisons évidentes de réalisation industrielle, on ne construit pas de cascade idéale où chaque étage serait conçu spécialement pour assurer un débit particulier. Les cascades réelles sont constituées de séries d'étages identiques, à fort débit au niveau de l'alimentation et à faible débit près des extrémités (fig. 4). La cascade ainsi obtenue comporte des re-

mélanges et sa puissance de séparation totale $\frac{\Delta U}{\delta \tau}$, définie par

l'équation (10), est inférieure à la somme des puissances de séparation des étages. L'efficacité de la cascade, dont l'écart à 1 mesure l'importance relative des remélanges, est définie par :

$$E = \frac{\frac{\Delta U}{\delta t}}{\frac{ie^2}{2} \sum_{i=1}^n L_i} < 1. \quad (13)$$

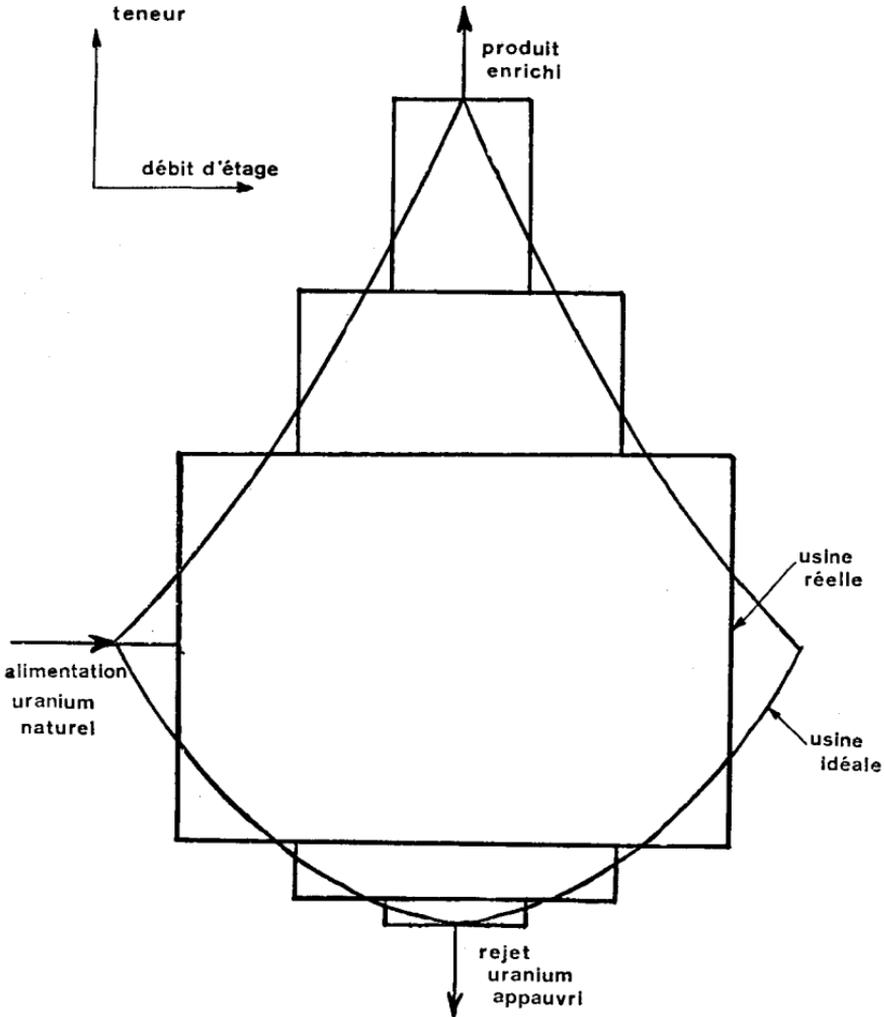


Fig. 4

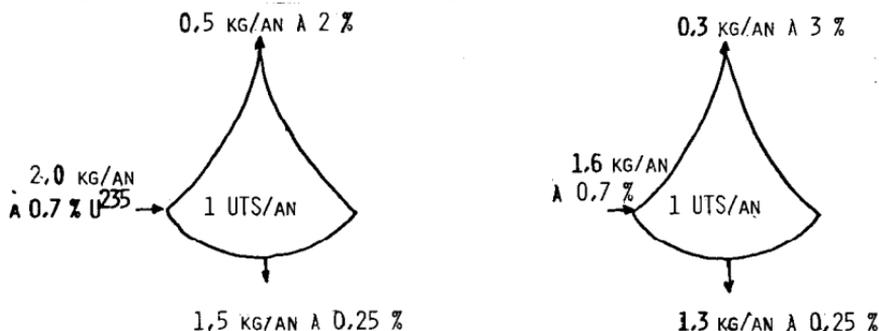
Cependant, une cascade comprenant par exemple 3 types d'étages différents comme l'usine de diffusion gazeuse du Tricastin, réalise une approximation satisfaisante d'une cascade

idéale (fig. 4) et présente une efficacité supérieure à 0,95. Les cascades réelles sont ainsi très voisines de cascades idéales, et la notion de puissance de séparation conserve tout son intérêt pour mesurer leur capacité.

UTILISATION DE LA NOTION DE PUISSANCE DE SEPARATION.

On a vu que la puissance de séparation est une caractéristique intrinsèque d'une cascade, qui détermine l'énergie consommée, ainsi que la taille et le coût de l'installation. De plus, il est intéressant de souligner que la puissance de séparation reste constante si les teneurs d'alimentation et de production varient (*).

Par exemple, une même installation, d'une capacité de 1 UTS/an peut fonctionner aux deux régimes suivants :



Cette souplesse opératoire ou flexibilité des usines de séparation isotopique est utilisée en pratique pour adapter leur fonctionnement aux variations de la demande en uranium enrichi et du marché de l'uranium.

Enfin, il peut être intéressant de citer les ordres de grandeurs suivants :

- la production d'un kg/an d'uranium enrichi à 3,3 % (combustible PWR) requiert 6,5 kg/an d'uranium naturel (à 0,7 %) et 4,5 kg d'UTS/an, pour un rejet appauvri à 0,25 % ;
- l'enrichissement du combustible d'un réacteur PWR de 1 000 MWe ((recharge) nécessite environ 100 000 UTS/an ;
- l'usine de séparation isotopique du Tricastin (EURODIF) a une puissance de séparation d'environ 11 millions d'UTS/an.

J.-C. GUAIS, M.-G. ALBERT,
 (Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay).

(*) Cela n'est exact que pour une certaine gamme de teneurs ; il existe des limitations liées en particulier au nombre d'étages dans la cascade et aux variations de l'efficacité.