

LE TRAITEMENT DES MINERAIS D'URANIUM

H. KERDJOUDJ

Commissariat à l'Energie Atomique

L'uranium constitue l'élément essentiel du cycle du combustible nucléaire comme le montre la figure 1.

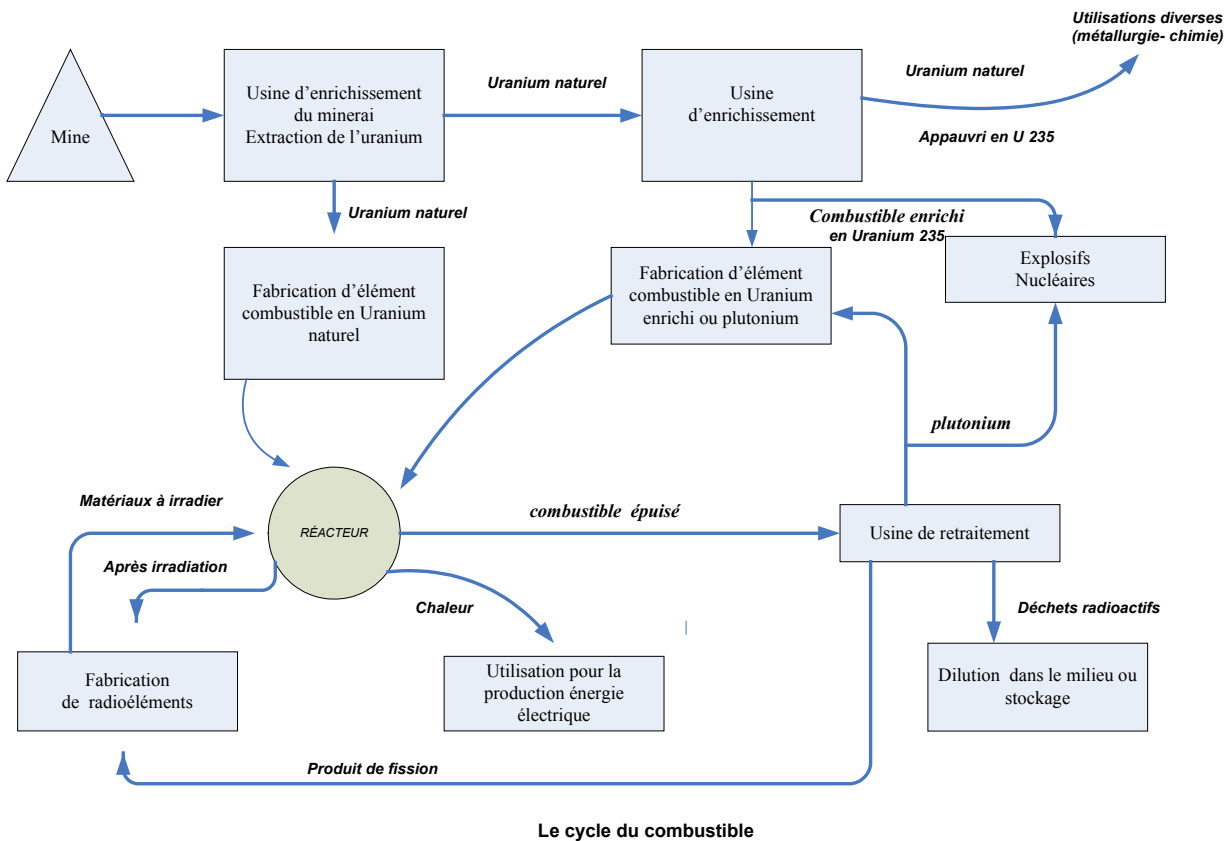


Figure 1 : le cycle combustible

Les minerais d'uranium contiennent généralement un à quelques kilogrammes de métal par tonne de minerai brut. Il sera donc nécessaire de leur faire subir des opérations de concentration pour les amener sous une forme marchande.

L'uranium étant un métal très réactif ce sont les traitements chimiques ou hydrométallurgiques (par opposition aux traitements pyrométallurgiques) qui se sont avérés les plus efficaces à cause des rendements qu'ils permettent d'obtenir. C'est d'ailleurs grâce à cela que leur importance industrielle ne cesse de s'accroître.

La figure 2 montre les deux directions essentielles et qui comportent chacune d'elles plusieurs étapes.

- le traitement commence par une préparation mécanique dont l'objectif est de libérer le minéral uranifère qui est souvent localisé soit dans les microfissures des roches cristallines comme les granites soit en ciment dans les roches sédimentaires comme les grès uranifères et de rendre ce minéral accessible au traitement. Cette préparation est généralement effectuée par voie humide pour éviter les risques de nuisance dus aux émanations radioactives.
Le résultat final est obtenu par une série de concassages et de broyages suivis de classifications à des dimensions imposées par les autres étapes du traitement.
- à de très rares exceptions (minerais canadiens ou australiens) les minerais d'uranium contrairement aux autres minerais, se prêtent mal à la concentration physique.
- le minerai broyé est ensuite attaqué sélectivement par un acide (dans le cas d'une gangue peu consommatrice d'acide) ou un carbonate alcalin (dans le cas d'un minerai riche en minéraux consommateurs d'acide comme les calcaires ou les phosphates). C'est ce qu'on appelle le lessivage ou lixiviation ou en anglais « leaching ».
- l'acide qui s'est imposé est l'acide sulfurique à cause de sa disponibilité, de son prix et aussi parce que les ions sulfate sont facilement éliminables en fin d'opération. Dans le cas d'une lixiviation alcaline on utilise le carbonate de sodium en utilisant la propriété qu'ont les carbonates de former avec l'uranium des complexes stables en solution aqueuse.
- la forme de l'uranium la plus soluble étant la forme hexavalente, on a souvent recours à l'emploi d'un oxydant.
- en plus de l'uranium d'autres éléments comme le fer, l'aluminium, le vanadium et le molybdène sont aussi mis en solution.
- la lixiviation carbonatée est généralement plus sélective que la lixiviation acide surtout vis à vis du molybdène et du vanadium mais elle exige un broyage plus poussé.
- l'uranium ayant été mis en solution, il faut séparer la liqueur du résidu solide avec le plus grand rendement et le plus petit volume possible.
- La solution contenant l'uranium doit être clarifiée, purifiée et concentrée. La méthode la plus répandue utilise des échangeurs d'ions soit sous forme de résines soit sous forme de solvants organiques. Les facteurs de concentration varient de 10 à 100.
- L'uranium contenu dans la solution est ensuite précipité par une base qui peut être soit de soude soit de l'ammoniac. On obtient alors un concentré marchand qui titre à sec entre 65 et 75% en poids en uranium.

- Le concentré marchand est ensuite dirigé vers des ateliers de raffinage où il subit une purification poussée qui conduit à l'élaboration d'un composé de pureté dite nucléaire. Ce dernier peut être de l'ammonium diuranate (ADU), de l'ammonium uranyl carbonate (AUC) ou du tétrafluorure d'uranium (UF₄) etc. destinés à la métallurgie et à la fabrication d'éléments combustibles.

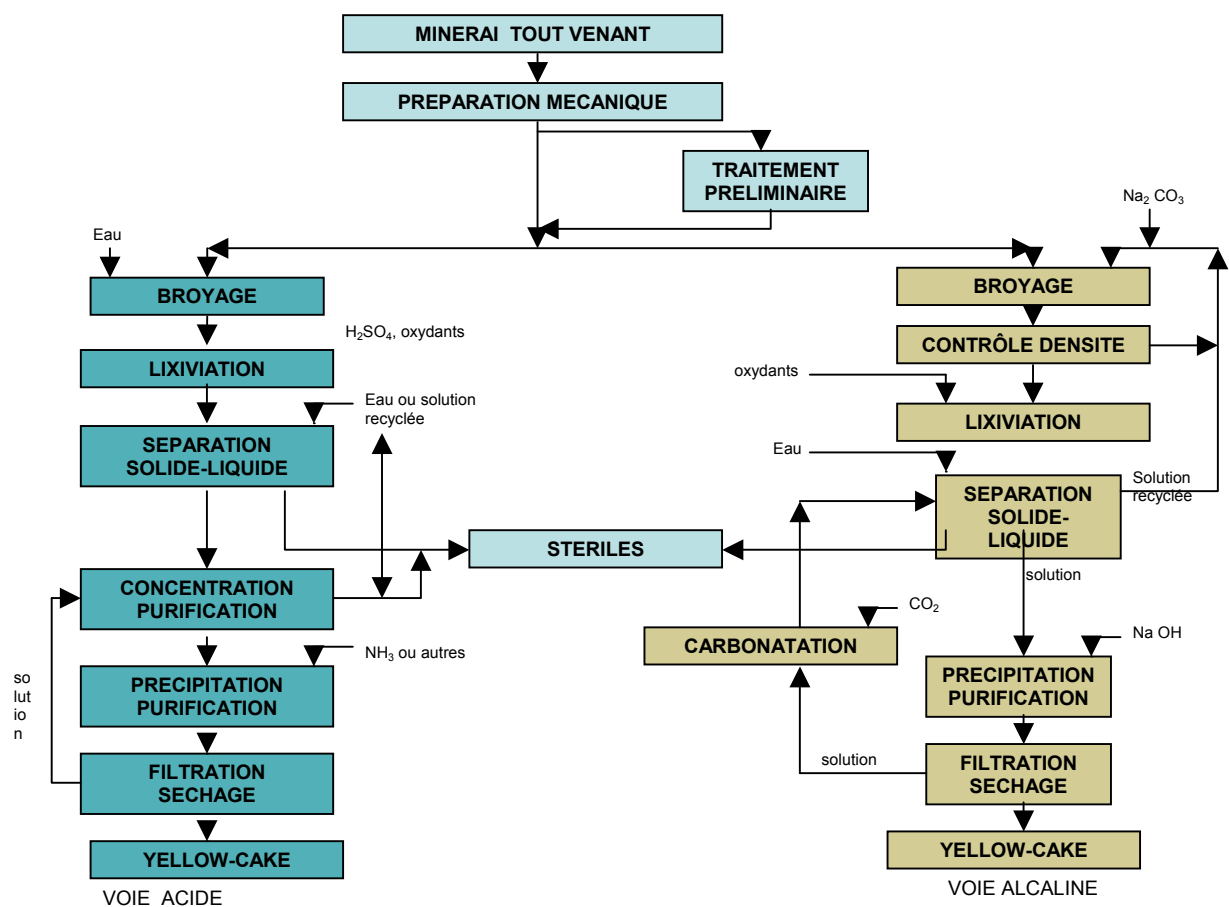


Figure 2

LES PROCEDES TECHNOLOGIQUES

Le traitement des minerais d'uranium fait appel pour toutes les étapes à des procédés de haute technologie : la lixiviation sous pression, la séparation liquide-solide, la clarification poussée des solutions. L'utilisation de ces dernières doit être justifiée par un rendement nettement plus élevé que celui obtenu par des procédés plus simples.

Les voies de traitement

La figure 3 illustre trois possibilités qui s'offrent aux exploitants :

La voie 1 : Elle est la plus longue et la plus coûteuse mais la plus utilisée actuellement. Elle englobe toutes les étapes qui se trouvent rassemblées sur un même site à proximité de la mine.

La voie 2 : Elle permet d'obtenir sur le site de la mine un préconcentré pouvant supporter les frais de transport sur de longues distances. Le préconcentré peut être considéré comme un second minerai riche dont la teneur en uranium justifierait l'utilisation de moyens de purification très sélectifs et réservés jusque-là au raffinage.

La voie 3 : C'est la plus courte mais aussi la plus exigeante par la maîtrise des compositions des solutions et par la connaissance intime des espèces chimiques et de leur comportement.

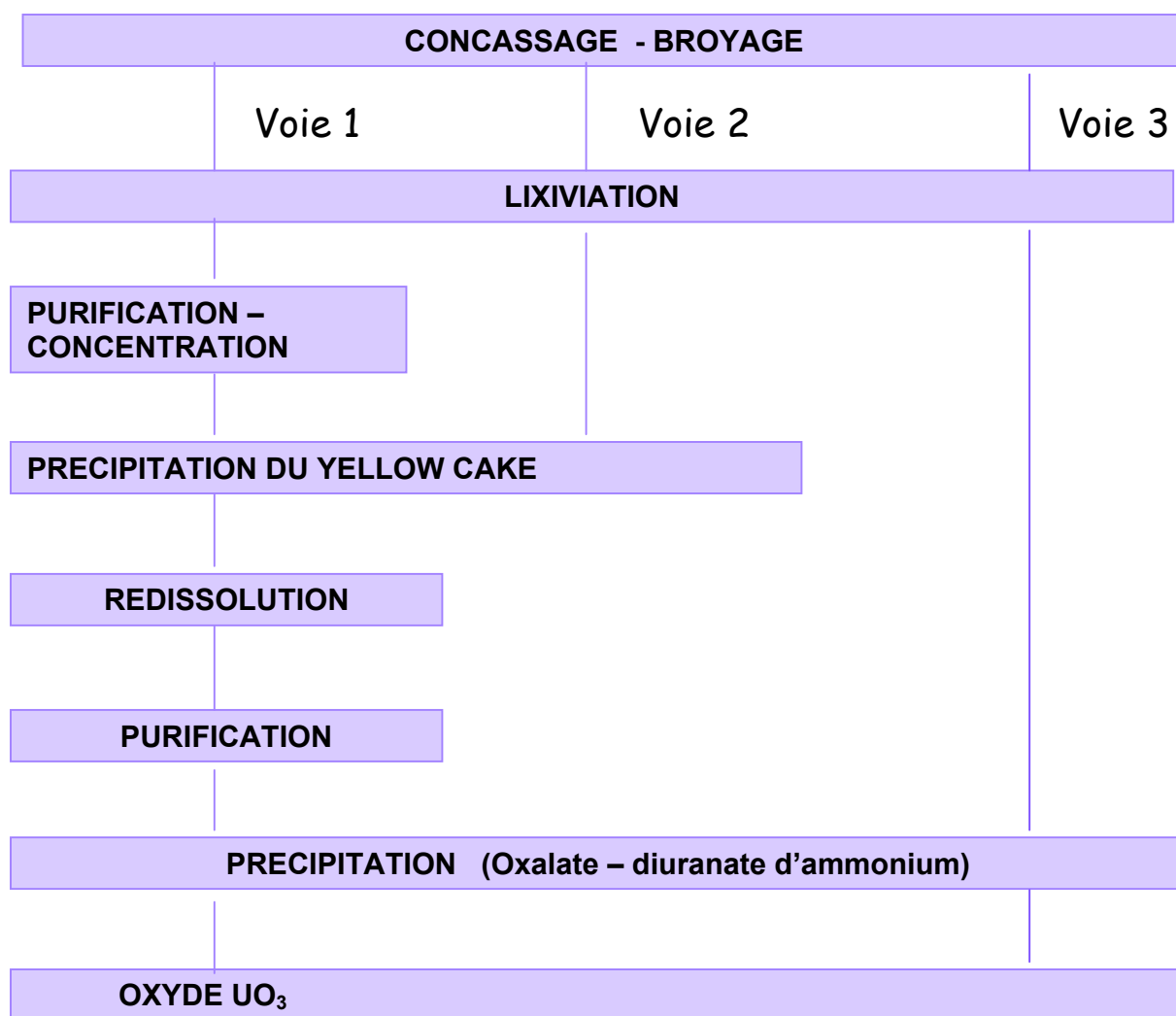


Figure 3

Quelques aspects économiques

L'évaluation du coût de traitement se fait essentiellement à l'aide de trois paramètres principaux :

1. Les quantités d'énergie consommées au niveau des différentes opérations
2. Les quantités d'eau utilisées
3. Les produits chimiques nécessaires à toutes les opérations de traitement

Ces trois paramètres conditionnent le choix des technologies de traitement.

Le tableau 1 donne l'énergie nette requise pour produire une tonne de U₃O₈ ainsi que la répartition sur les différents postes pour les deux types de traitement (acide et alcalin). L'énergie nécessaire par unité d'uranium produite par le procédé alcalin est proche du double de celle du procédé acide. Dans les deux procédés, près de 80% ou plus de l'énergie utilisée est directement en relation avec la quantité de minerai traité. On remarque aussi que la plus grande partie de l'énergie est consommée par la préparation mécanique et la lixiviation. Ce sont donc les postes sur lesquels les efforts de réduction des coûts doivent porter.

Tableau 1

Type de traitement

	Acide	Alcalin
Énergie nette requise (j/1000kg $U_3O_8 \cdot 10^3$)	350 à 450	700 à 800
Distribution par poste (%)		
-concassage- broyage	26	31
-Lixiviation	38	42
-Séparation solide- liquide	10	5
-Extraction de l'Uranium	11	-
-Réextraction – précipitation Et séchage	15	22

Le tableau 2 donne les équivalents énergétiques pour les réactifs chimiques et les fournitures diverses nécessaires au traitement des minerais. Ce sont les réactifs de lixiviation et de précipitation qui viennent en tête.

Tableau 2

Equivalent énergétique	Unité	Joules $\times 10^6$
H_2SO_4	t	965
NaOH	t	34.887
NH_3	Kg	9.3
Ca O	t	9884
$NaClO_3$	t	67.158
Huiles et graisses	l	41.8
Kérosène	l	37.6
Milieux de broyage	kg	8.4

Le troisième aspect concerne les capitaux nécessaires et les coûts de production. Les tableaux 3 et 4 donnent la répartition par étape et pour les deux voies . Ces chiffres sont donnés à titre indicatif. Il est difficile de les généraliser mais il faut tout de même signaler que les capitaux sont en relation directe avec :

- la quantité de minerai traité
- les caractéristiques minéralogiques du minerai qui retentissent sur les paramètres de lixiviation (caractère réfractaire du minerai) ou la séparation solide liquide (importance de particules fines de minerai)
- les infrastructures disponibles sur place et qui sont en relation avec la localisation de l'usine, le niveau de développement du pays et son environnement industriel.

On ne dispose pas de beaucoup de données concernant les coûts de production. L'ordre de grandeur des coûts des diverses opérations pour une usine qui utilise la lixiviation acide, l'extraction par solvants et qui traite 2000 tonnes/jour de minerai titrant 0,2% avec un rendement d'extraction global de 95%. On remarque que près de 70% du coût total de production sont associés aux opérations de lixiviation et de séparation solide-liquide alors que plus de 70% des capitaux et des équipements concernent la préparation mécanique et la séparation solide-liquide avec une nette prépondérance pour la séparation solide-liquide.

Tableau 3

	Équipement (%)	Capital (%)	Coût de production (%)
Opération unitaire			
-Concassage- broyage	28	29	16
-Lixiviation	9	9	46
-Séparation solide- liquide	46	44	22
-Extraction par solvant	11	12	11
-Précipitation- séchage	6	6	5

Tableau 4

Coût de l'équipement en (%)

Opérations Unitaires	Voie Acide				Voie alcaline
	SX	RX	RIP	ELUEX	
-concassage- broyage	26-45	26-45	28-48	24-41	
-Lixiviation	5-15	5-15	5-16	5-14	31-49
-Séparation solide- liquide	24-38	22-36	10-16	8-12	10-17
-Extraction par solvant	14-16	15-17	26-32	35-45	28-36
-Précipitation- séchage	5-9	6-10	6-10	5-9	-
					7-16

Les options technologiques

Elles doivent prendre en considération les réductions et les économies en coûts d'équipements, en coûts de production.

1. La préparation mécanique : L'histogramme de la figure 4 représente les énergies théoriques nécessaires à la fragmentation. L'accroissement du coût énergétique est spectaculaire dès qu'on descend au-delà de 2mm.

2. La lixiviation : Elle peut être réalisée de quatre manières différentes en fonction de critères tels que la conduite des opérations ou les coûts d'investissement.

a) La lixiviation en réacteur agité : C'est la plus employée dans le cadre du traitement des minerais riches. Elle peut être réalisée en continu ou en discontinu. Elle implique la séparation solide-liquide (décantation, floculation ; filtration)

b) La lixiviation sous pression. Elle se déroule en autoclave à des températures et des pressions élevées. Les autoclaves doivent pouvoir résister aux conditions de température et de pression qui peuvent dépasser 200°C et plusieurs Méga Pascals. Leur conception en acier inoxydable ou en alliages spéciaux leur permet de résister à la corrosion.

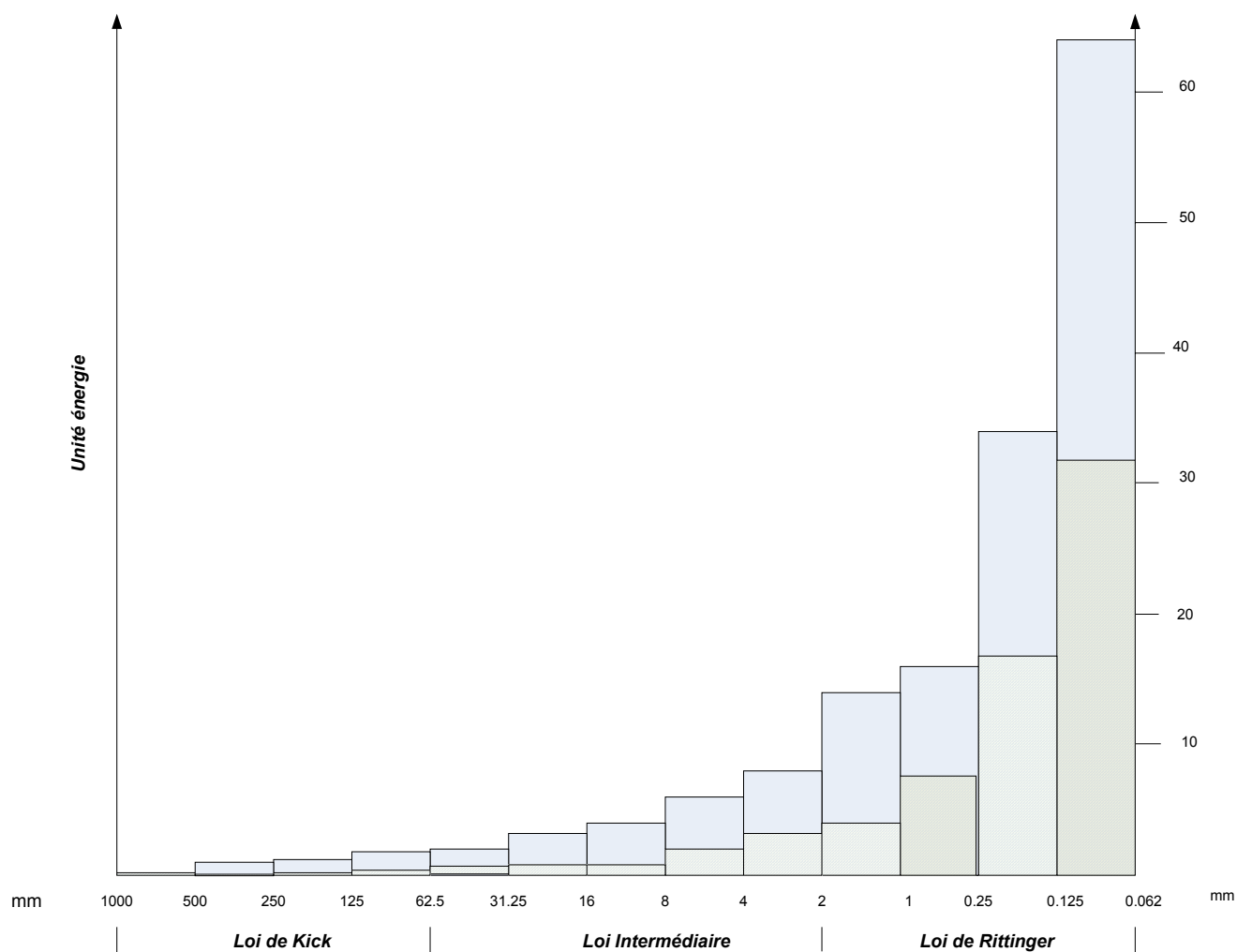


Figure 4 : Energies nécessaires à la fragmentation
 En hachuré : Energies élémentaires, En blanc: Energies cumulées

c) *La lixiviation en tas*. Elle consiste à disposer le minerai grossièrement concassé sur une aire étanche et le soumettre à un arrosage par une solution d'attaque. Le tas peut être de quelques dizaines à quelques milliers de tonnes. Un système de collecte permet de recueillir des solutions chargées en uranium (figure 5). La durée de l'attaque est longue (plusieurs mois) et les rendements finaux sont relativement faibles (entre 50 et 90%). Après épuisement le tas est abandonné en l'état.

Il existe des variantes qui permettent de lever les handicaps.

- la percolation sur colonnes qui permet de réduire la durée à quelques jours et de recycler les solutions pauvres en uranium.
- la lixiviation en stalles récupérables qui permet de traiter des quantités plus importantes et de ne pas porter atteinte à l'environnement (figure 6).
- La lixiviation bactérienne

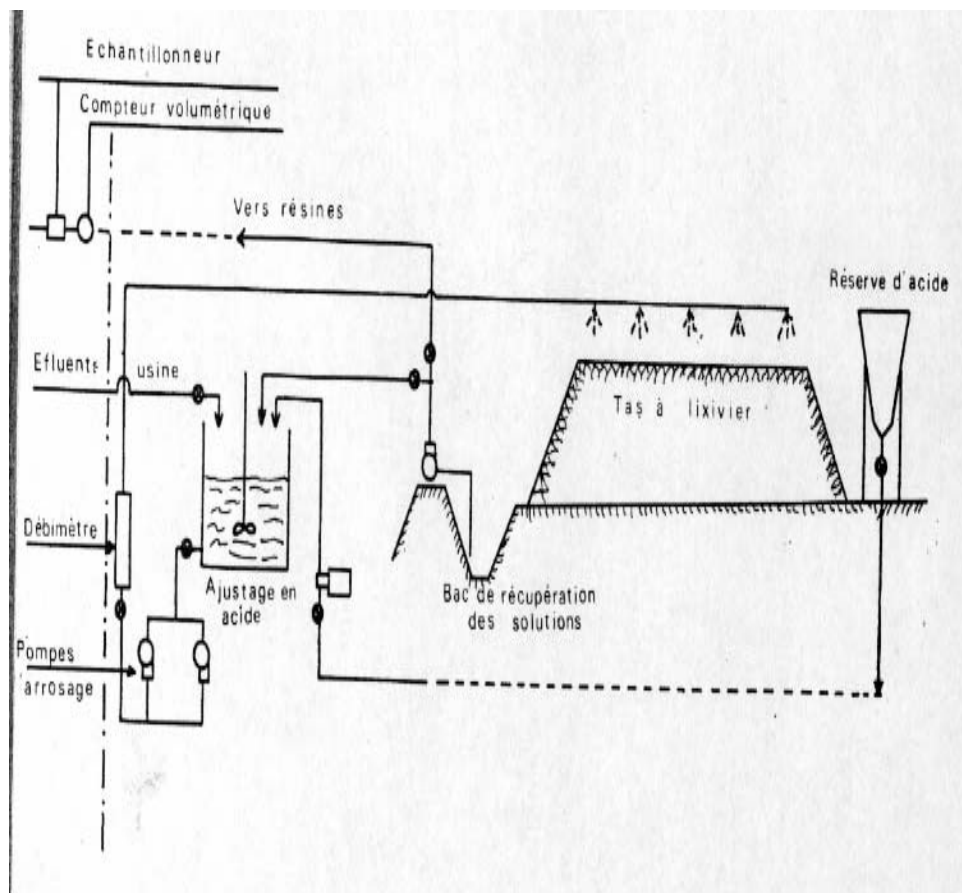


Figure 5

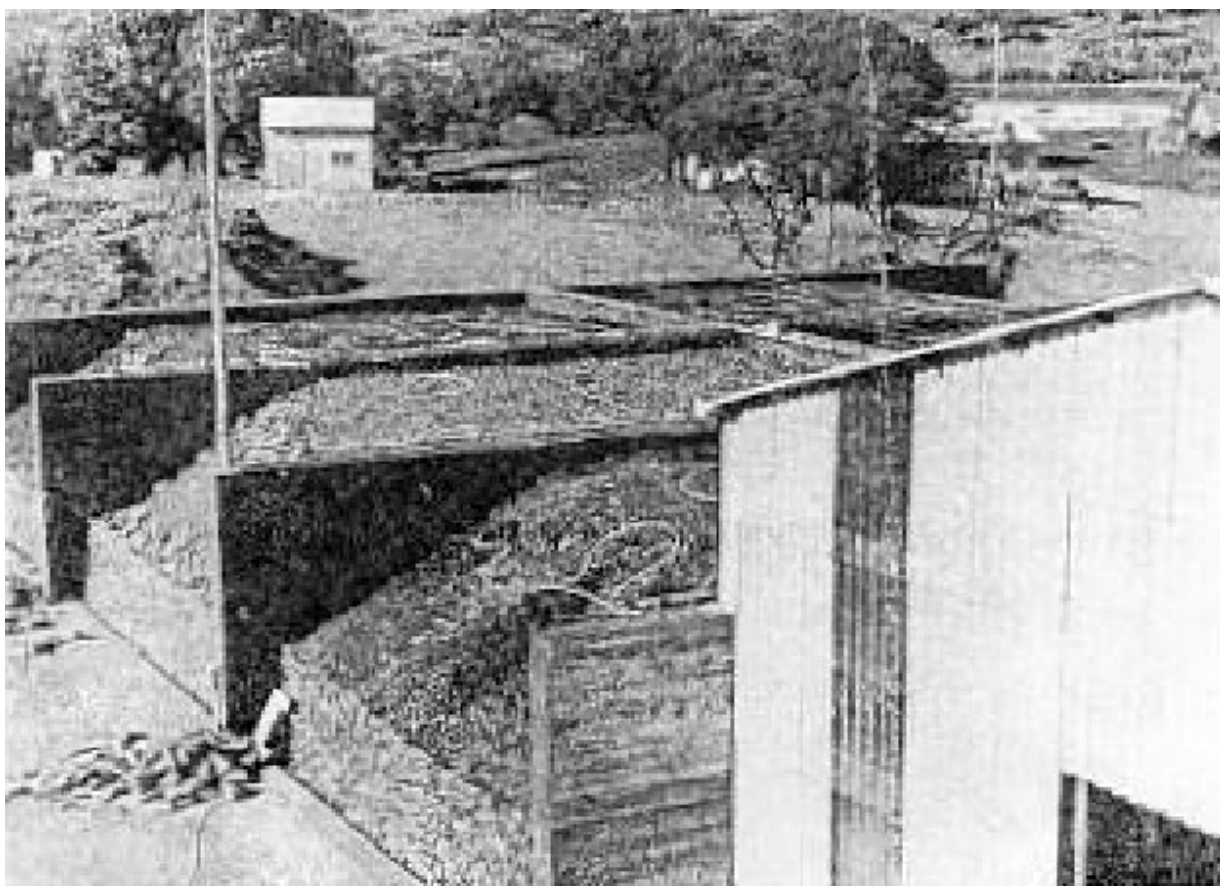


Figure 6

d) La lixiviation in situ qui peut être envisagée dans le cas de minerais riches en amas ou de minerais très pauvres en grands gisements. Elle consiste à injecter par des forages la solution lixivante et de recueillir la solution résultante par d'autres forages (figure 7). Elle présente des exigences particulières comme un bon isolement du gisement vis-à-vis du réseau hydrogéologique.

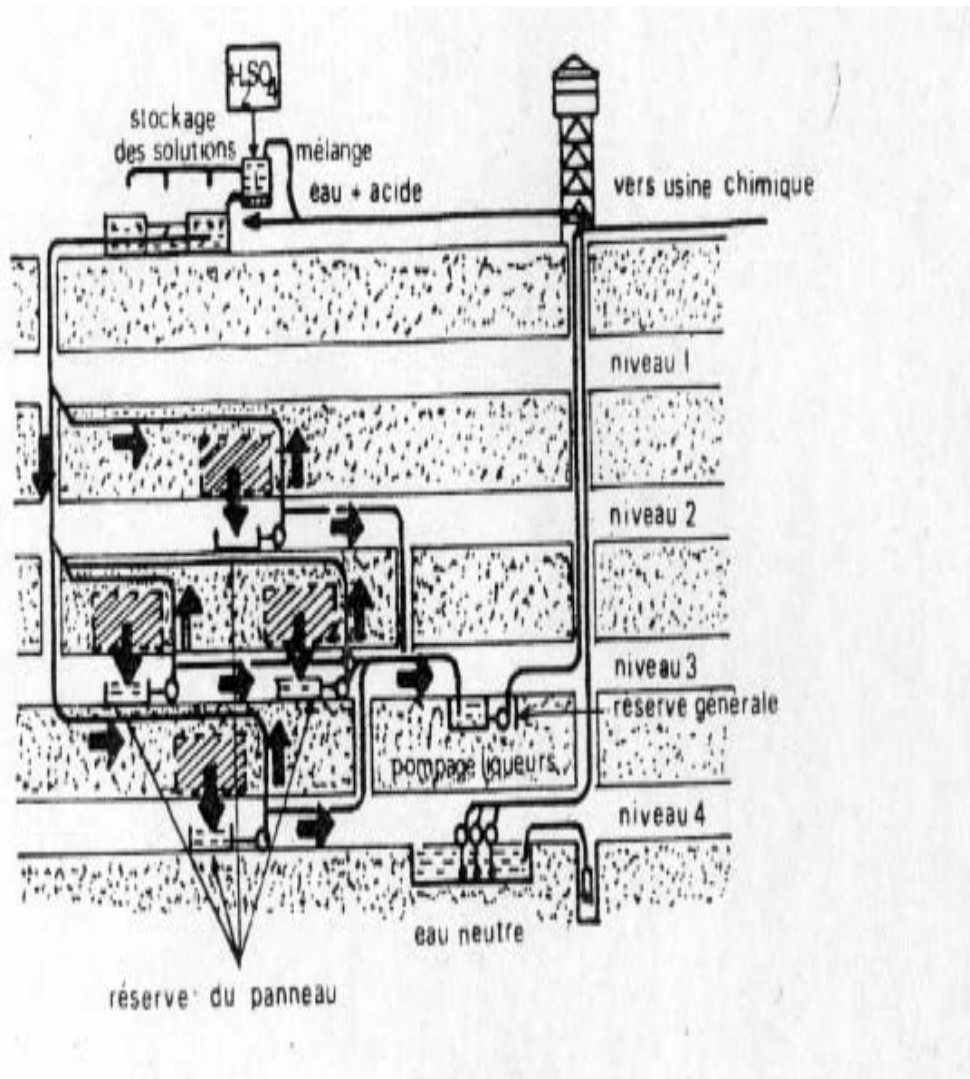
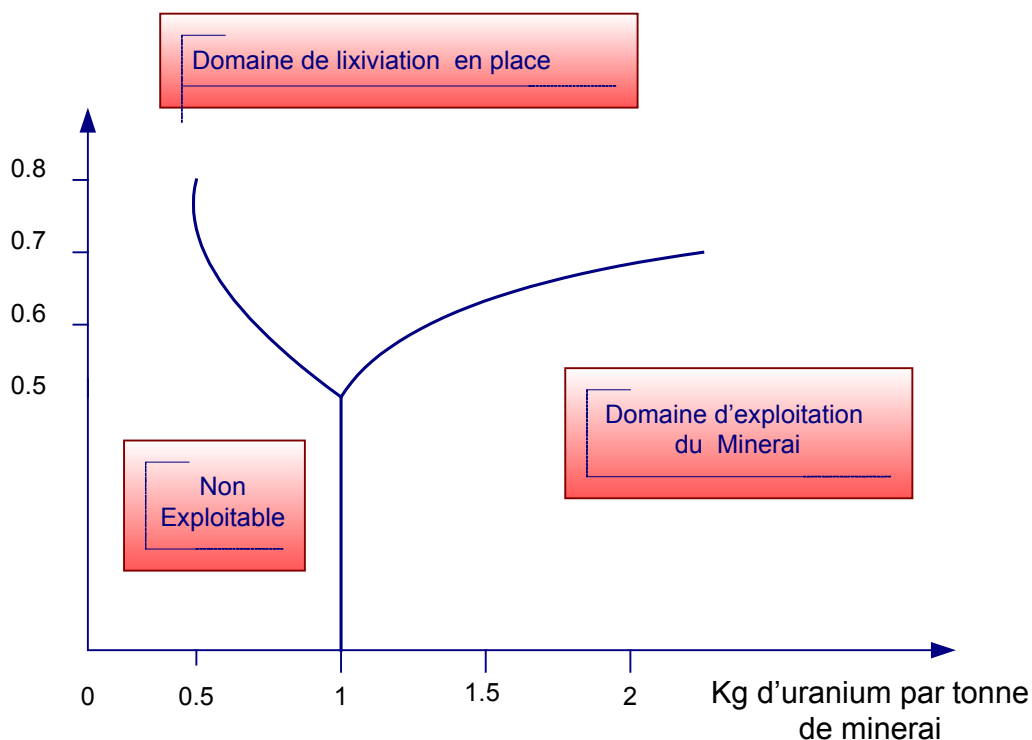


Figure 7

Ces deux derniers types présentent l'avantage d'éliminer la séparation liquide-solide.

La figure 8 présente trois domaines d'exploitation économique en fonction du rendement de lixiviation et de la teneur du minerai. Les frontières entre les domaines peuvent être déplacées vers la droite en tenant compte des critères autres que la teneur (localisation, réserves exploitables, etc.)



Domaines économiques d'application des différentes méthodes d'exploitation.

Figure 8

3. La purification et la concentration Elles consistent à éliminer les impuretés susceptibles de perturber l'élaboration du matériau désiré ou de nuire à sa pureté. Ces opérations sont réalisées en transférant ces impuretés de la solution aqueuse vers une autre phase.

Deux types principaux de procédés sont utilisés :

- a) *la fixation sur résines échangeuses d'ions* qui permet de travailler avec des solutions diluées et d'obtenir un concentré après élution. Les résines sont mise en œuvre dans des colonnes qui autorisent un fonctionnement continu
- b) *l'extraction par solvants ou séparation liquide-liquide* qui se déroule en trois étapes : l'extraction de l'uranium, le lavage du solvant et la réextraction de l'uranium. L'efficacité de l'opération est primordiale pour éviter toute contamination et nécessite plusieurs étages. L'extraction par solvants est mise en œuvre dans trois types d'installations : les mélangeurs-décanteurs, les extracteurs centrifuges ou les colonnes pulsées.

3. La précipitation: L'uranium est précipité sous forme d'uranate d'ammonium ou de sodium par ajout d'ammoniac ou de soude en faisant évoluer le pH et/ou la température.

Les concentrés obtenus sont enfin acheminés vers les unités de raffinage pour l'élaboration de produits aptes à subir les opérations métallurgiques conduisant à l'élaboration des éléments combustibles.

LA GESTION DES DECHETS ET LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Les déchets générés par les opérations de traitement sont donnés dans le tableau 5.

Tableau 5

Opération	Principaux rejets	Eléments contaminants
Extraction de l'Uranium (mines)	Stériles, Eaux d'exhaure	Uranium et produits de filiation (radium et radon)
Production de concentrés	-Stériles utilisés pour le remblayage des mines - Efluentes liquides	Uranium et produits de filiation
Purification des concentrés	Efluentes liquides	Uranium
Obtention de produits finis	-Efluentes gazeux -Efluentes liquides -Résidus solides peu contaminés	Radon et Uranium Uranium et produits de filiation, Protactinium

Le traitement des minerais d'uranium présente un impact sur l'environnement non négligeable et qu'il faut prendre en compte. Les installations de traitement sont considérées comme des installations lassées et leurs rejets sont soumis à autorisation et contrôlés régulièrement.

CONCLUSION

Le traitement des minerais d'uranium est de plus en plus maîtrisé et génère de moins en moins de déchets et de rejets grâce aux efforts qui sont réalisés dans le domaine du recyclage des solutions. De nombreuses recherches se poursuivent pour réduire les coûts et pour mieux adapter les procédés de traitement des déchets.

BREVE BIOGRAPHIE DE L'AUTEUR

Docteur Es Sciences

Professeur de l'Enseignement Supérieur

A dirigé une vingtaine de thèses de Magister et de Doctorat dans le domaine de l'hydrométallurgie et de la chimie séparative

Auteur de plus d'une cinquantaine de publications scientifiques dans des revues internationales

Actuellement Directeur des Activités Scientifiques au Commissariat à l'Energie Atomique et Directeur Général du Centre de Recherche Nucléaire de Draria