

L'enrichissement de l'UF6 Procédés industriels

BONNETAUD Jacques / BOUDAUD Jérôme

2024

Diffusion Limitée Orano

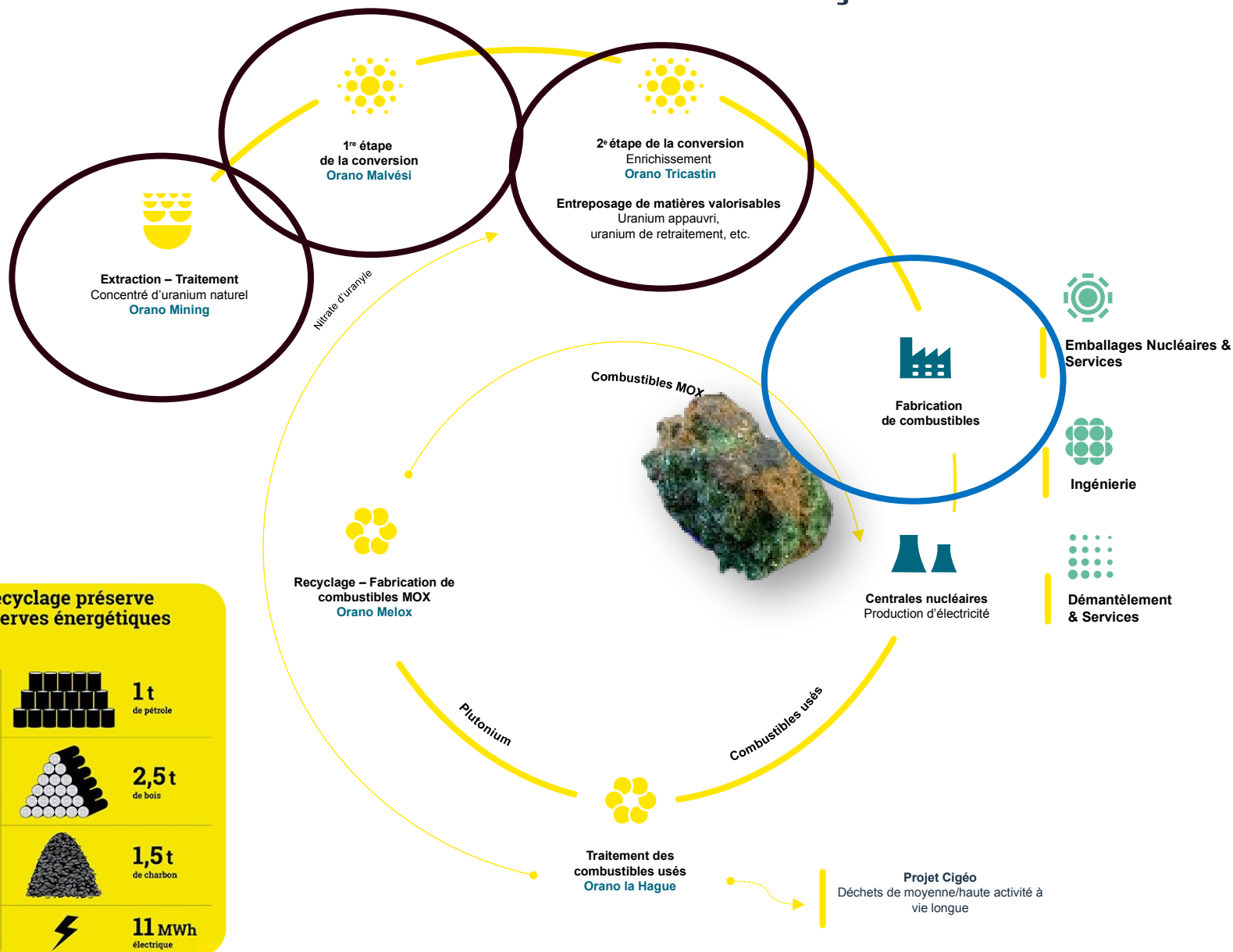


orano

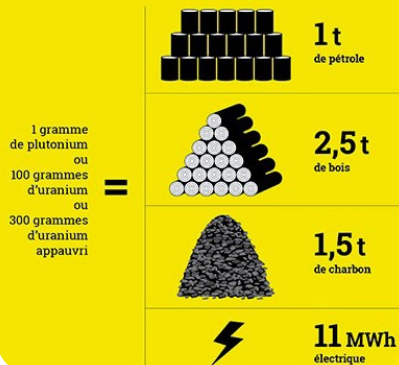


**Suivez notre actualité sur
Twitter
@OranoTricastin**

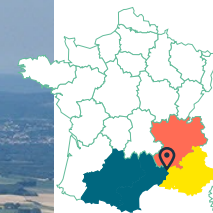
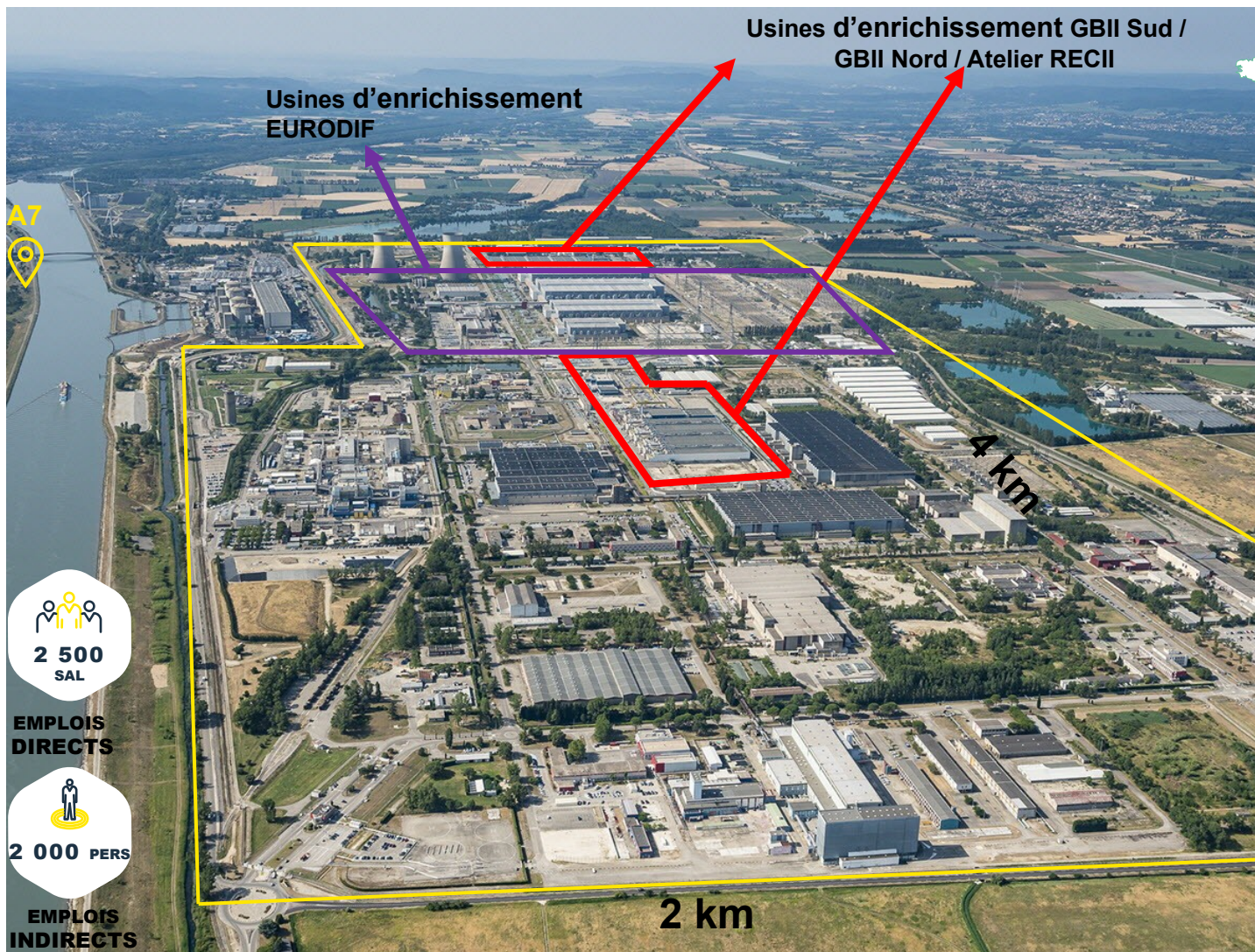
Cycle du combustible nucléaire : le modèle français



Le recyclage préserve les réserves énergétiques



Site Orano Tricastin



Un bassin d'emploi à cheval sur 3 régions

Sommaire

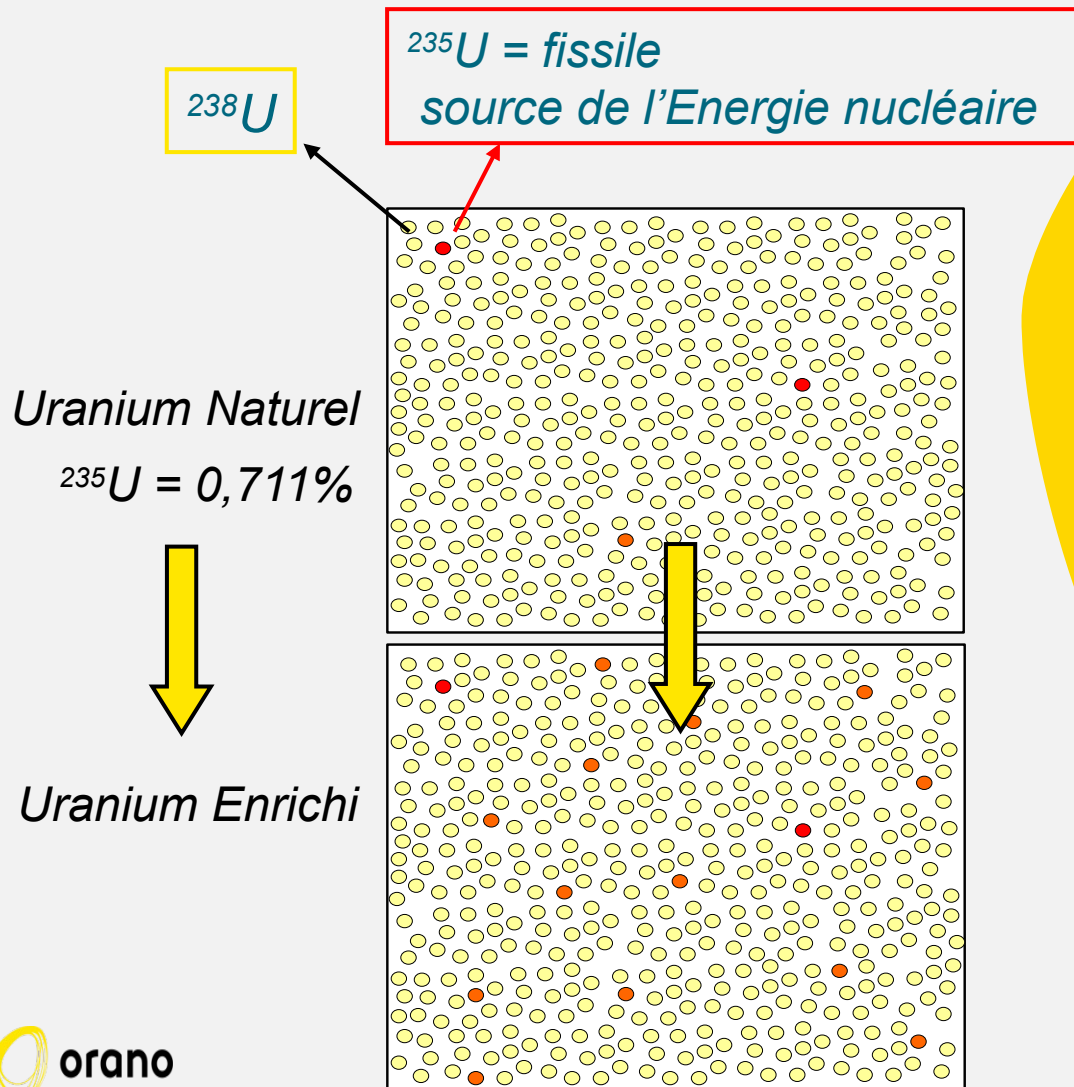
1. Uranium 235
2. Séparation isotopique
3. Diffusion Gazeuse
4. Centrifugation
5. Risques de prolifération
6. L'Usine GBII d'Orano Tricastin
7. Le marché de l'enrichissement
8. Autres Procédés

01

Uranium 235

Pourquoi l'Uranium ?

Seul élément de la nature qui contient un isotope fissile : l'U235 ... mais ... en trop faible quantité.



Enrichir consiste
à augmenter la
teneur en ^{235}U

Taux d'enrichissement - Synthèse

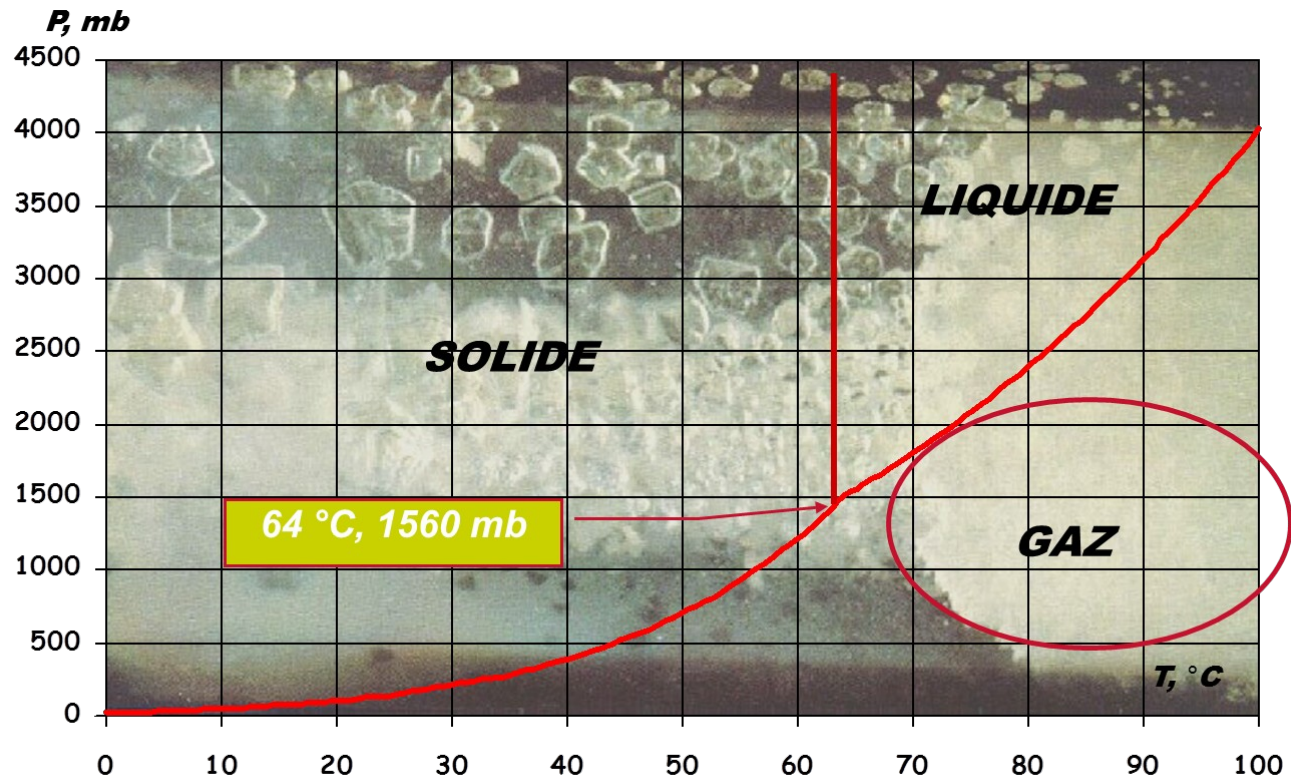


Teneurs, législation et utilisation

- 0,711% : Uranium naturel
- 0,711% à 5% : LEU (Low Enriched Uranium) - Majorité des réacteurs civils
- 5% à 20% : HALEU – Réacteurs de recherche civils et expérimentaux
- > 20% : HEU (High Enriched Uranium) – Destination militaire
- > 90% : HEU – Utilisation militaire pour des bombes
- < 0,711% : Uranium appauvri

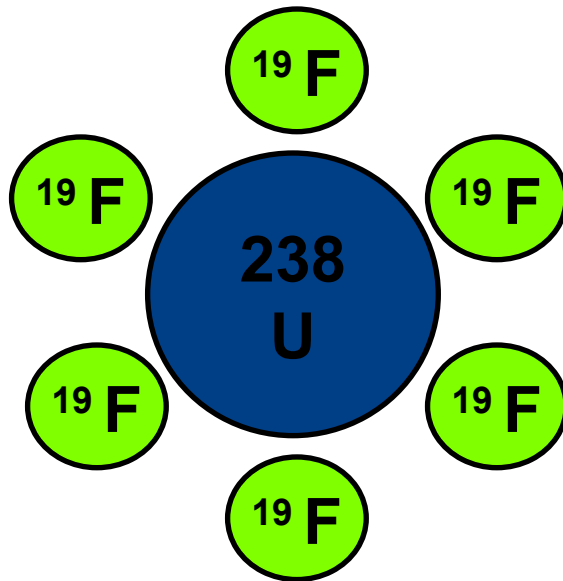
Enrichissement sous forme gaz UF6

L'uranium est traité sous forme d'hexafluorure d'uranium (UF₆).
Gazeux à faible température (à pression atmosphérique,
température de sublimation 56°C)



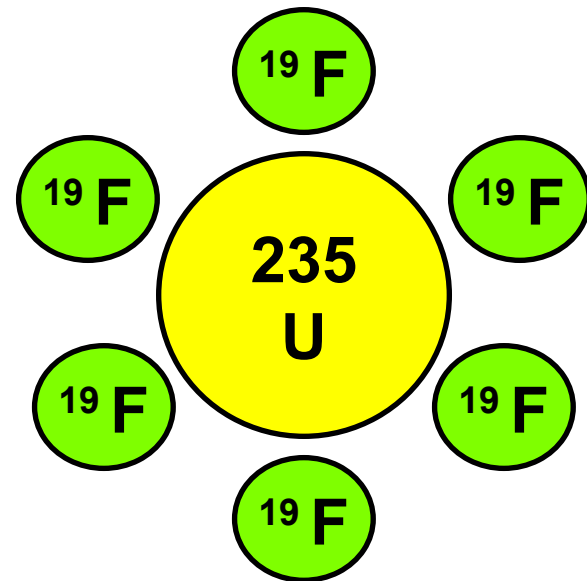
Hexafluorure d'uranium UF₆

2^e atout : 1 seul isotope ¹⁹F



352

*Masse molaire
(g/mol)*

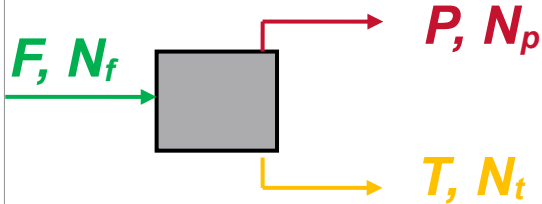


349

02

Séparation isotopique

Principe de la séparation isotopique



Pondération des flux par « fonction de valeur » $V(N)$. Sans dimension, elle ne dépend que de la concentration isotopique en ^{235}U .
Pour les faibles enrichissements :

$$V(N) = (2N - 1) \text{Ln} (N / (1 - N))$$

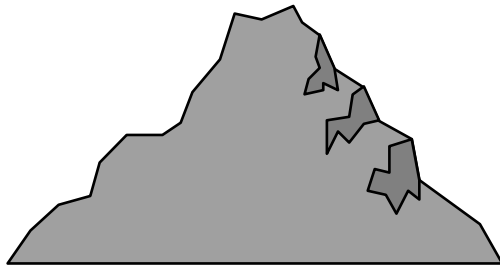
- Pour un élément séparateur donné, la puissance de séparation est donnée par :

$$\Delta U = P.V(N_p) + T.V(N_t) - F.V(N_f)$$

- ΔU s'exprime en UTS « Unité de Travail de Séparation » (SWU = Separative Work Unit)

UTS

Le travail de tri des isotopes est appelé:
Travail de Séparation ΔU et l'unité est l'UTS



9 kg d'Uranium
Contenant 0,71 % d' ^{235}U

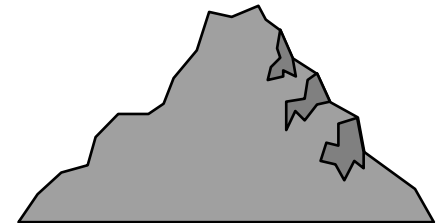
Uranium naturel

+ 5,28 UTS =



1 kg d'Uranium
contenant 4 % d' ^{235}U

Uranium enrichi



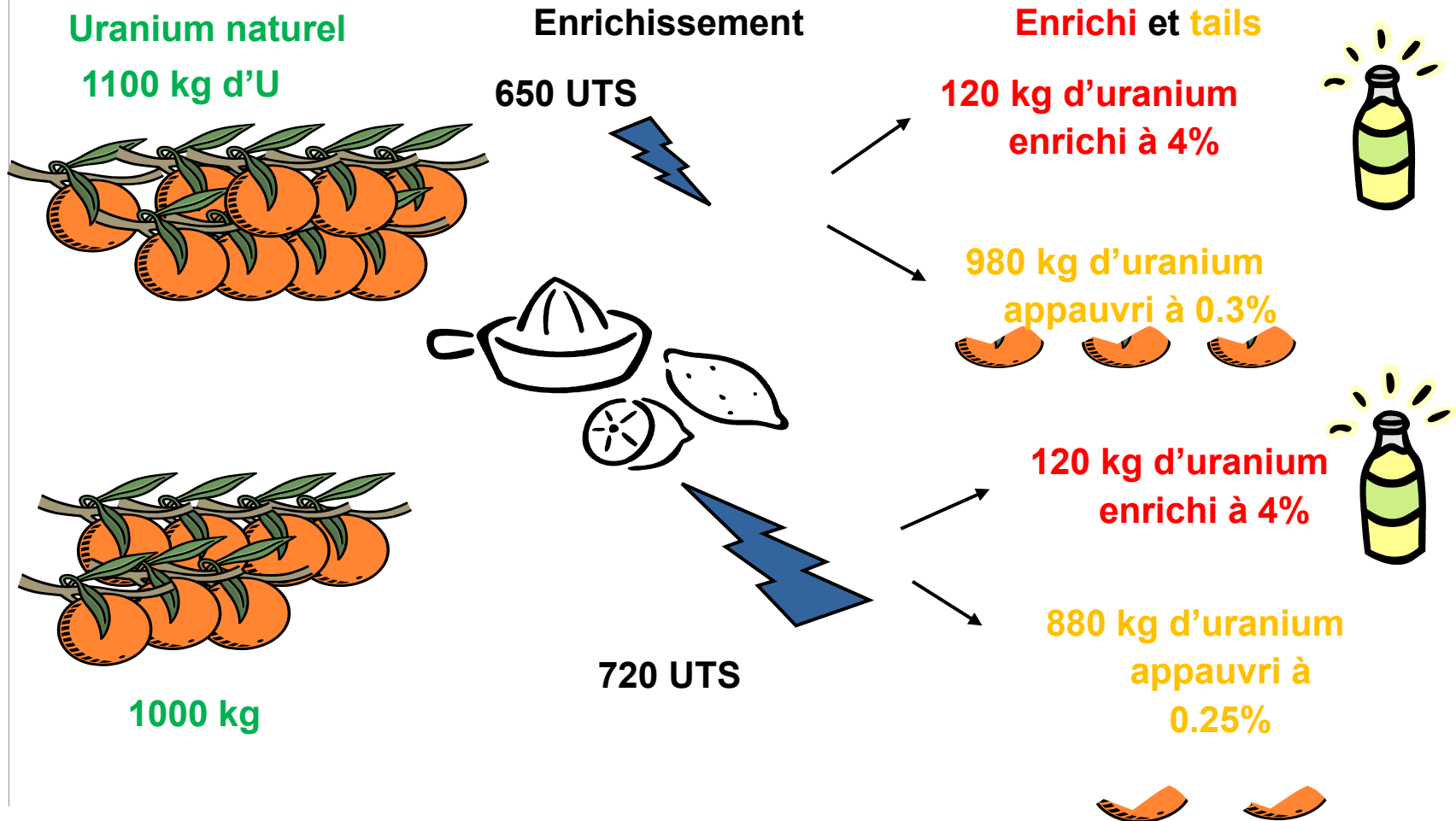
8 kg d'Uranium
contenant 0,3 % d' ^{235}U

Uranium appauvri

Les bilans en UF_6 et en ^{235}U doivent égaux:

Uranium naturel = Uranium enrichi + Uranium appauvri

Consommation en Uranium et UTS

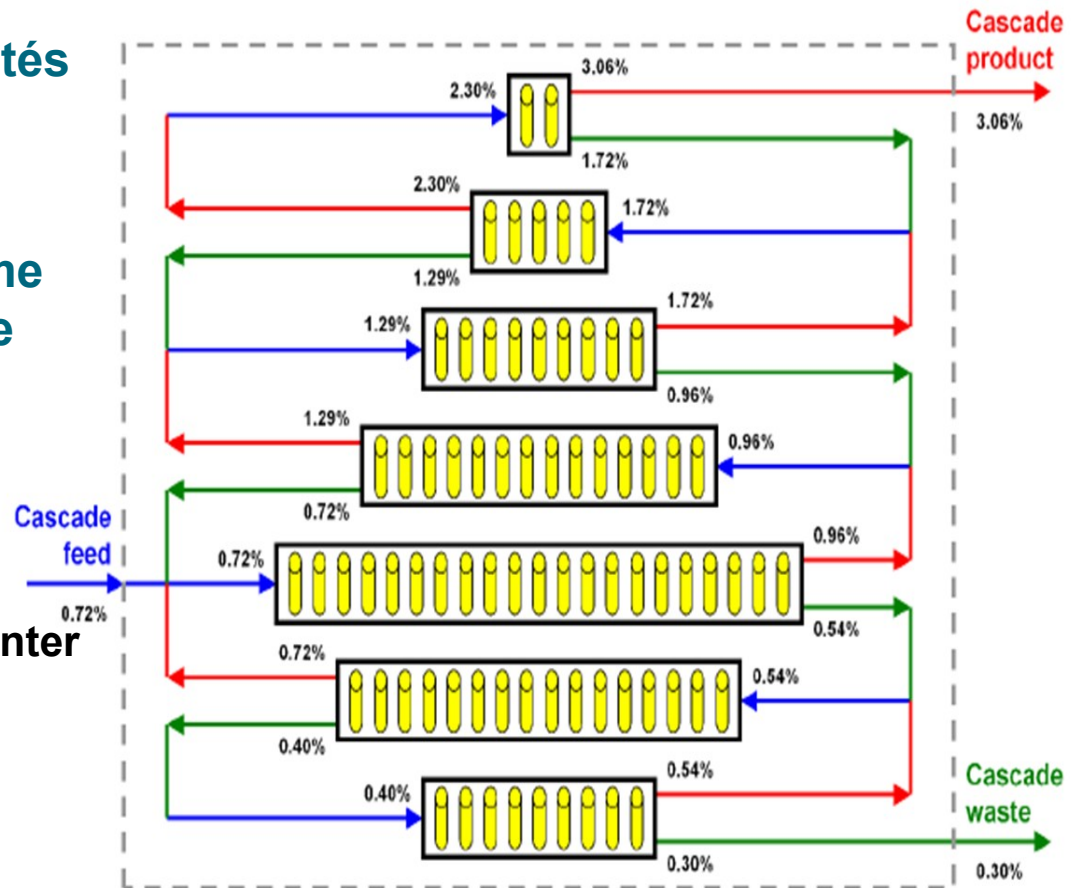


Principe de mise en cascade

On appelle cascade une succession d'étages montés en série.

Un étage pouvant lui-même être constitué de un ou de plusieurs éléments séparateurs montés en parallèle.

- Mise en série pour augmenter la séparation de teneur
- Mise en parallèle pour augmenter le débit



03

Diffusion Gazeuse

Principe de la diffusion gazeuse

PROPRIETES DES GAZ

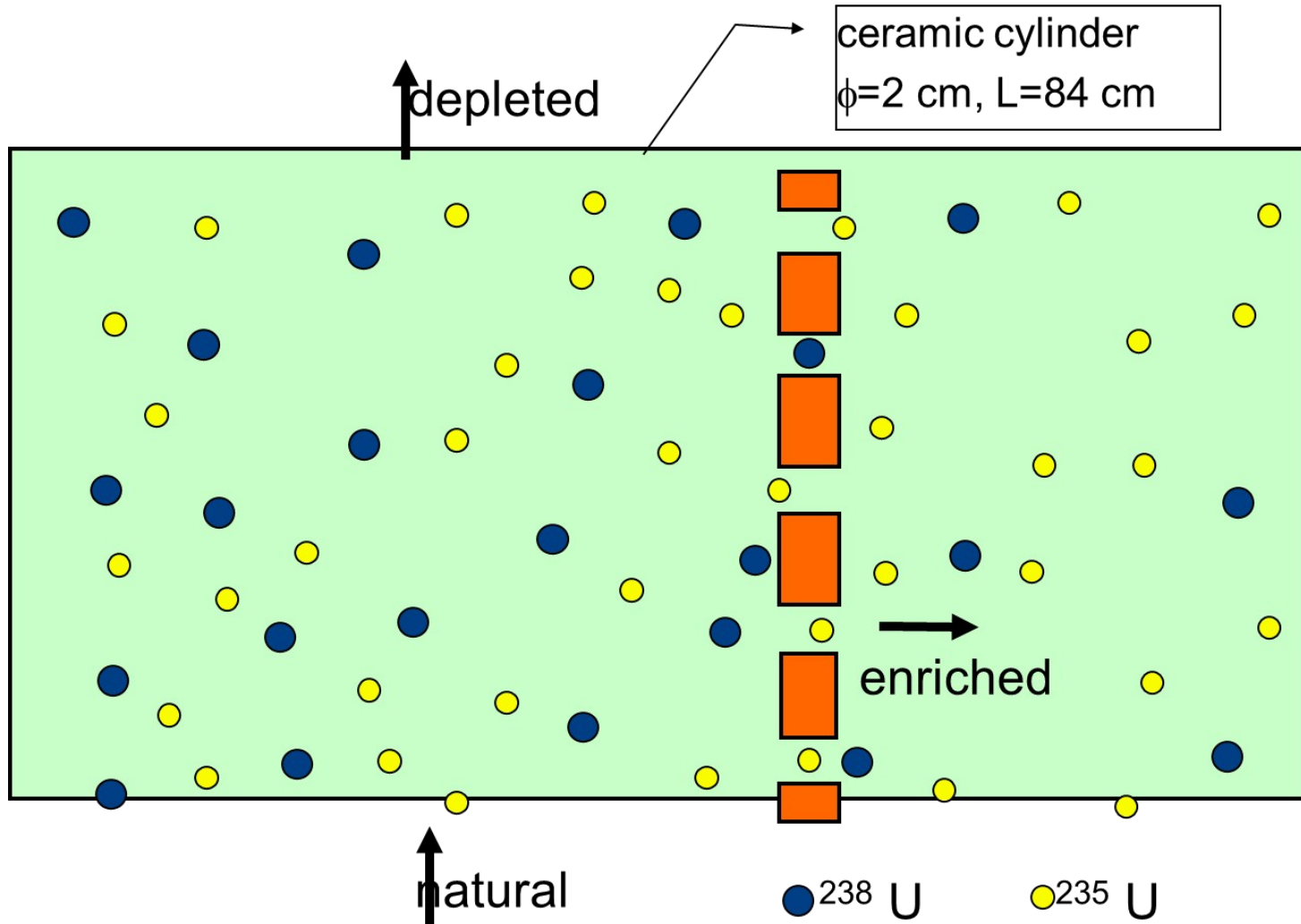
Dans une cellule fermée en équilibre thermique, toutes les molécules d'un mélange gazeux ont **la même énergie cinétique moyenne**.

La vitesse d'une molécule est inversement proportionnelle à la racine carrée de sa masse moléculaire.

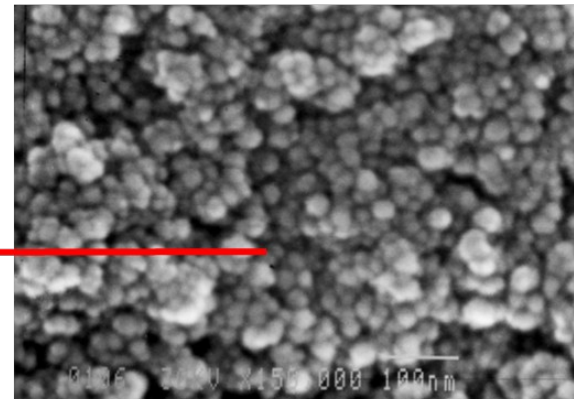
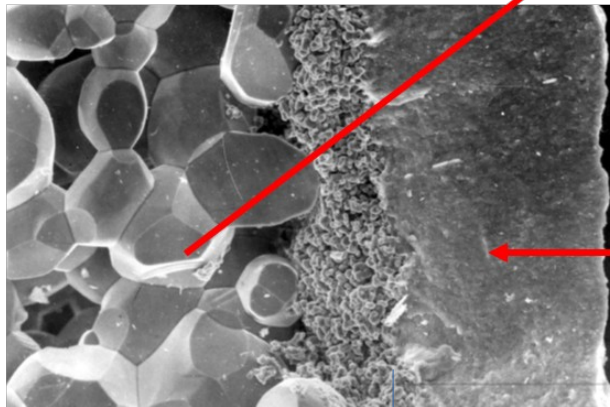
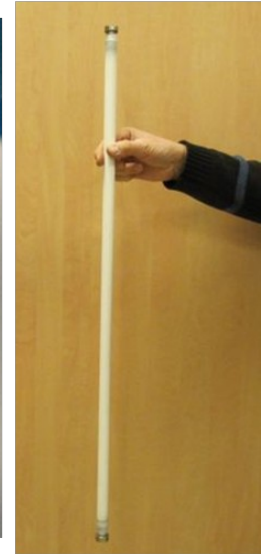
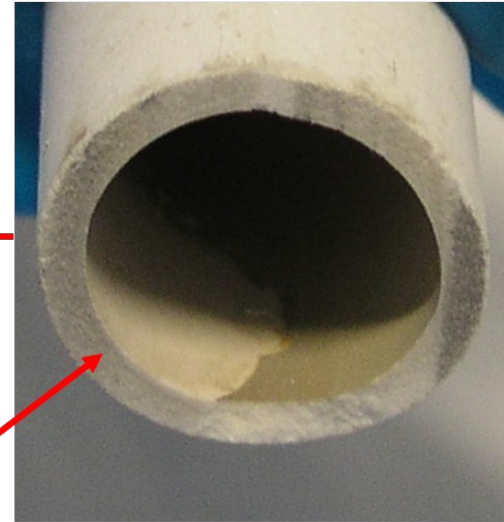
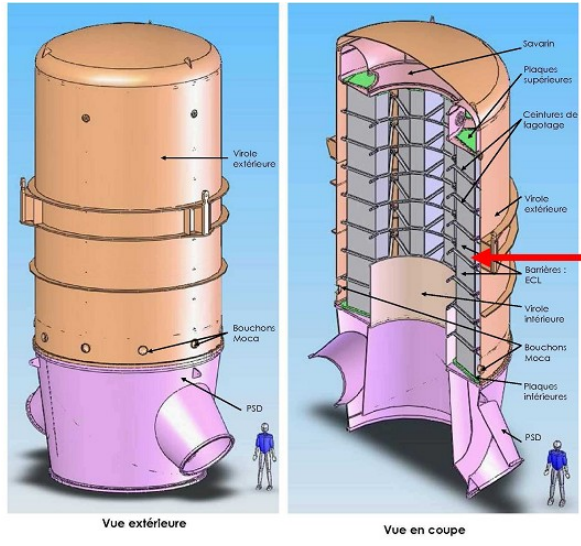
$$E = \frac{1}{2} M V^2 \quad \longrightarrow \quad V = \sqrt{\frac{2E}{M}}$$

Les molécules plus légères circulent plus vite et frappent plus souvent la paroi de la cellule **que celles plus lourdes**.

Principe de la diffusion gazeuse



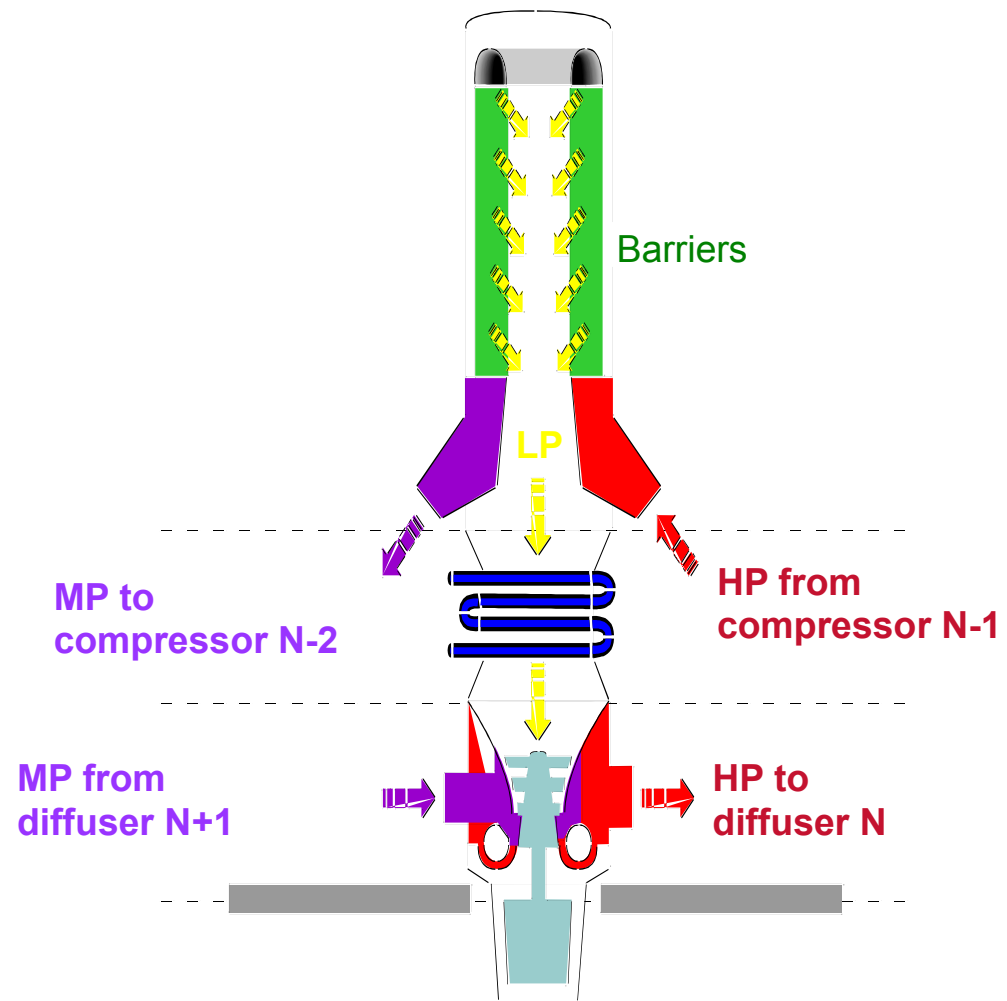
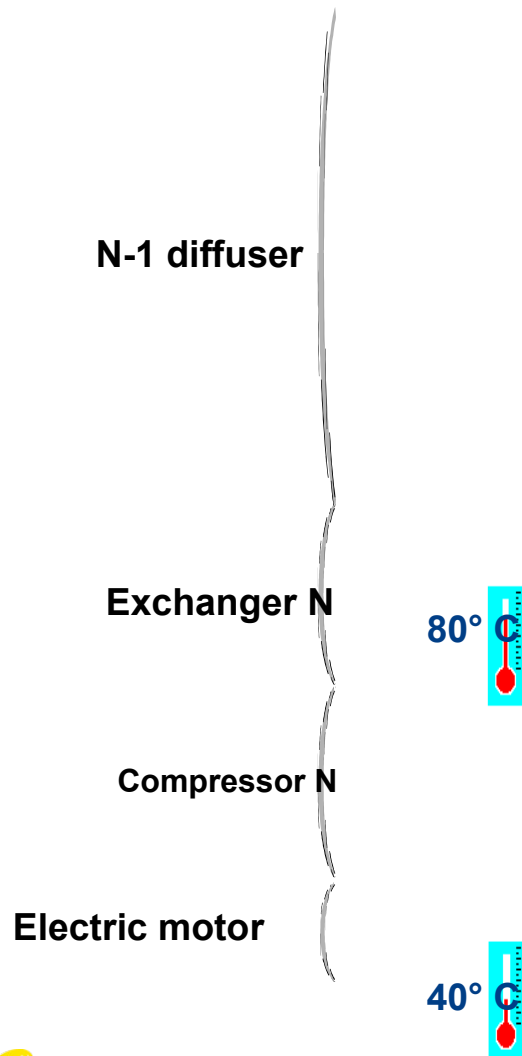
De la couche diffusante au diffuseur



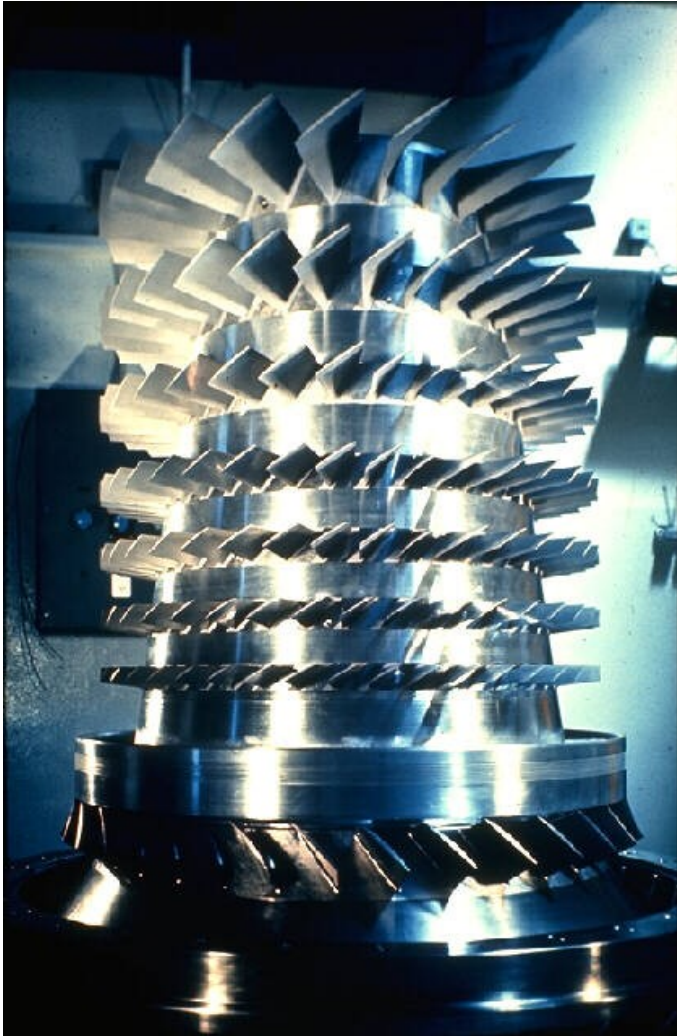
0,1mm

10^{11} pores/cm² $\Phi < 10$ nm

Description d'un étage



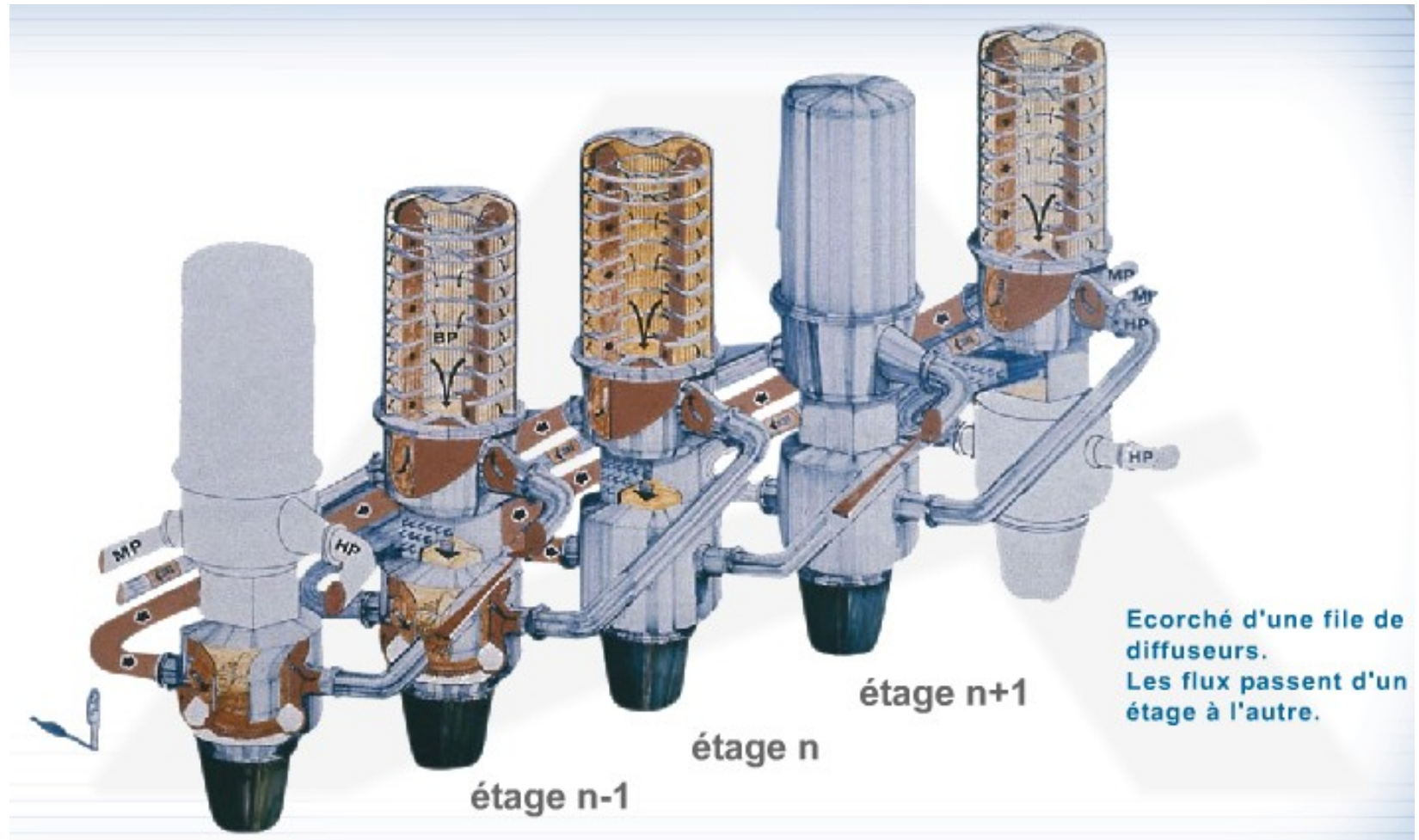
Compresseur



► Puissance moteur :

- ◆ 0.7 MW
- ◆ 1.5 MW
- ◆ 3.2 MW

Etages de diffusion



Diffusion gazeuse: facteur de séparation

Coefficient d'enrichissement idéal:

$$\alpha^* = 1,0043$$

Coefficient d'enrichissement réel:

$$\alpha - 1 = (\alpha^* - 1) S Z \ell$$

- S = coefficient de lame mince
- Z = coefficient aérodynamique
- ℓ = rendement de pression

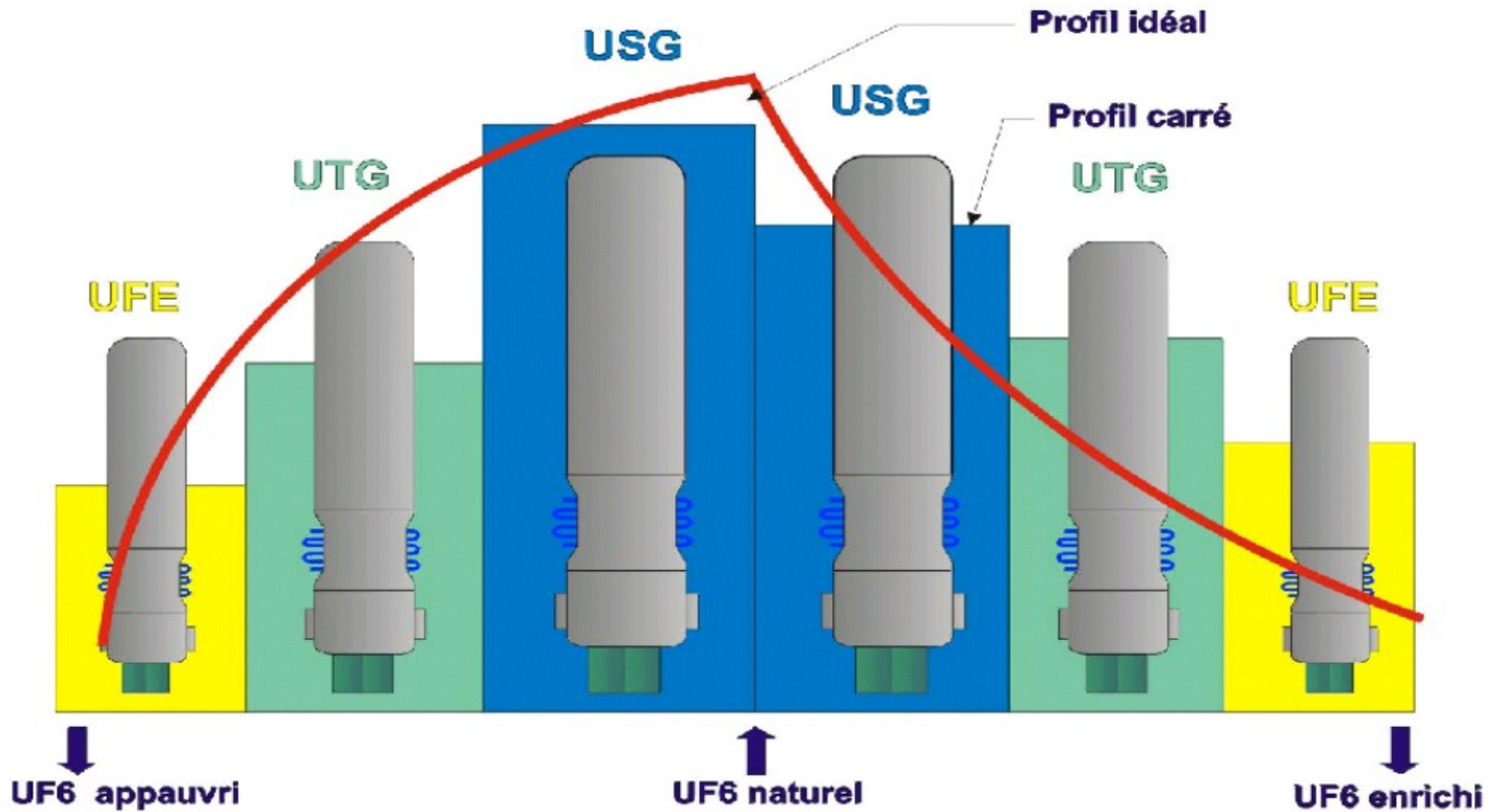
Coefficient d'enrichissement EUODIF:

- $S = 0,70$; $Z = 0,95$; $\ell = 0,69$

$$\alpha = 1,002$$

Cascade d'EURODIF

1400 étages / 10 MUTS / Puissance électrique 2700 MW



EURODIF

La diffusion gazeuse était utilisée dans l'usine Georges Besse d'Eurodif (de 1978 à 2012) et par USEC aux Etats-Unis (arrêt en 2013).



04

Centrifugation

La centrifugation : une technologie performante et éprouvée

Les progrès réalisés à la fin des années 1980, en matière de résistance des matériaux en fibre de carbone, lui ont permis de devenir la technologie la plus performante.



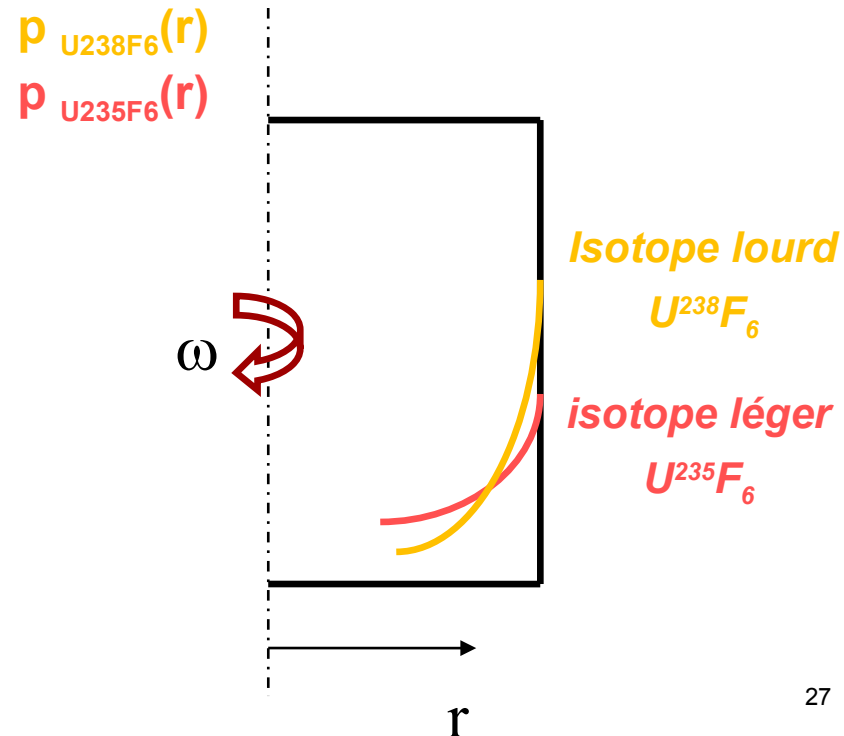
Principe de la Centrifugation

► Facteur de séparation radiale

$$\alpha = \exp[(M_2 - M_1) (\omega r)^2 / 2RT]$$

► Exemples :

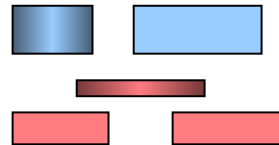
- $\omega r = 825 \text{ m/s} \Rightarrow \alpha = 1.5$
- $\omega r = 350 \text{ m/s} \Rightarrow \alpha = 1.07$



Une centrifugeuse?

Un bol allongé

constitué de plusieurs tronçons
entre deux paliers
entraîné par un moteur



tournant dans le vide (pompe)



Une alimentation en UF6

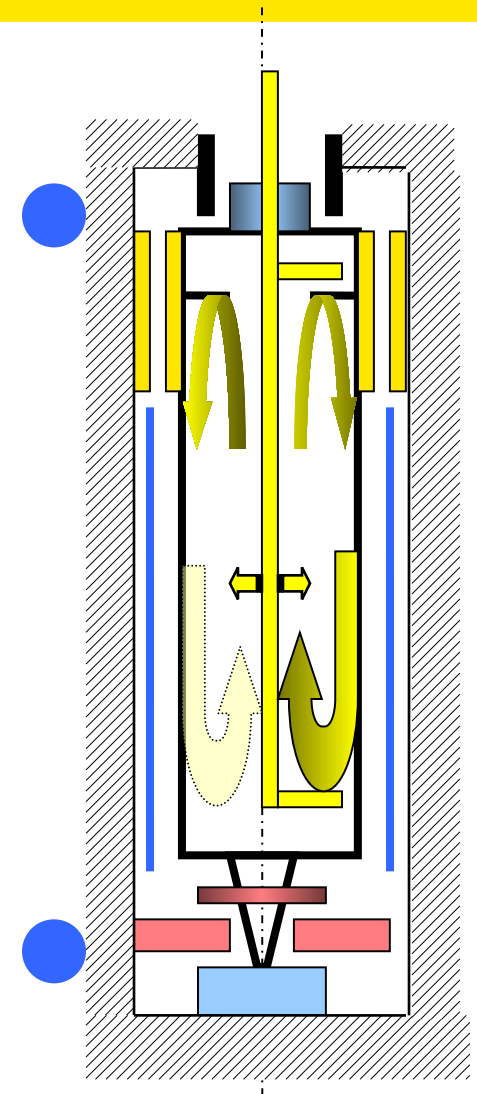
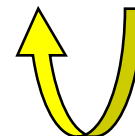


Des écopes de prélèvement



Moteurs de contre courant

- gradient thermique
- baffles



L'effet de la force centrifuge

L'effet d'un champ de forces peut se quantifier en nombre de g

- 1 g est équivalent à la gravité terrestre

Quelques exemples de forces centrifuges

- Pour les passagers de machine de fête foraine : 4 g
- Machine à laver en essorage (1400 tr/mn) : 500 g

Centrifugeuse de GBII ?

500 000 g !

- Un balourd rotor de 1 gramme au repos appliquerait une force de 500 kg

Centrifugation vs diffusion gazeuse

► Gaseous Diffusion stage at Eurodif plant

- Stage flow
- α
- capacity

60 to 360 kg UF₆/s
 $\alpha \sim 1,002$
2 000 to 13 000 SWU/year

► Centrifugation

- *Machine flow*
- α
- *depletion*
- *capacity*

A few tenths of kg UF₆/h

$\alpha \sim 1,1$ to 2

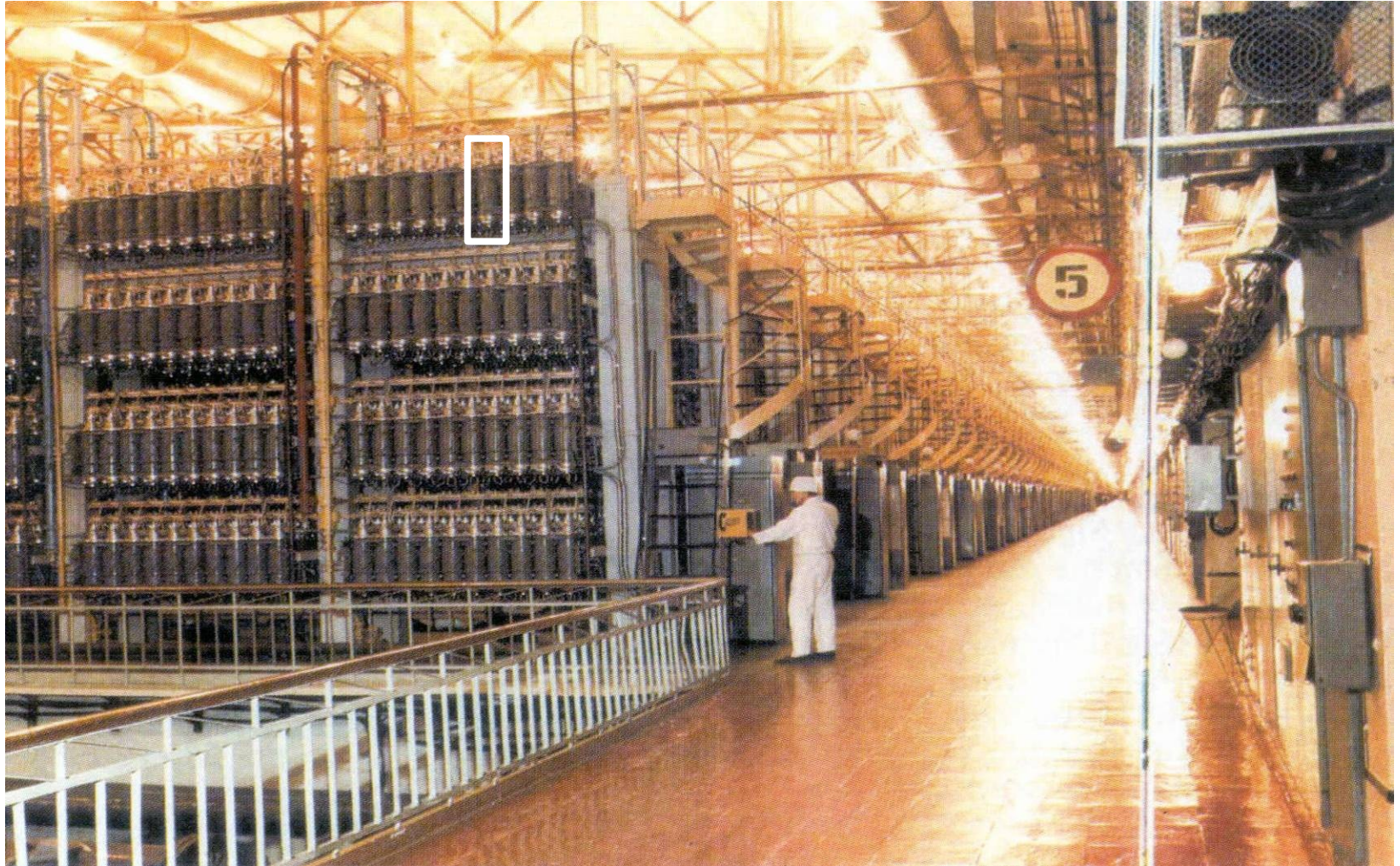
$\beta \sim 0,9$ to 0,4

3 to 300 SWU / year

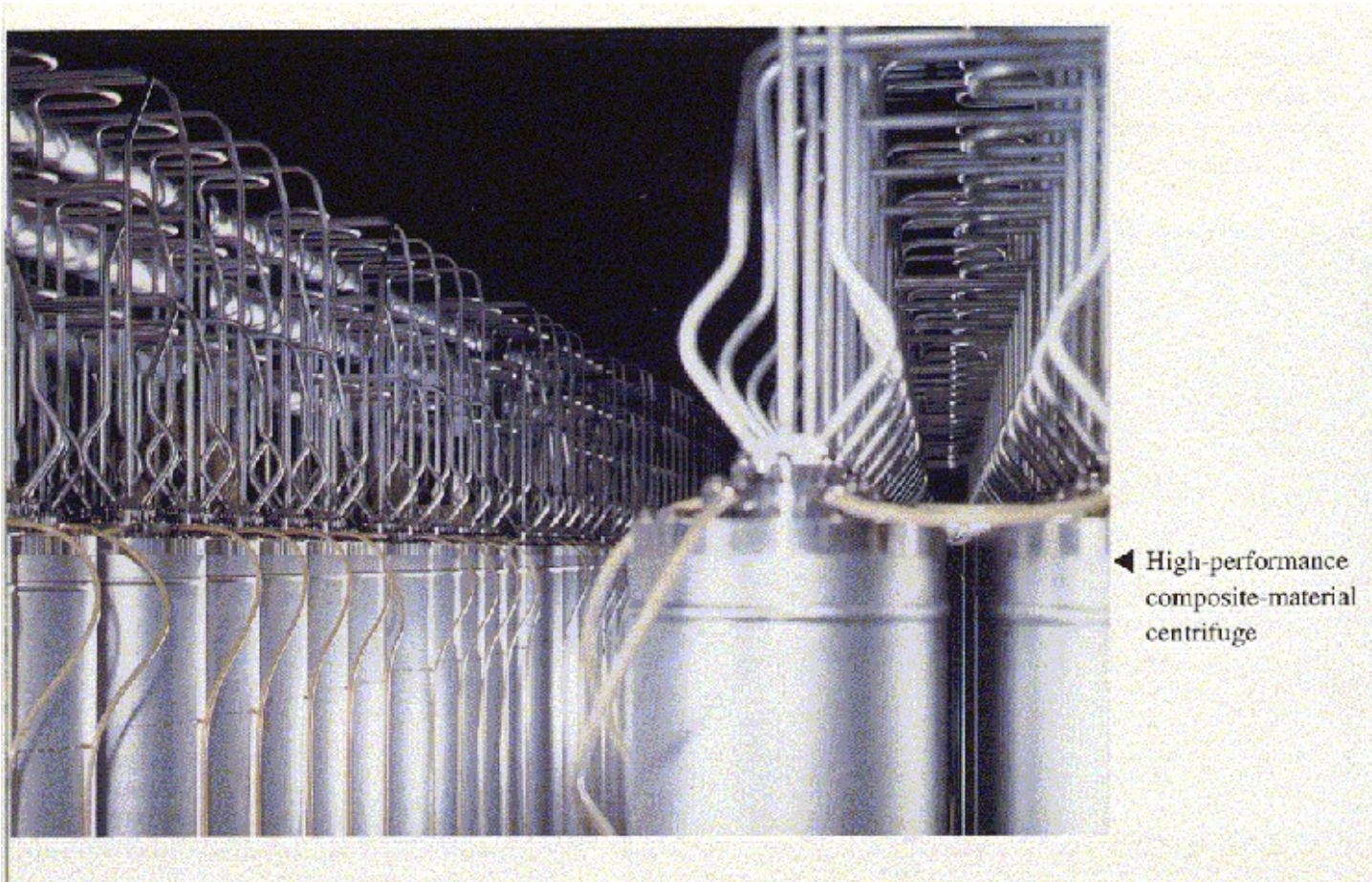
URENCO/ORANO : TC12



Centrifugeuses russes



Cascades japonaises



Centrifugeuses américaines



Centrifugeuses coréennes



05

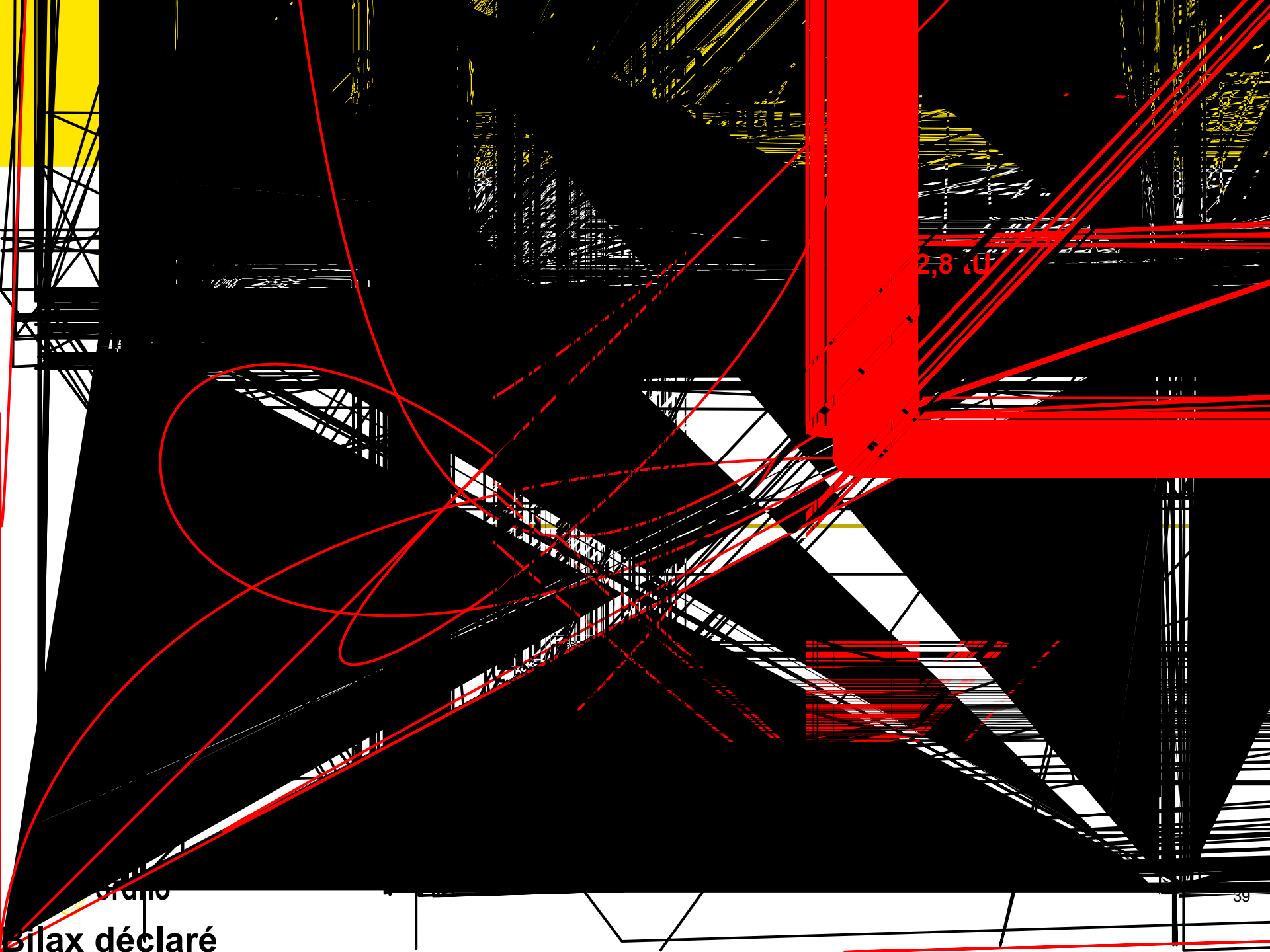
Risques de prolifération

Risques de prolifération

3 voies de prolifération :

- Plutonium 239 (~80% Pu 239), ~10 Kg
- Uranium 233, ~ 15kg (irradiation par neutrons du thorium-232)
- Uranium 235 (HEU ~95%), ~50 Kg

L'enrichissement de l'uranium est sensible et fait l'objet de très nombreux contrôles



2,8 .U

Grande
Bilax déclaré



IAEA Headquarters, Vienna

IAEA

- The International Atomic Energy Agency (IAEA) is the world's foremost forum for scientific and technical cooperation in the peaceful use of nuclear technology. Established by the United Nations as an independent organization in 1957, the IAEA serves one hundred and fifty nine Member States.
 - is an independent intergovernmental, science and technology-based organization, in the United Nations family, that serves as the global focal point for nuclear cooperation;
 - assists its Member States,
 - develops nuclear safety standards
 - verifies through its inspection system that States comply with their commitments, under the Non-Proliferation Treaty and other non-proliferation agreements, to use nuclear material and facilities only for peaceful purposes.

06

L'usine GBII d'Orano Tricastin

Technologie TC12 et TC12+

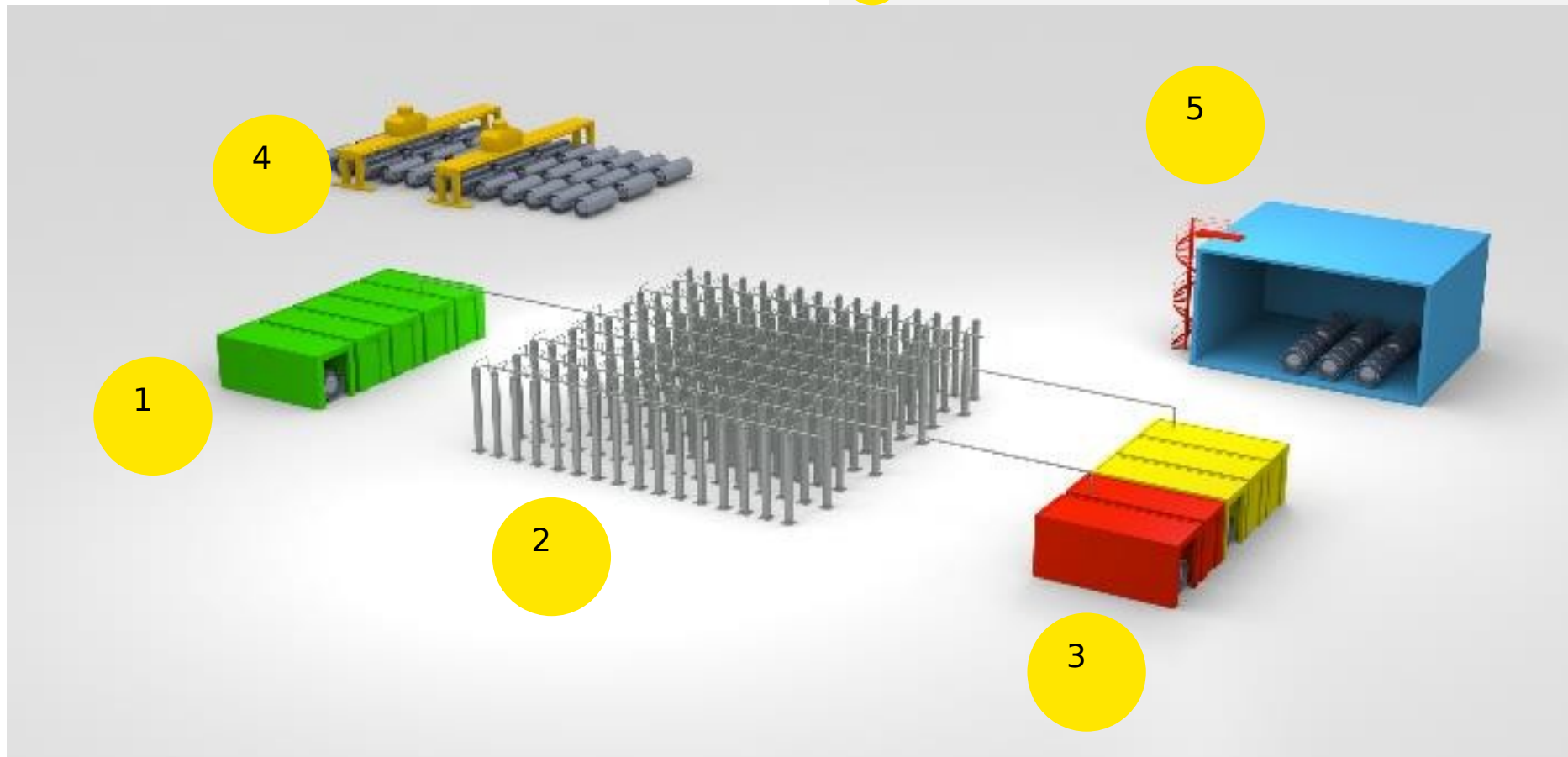




Enrichissement de l'uranium par centrifugation

Usine Georges Besse II

- 1 Alimentation ; émission
- 2 Enrichissement
- 3 Soutirage
- 4 Pesée et entreposage
- 5 Contrôles RECI







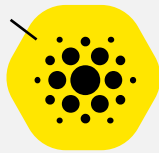
**RECII : échantillonnages,
contrôles avant
expédition**



**Encoquage pour
transport**

Renouvellement des installations Orano : usine Georges Besse II

LE PLUS GRAND COMPLEXE
D'ENRICHISSEMENT
EN EUROPE



2
usines

Sud & Nord

(RECII)

Un atelier
support

7,5
MUTS

Capacité
nominale
atteinte en 2016

(TC12+)

Technologie
la plus compétitive
dans le monde,
efficace et éprouvée;
la dernière génération
de centrifugeuses

SÛRETÉ



— Confinement renforcé
— Résistance sismique

PERFORMANCES
ENVIRONNEMENTALES



-98%

Consommation
d'énergie

-100%

Consommation
d'eau

GEORGES BESSE II

2011 – Mise en service usine Sud
2013 – Mise en service usine Nord
2014 – Pleine capacité usine sud
2015 – Mise en service RECII
2016 – Pleine capacité 7,5 MUTS

Georges
Besse II
NORD



REC II



Georges
Besse II
SUD



Comparaison entre les technologies des usines EURODIF et Georges Besse II

USINE D'EURODIF

Jusqu'à **5%**

1 cascade (1400 diffuseurs)

3 000 tonnes UF6

1,5 bars (annexe 2,5 bars)

2 500 MW

Plusieurs fois/an/groupe

26 millions m³/an

2 à 11 MUTS/an

Par bâtiment – usine

1 100 salariés

ENRICHISSEMENT

PROCÉDÉ

HOLD-UP PROCÉDÉ

PRESSION PROCÉDÉ

CONSOMMATION ELECTRIQUE

ARRÊTS POUR MAINTENANCE

EAU DE REFROIDISSEMENT

CAPACITÉ INSTALLÉE

DÉMARRAGE

EFFECTIF

USINE GEORGES BESSE II

Jusqu'à **6%**

112 cascades

Environ **3 tonnes** UF6

< 0,5 bars (annexe 0,5 bars)

50 MW

Fonctionnement continu

Pas de prélèvement d'eau

7,5 MUTS/an

Modulaire

< 400 salariés



07

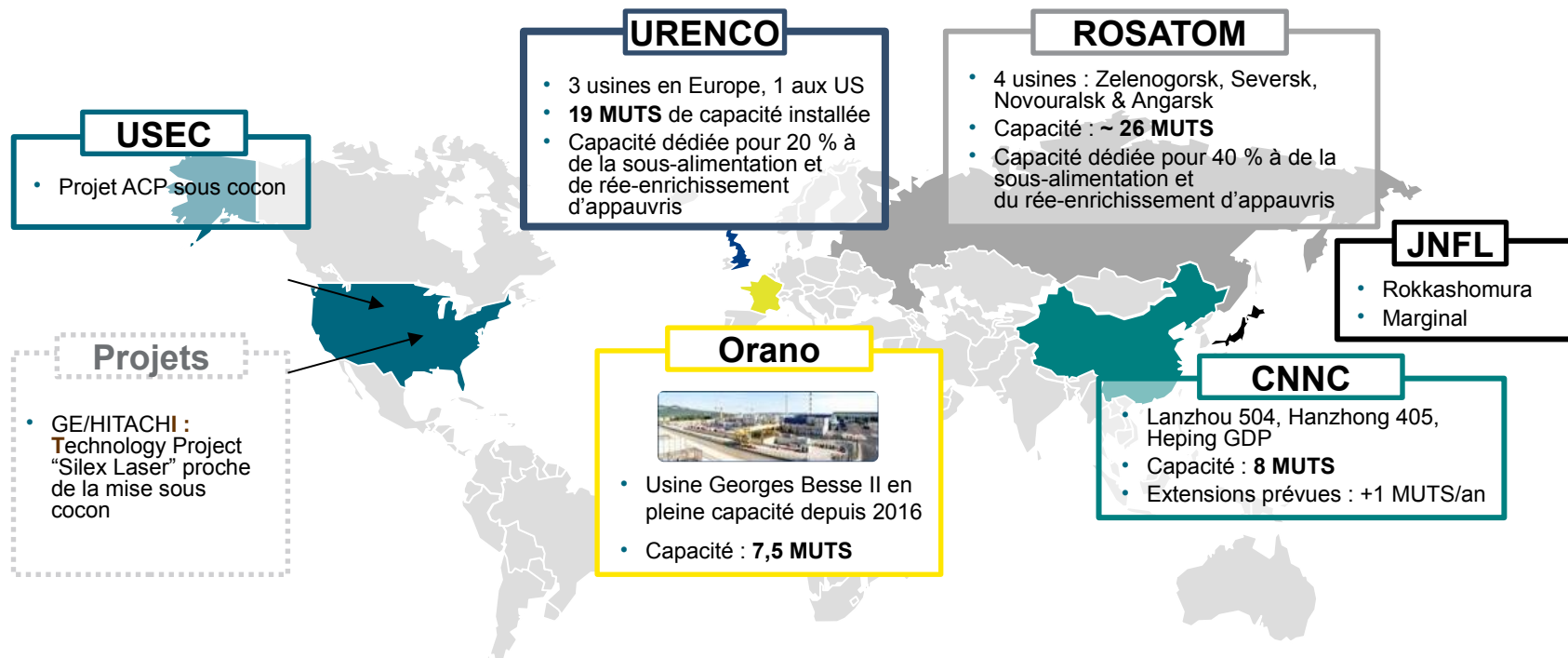
Le marché de l'enrichissement et perspectives

Réacteurs en Fonctionnement

En Août 2024, l'AIEA dénombre 415 réacteurs de puissance opérationnels dans le monde et 61 en construction (<https://pris.iaea.org/PRIS>)



Les acteurs de l'enrichissement



CA

Sources: Trade Press and Orano estimates

Capacité mondiale:

Tenex = 45%

Urenco = 25%

Orano = 12%

Cours de l'uranium (\$/livre)



Chantier Extension GBII

+ 4 modules

Capacité +30%

1,7 milliard €

[Lien vidéo](#)

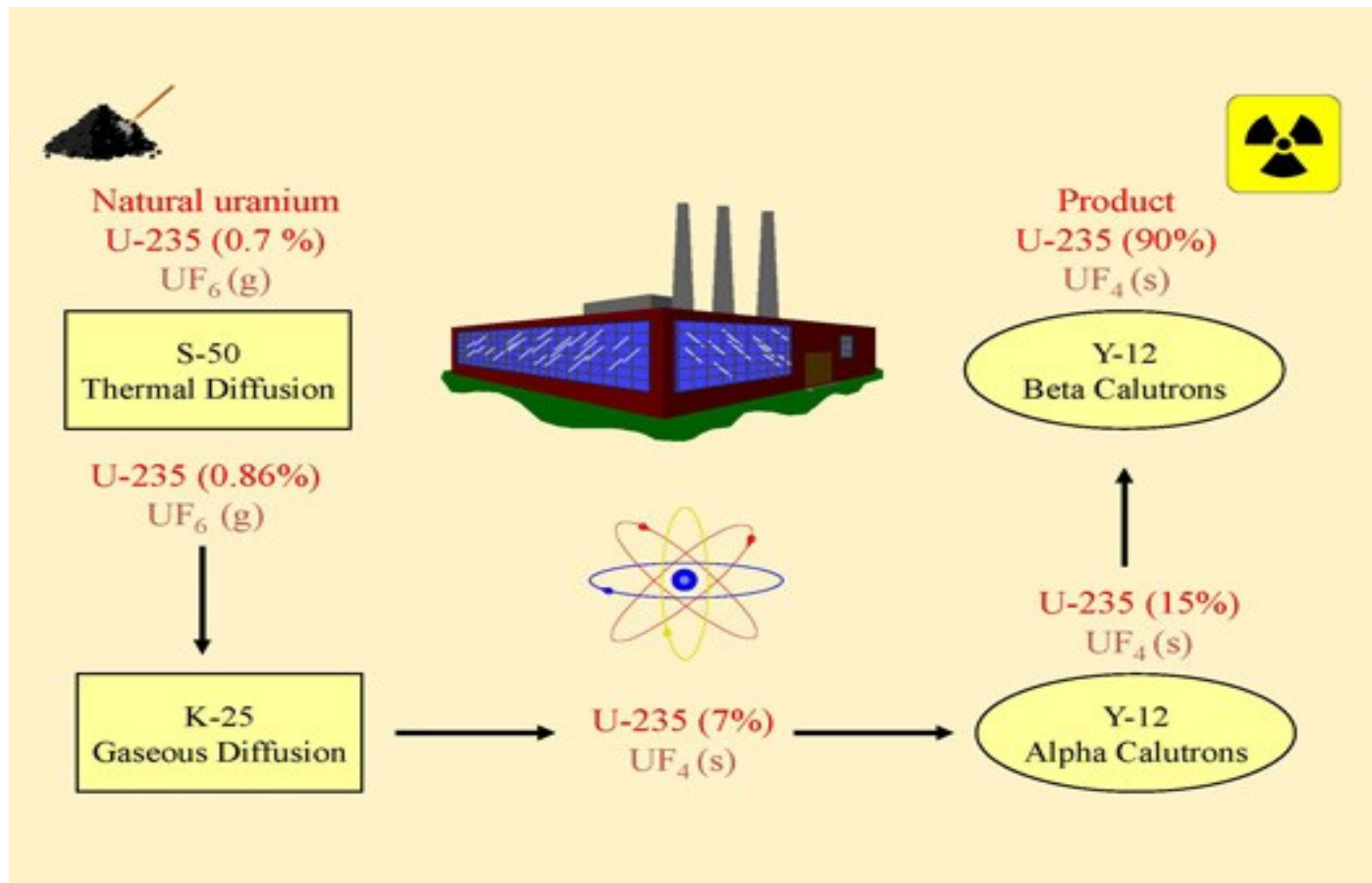


08

Autres Procédés :

- Electromagnétiques
- Lasers (AVLIS, MLIS, SILEX)
- (+ Chimique, Aérodynamique)

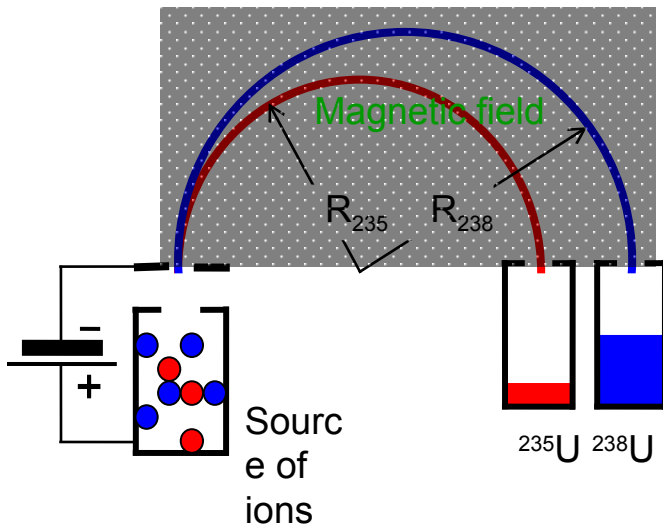
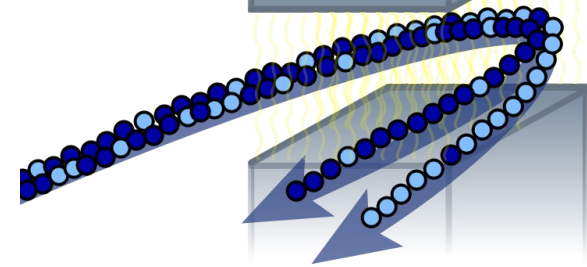
Manhattan project



Electromagnetic Methods

Le calutron

$$\alpha \gg 1$$



*Limitation by space charge effect
Max : $\sim 100 \text{ mA}$*

feed = $0,2 \text{ kg/y/element}$

Product > 90%

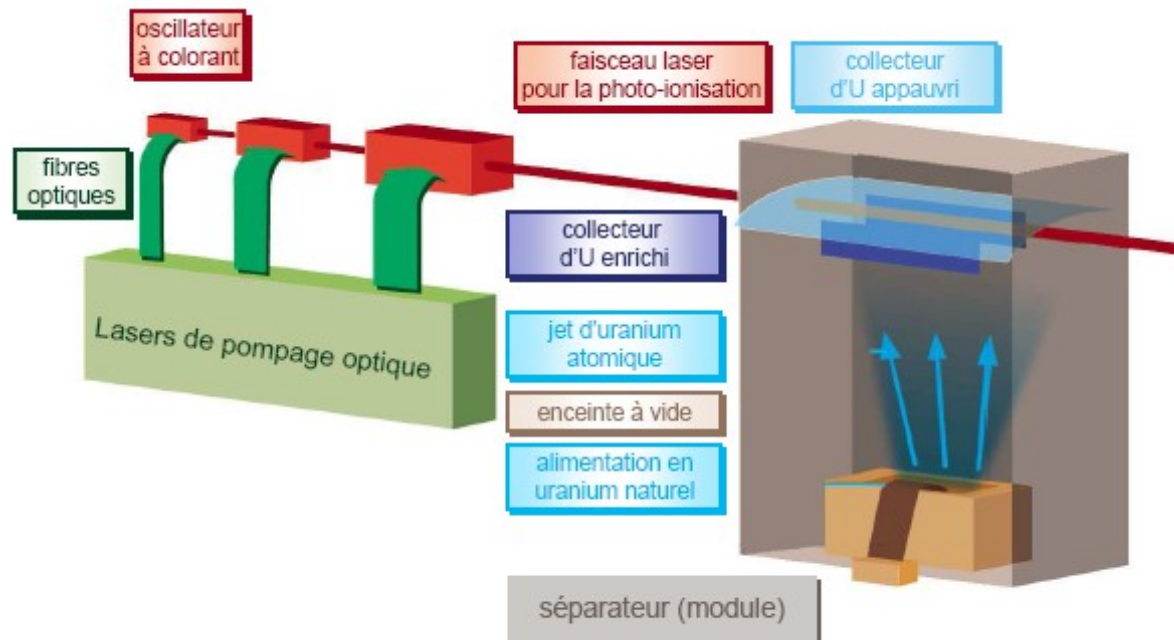
Long time but efficient !

$$R = \frac{c}{H} \sqrt{\frac{2ME}{e}}$$

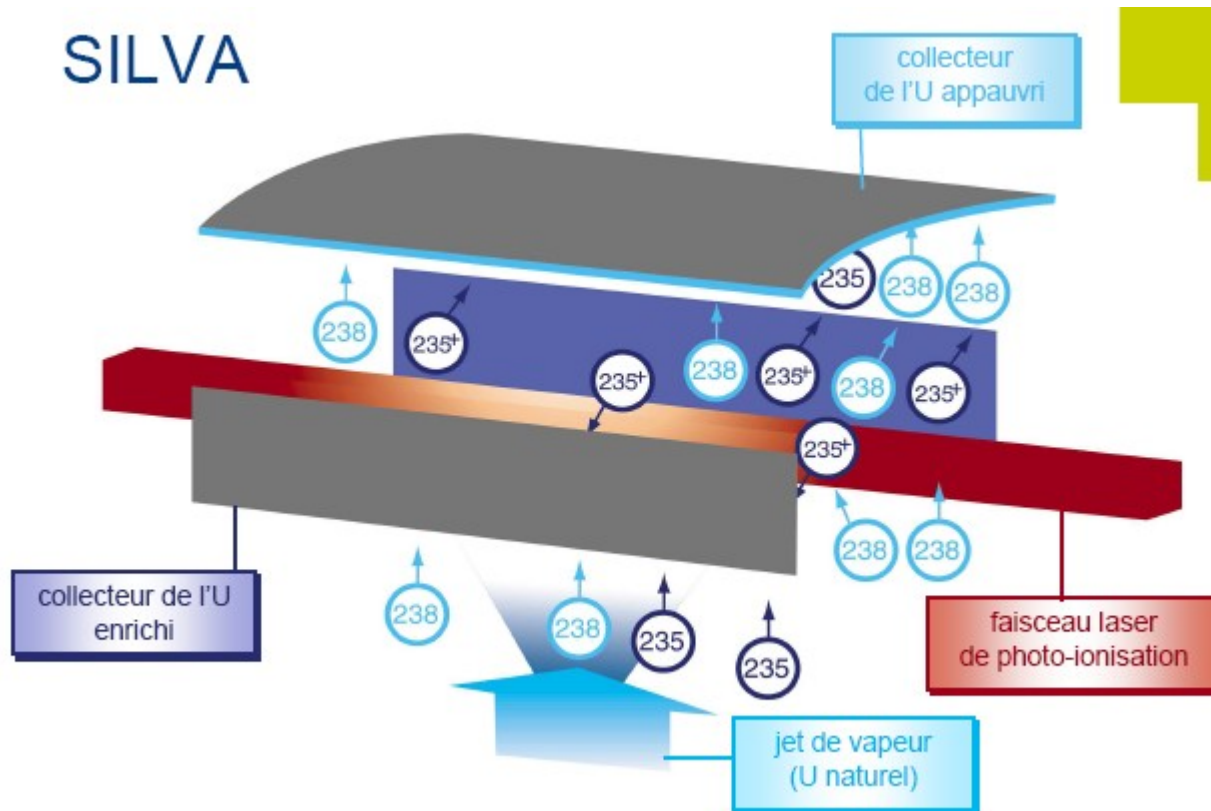
Procédé laser : vapeur métallique (SILVA)

Dans un séparateur AVLIS une source de vapeur d'uranium envoie un jet d'atomes neutres dans une cellule de séparation.

Un faisceau de lumière laser ionise sélectivement l'isotope ^{235}U du jet atomique ; l'extraction des ions $^{235}\text{U}^{++}$ formés dans cette zone d'irradiation est faite au moyen de deux plaques métalliques latérales



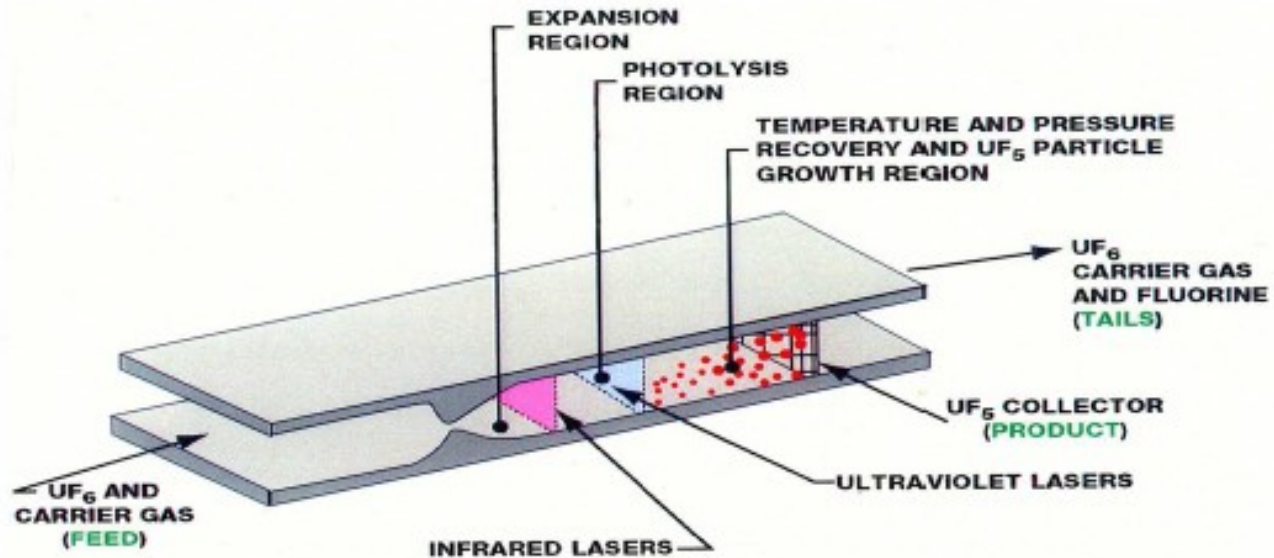
SILVA



Procédé laser moléculaire (MLIS)

- ▶ Gaz UF₆ détendu dans une tuyère supersonique qui gèle les degrés de liberté de rotation de la molécule.
- ▶ Dissociée par le laser, la molécule ²³⁵UF₆ devient du ²³⁵UF₅, que l'on sépare de ²³⁸UF₆ gazeux.

MOLECULAR LASER ISOTOPE SEPARATIONS



Procédé Laser SILEX

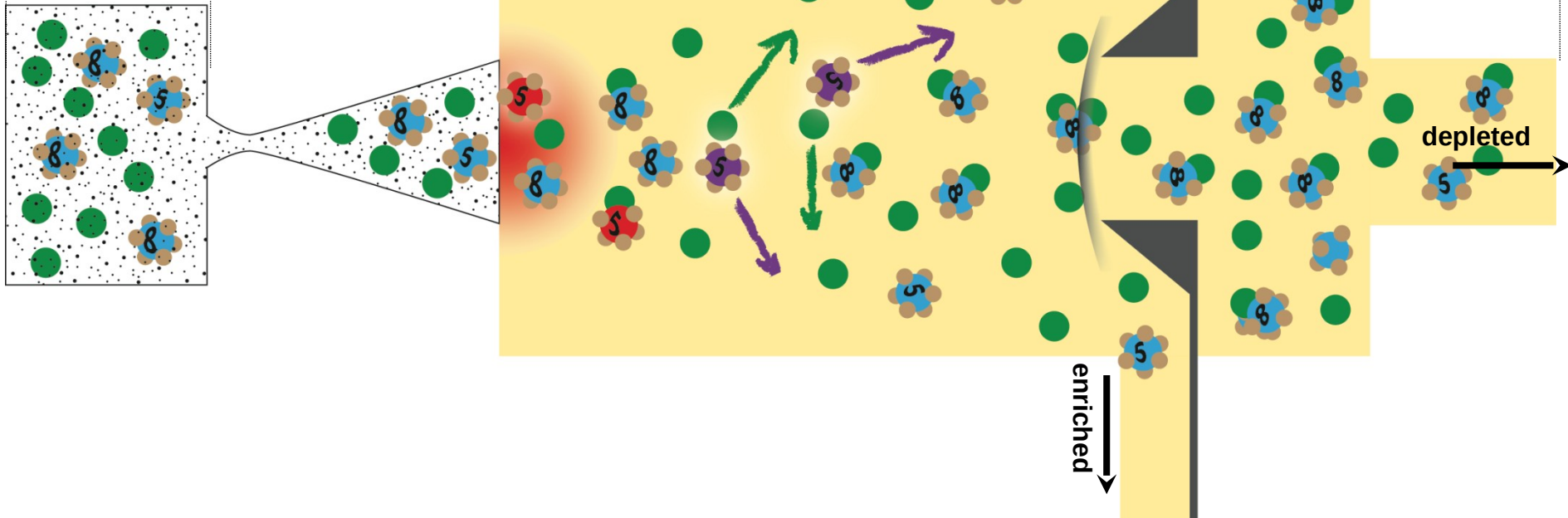
UF_6 ($\approx 1\%$) +
carrier gas
Ar(95%)
He(5%) ?

Laval nozzle
(temperature
 $\approx 30\text{ K}$)
Formation of
clusters
 $\text{UF}_6\text{-G}$

irradiated
 $^{235}\text{UF}_6$
with laser
 $16\text{ }\mu\text{m}$

The **clusters** $^{235}\text{UF}_6\text{-G}$ are
unstable
 $^{235}\text{UF}_6$ Diffuse towards the
outside

Séparation of $^{235}\text{UF}_6$ and
clusters $^{238}\text{UF}_6\text{-G}$



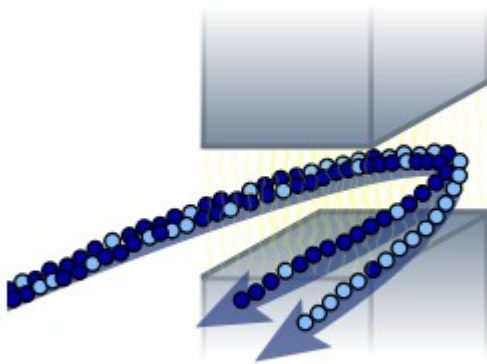
**MERCI
POUR
VOTRE
ATTENTI
ON**

??? Place aux questions ???

Procédés électromagnétiques

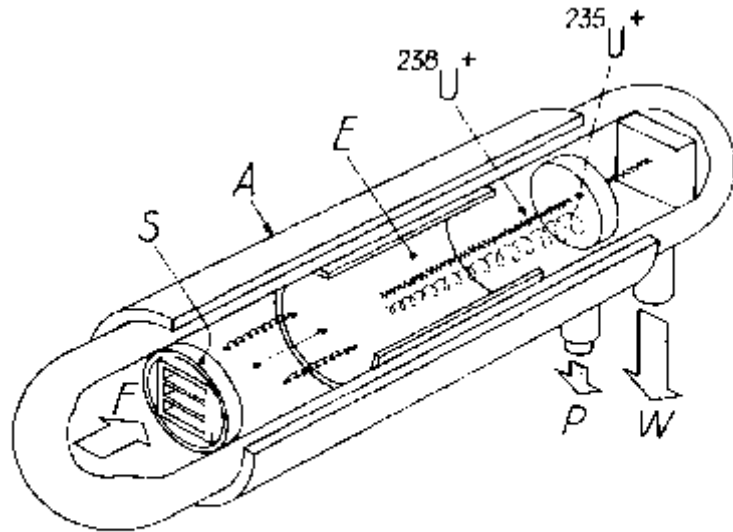
Spectromètre de masse et calutron

Une particule chargée qui se déplace dans un champ magnétique suit une trajectoire curviligne dont le rayon dépend de sa masse

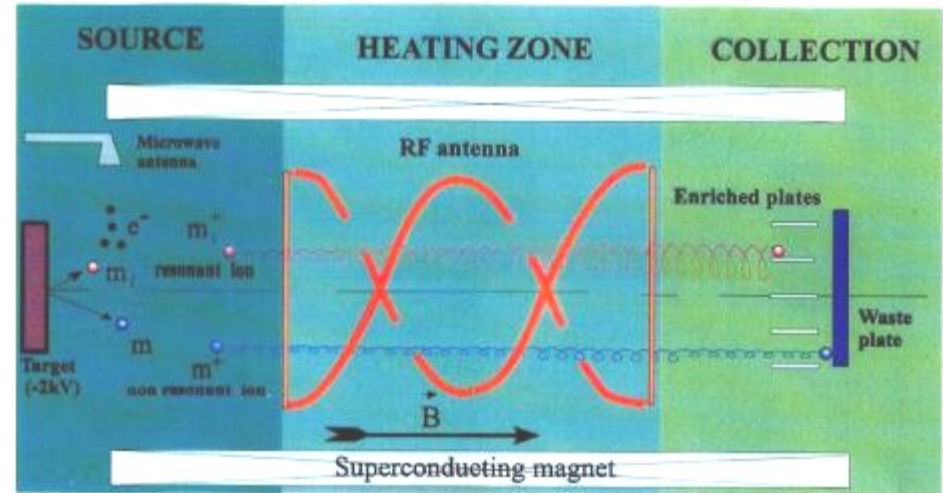


Usine de séparation électromagnétique
Y12 (Oak Ridge)

Procédés électromagnétiques



A	aimant supraconducteur	S	source
E	espace d'excitation	$^{238}\text{U}^+$	trajectoire résonnante
F	alimentation	$^{235}\text{U}^+$	trajectoire non résonnante
P	produit	W	rejet



Résonance Cyclotronique Ionique

- Une plaque d'uranium métallique est utilisée comme source d'atomes d'U
- Le jet de plasma émis traverse axialement un espace de tri où sont superposés un champ magnétique intense et un champ électrique oscillant à la fréquence cyclotron ionique de l'ion $^{235}\text{U}^+$
- Le rayon de giration de l'ion $^{238}\text{U}^+$ non résonant s'annule périodiquement, tandis que celui de $^{235}\text{U}^+$ s'accroît avec le temps de transit dans l'espace de séparation. Les trajectoires en hélice divergentes des ions résonants sont interceptées par des fanons parallèles au jet de plasma. Les ions non résonants passent entre les fanons et sont recueillis sur une plaque d'impact perpendiculaire au jet de plasma.

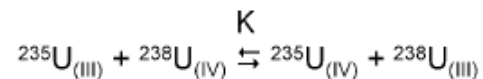
Chemical Exchange

CHEMEX

Ions exchange reaction between U(III) in aqueous solution and U(IV) in organic solution

SEPARATION FACTOR	1.0025 – 1.0026
ENERGY CONSUMPTION	~ 360 kWh/SWU ELECTRICITY 330,000 kcal/SWU STEAM
SPECIFIC INVENTORY	1.1 kg U/SWU/YEAR
EQUILIBRIUM TIME (for 3% ²³⁵ U product)	~ 150 DAYS
PROCESS MATERIAL	U _(III) IN AQUEOUS SOLUTION U _(IV) IN ORGANIC SOLUTION
FACILITY SIZE	SMALL – MODERATE

U238 is concentrated in ions U(III) and
U235 in ions U(IV)



EQUILIBRIUM CONSTANT K = 1.0025 TO 1.0026

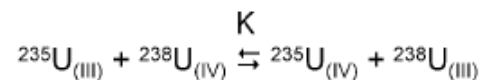
Procédés chimiques

CHEMEX

Echange entre les ions U(III) et U(IV)
entre une solution aqueuse et organique

SEPARATION FACTOR	1.0025 – 1.0026
ENERGY CONSUMPTION	~ 360 kWh/SWU ELECTRICITY 330,000 kcal/SWU STEAM
SPECIFIC INVENTORY	1.1 kg U/SWU/YEAR
EQUILIBRIUM TIME (for 3% ²³⁵ U product)	~ 150 DAYS
PROCESS MATERIAL	U _(III) IN AQUEOUS SOLUTION U _(IV) IN ORGANIC SOLUTION
FACILITY SIZE	SMALL – MODERATE

U²³⁸ se concentre dans les ions U(III) et
U²³⁵ dans les ions U (IV)

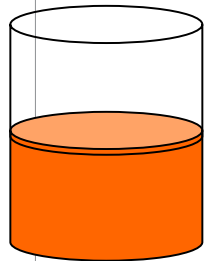


EQUILIBRIUM CONSTANT K = 1.0025 TO 1.0026

Chemical Exchange

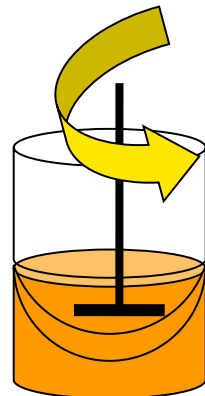
CHEMEX (Liq. – Liq.)

Enrichment based on the difference of constant of balance of oxidation-reduction between valency III and IV of the uranium for both isotopes

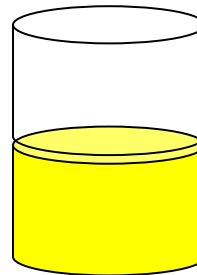


organic phase

N_F



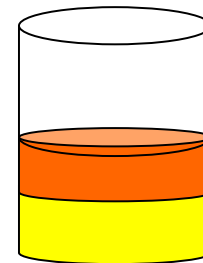
Mixing



Aqueous phase

^{235}U concentration in organic phase increases progressively

$$\alpha = 1,0027$$

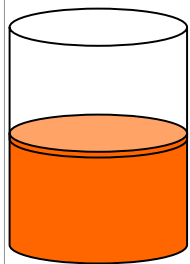


$N' > N_F$
 $N'' < N_F$

Decantation

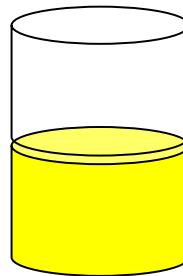
Procédés chimiques

Enrichissement basé sur la différence de constante d'équilibre d'oxydo-réduction entre les valences III et IV de l'uranium pour les deux isotopes.



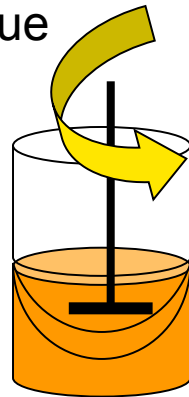
Phase
organique

Teneur N_F



Phase aqueuse

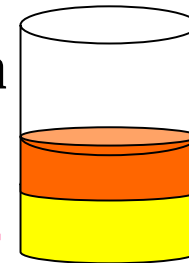
Teneur N_F



Mélange

La phase organique
s'enrichit progressivement en ^{235}U

Décantation



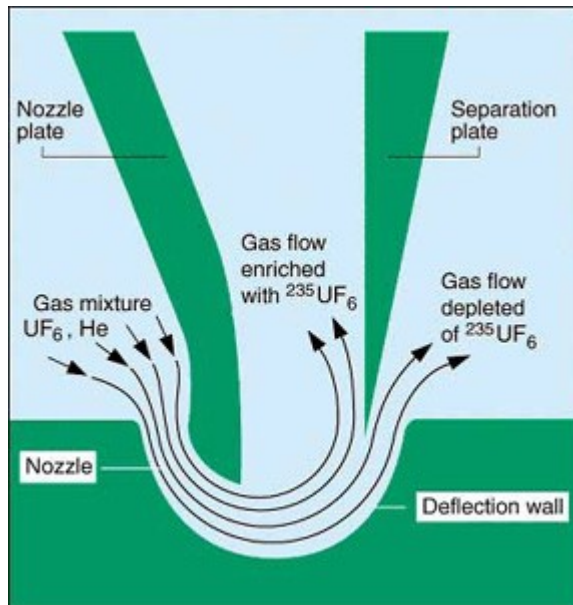
Teneur $N' > N_F$

Teneur
 $N'' < N_F$

$\alpha = 1,0027$

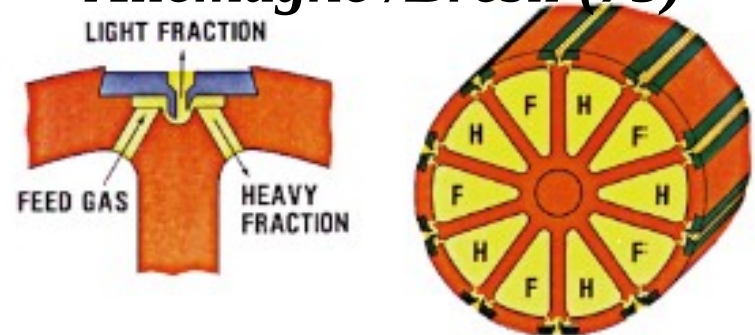
Procédés aérodynamiques

Vortex de Becker



$\alpha \sim 1,014$ par étage Vortex

Allemagne /Brésil (75)



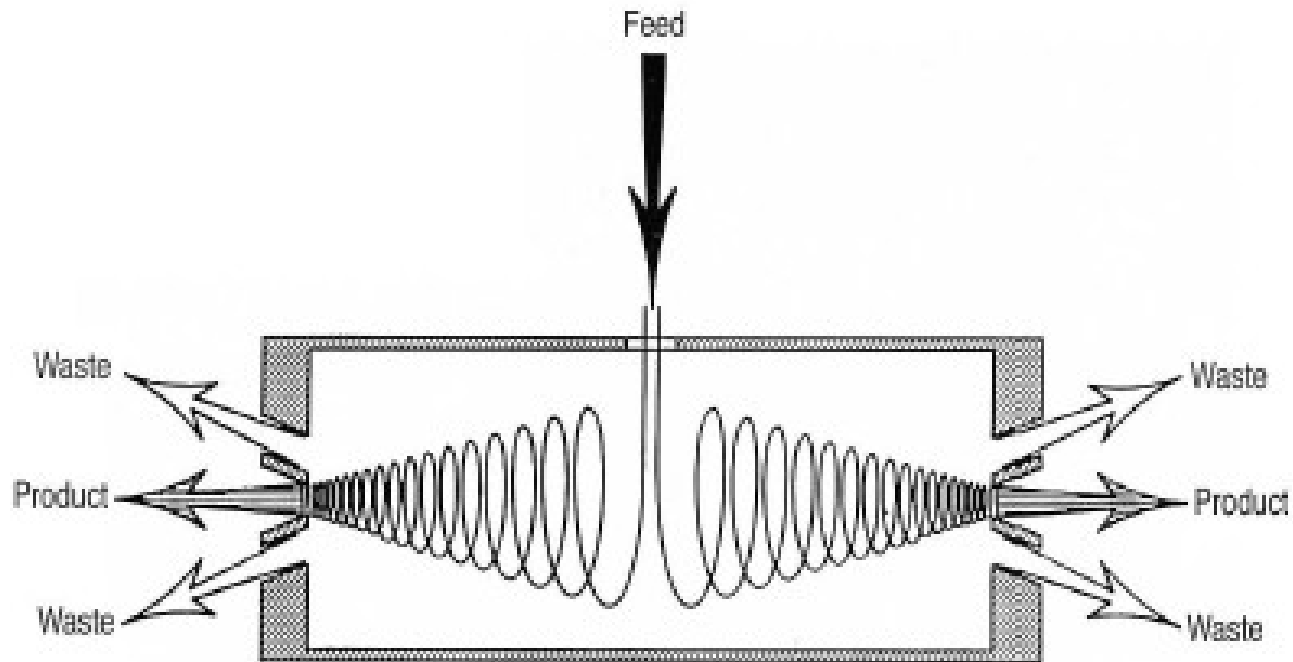
Procédés aérodynamiques

Autre vortex

Une alimentation périphérique fait tourner très rapidement le mélange gazeux à séparer dans un cylindre fixe.

Le gaz prélevé sur l'axe du vortex ainsi créé est enrichi en isotope de masse légère .

$\alpha \approx 1,03$



La mise en cascade en série

Exemple calcul du nombre d'étages d'enrichissement d'une cascade symétrique:

Données d'entrée:

- $N_p = 3,5\%$ (demande client)
- $N_t = 0,19\%$ (donnée économique)
- $N_f = 0,711\%$ (Uranium naturel)
- $\alpha = 1,002$
- $\beta = 0,998$

rappels:

et

A.N. :

$$n_e = 812$$

$$n_a = 663$$

Soit 1475 étages !!!

La surveillance environnementale

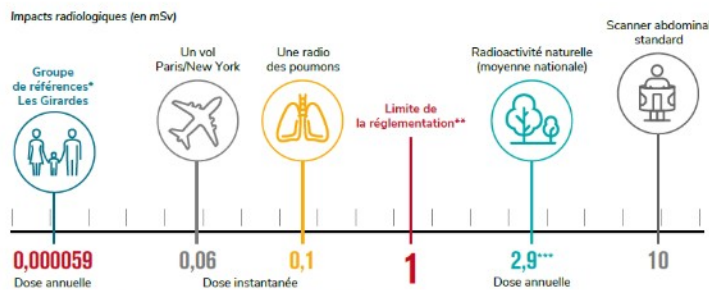
INVESTISSEMENT + 320 POINTS DE SURVEILLANCE

+ 32 000 ANALYSES PAR AN

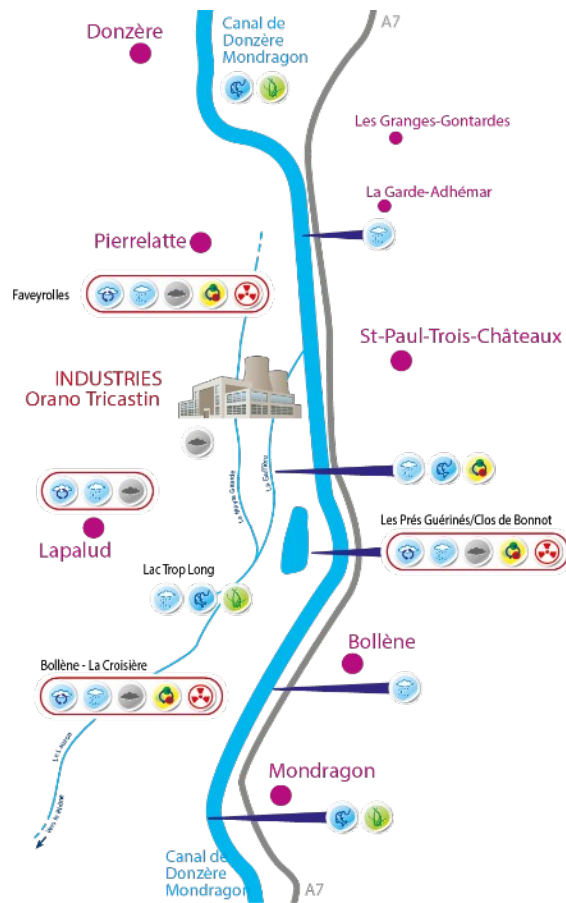
+2,5M€

+ 25000 PRÉLÈVEMENTS

Impacts radiologiques (en mSv)



*Groupes de personnes identifiées comme étant localement les plus exposées à l'impact des rejets du site.
 **Article R 1333-8 du Code de la Santé Publique relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants.
 ***Source : IRSN



Stations de surveillance

- Contrôle de l'air
- Contrôle des eaux de nappe et eaux de surface
- Contrôle des retombées atmosphériques
- Contrôle de la chaîne alimentaire (herbes, céréales)
- Contrôle des poissons
- Contrôle des sédiments et végétaux aquatiques
- Contrôle irradiation

► Product

- ◆ $P = 80 \text{ g/s UF}_6$; $N_p = 4 \%$; $N_w = 0,25 \%$; $N_f = 0,711 \%$ (natural Uranium)
- ◆ $\alpha = 1.002$

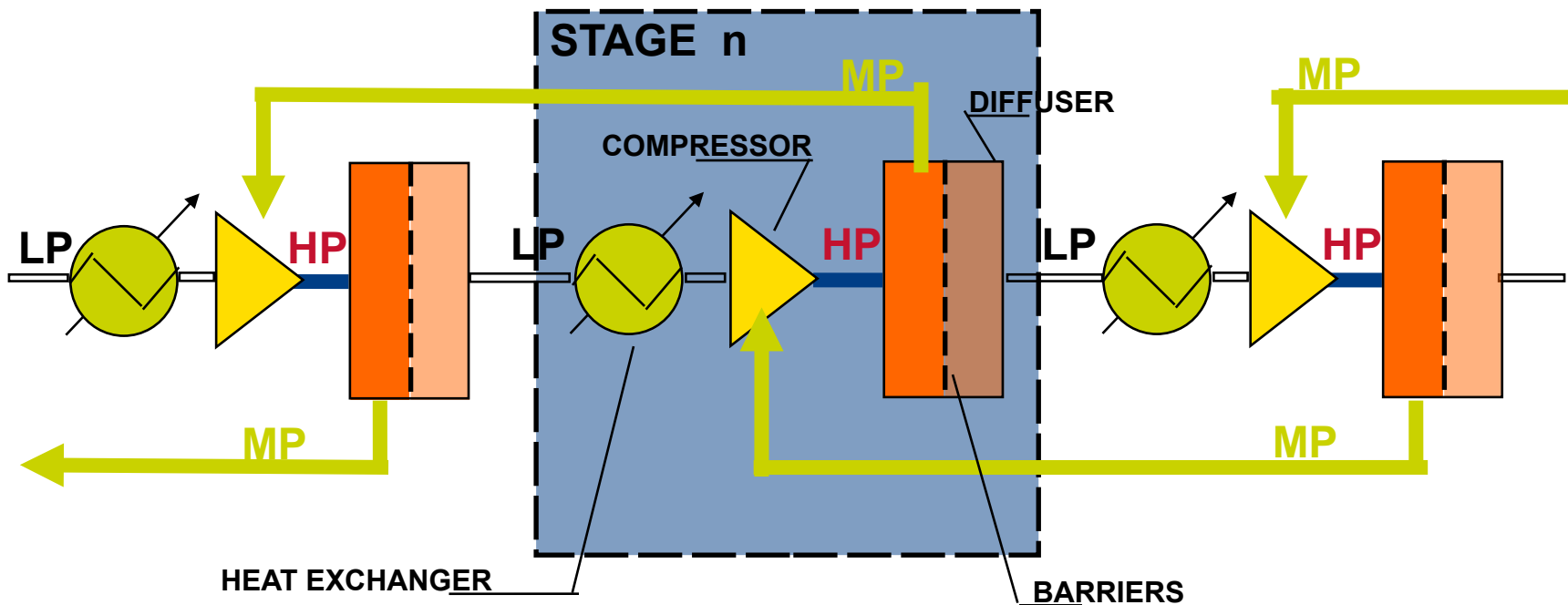
► Plant characteristics:

- ◆ Stages number: $S = 1\,400$
- ◆ stage maximum flow: $L_{\max} = 373\,000 \text{ g/s UF}_6$

$$F = P \frac{N_p - N_w}{N_f - N_w} = 650 \text{ g/s UF}_6$$

- ◆ Yearly SWU production: $\Delta U \approx 10.000.000 \text{ UTS}$

Diagram of a gaseous diffusion stage and cascading



Depleted flow
←
→
Enriched flow

Principe

Effet séparatif radial

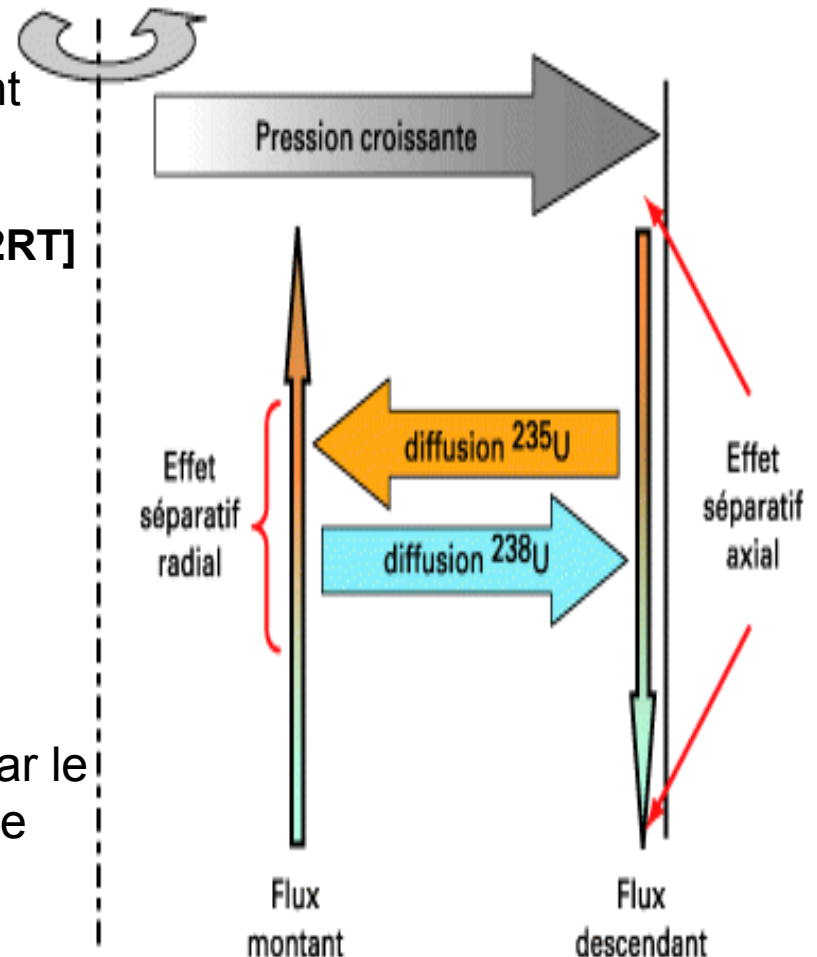
Le gradient de pression radial est différent pour deux corps de masses différentes.

Coef d'enrichissement = $\exp[(M_2 - M_1) (\omega r)^2 / 2RT]$

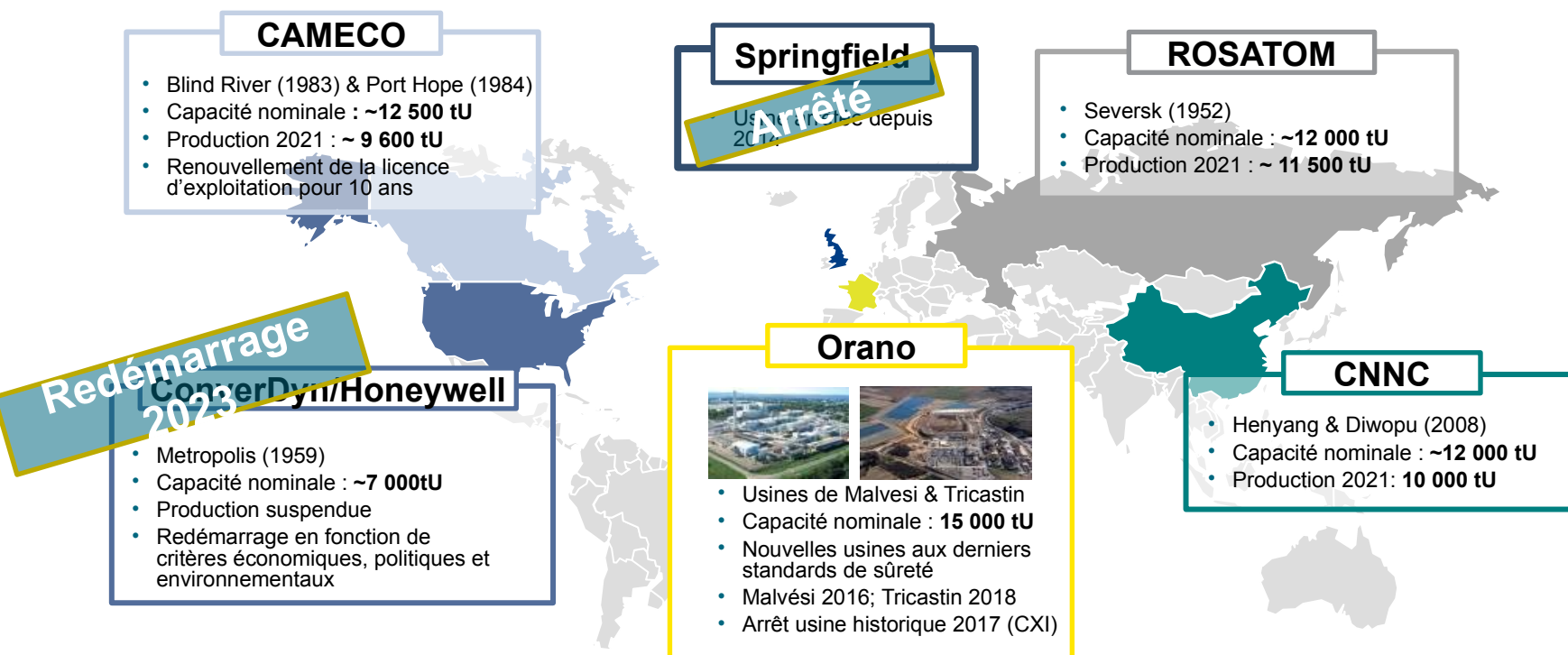
Effet séparatif axial

Un contre-courant thermique (induit par une différence de température imposée entre le haut et le bas du rotor).

Un contre-courant mécanique est créé par le frottement du gaz tournant sur un obstacle fixe.



Les acteurs de la conversion



Sources: Trade Press and Orano estimates

Le marché mondial de l'enrichissement

Country	Company and plant	2013	2015	2020
France	Areva, Georges Besse I & II	5500	7000	7500
Germany-Netherlands-UK	Urenco: Gronau, Germany; Almelo, Netherlands; Capenhurst, UK.	14,200	14,400	14,900
Japan	JNFL, Rokkaasho	75	75	75
USA	USEC, Piketon	0*	0	0
USA	Urenco, New Mexico	3500	4700	4700
USA	Areva, Idaho Falls	0	0	0
USA	Global Laser Enrichment, Paducah	0	0	0
Russia	Tenex: Angarsk, Novouralsk, Zelenogorsk, Seversk	26,000	26,578	28,663
China	CNNC, Hanzhun & Lanzhou	2200	5760	10,700+
Other	Various: Argentina, Brazil, India, Pakistan, Iran	75	100	170
Total SWU/yr approx		51,550	58,600	66,700
Requirements (<i>WNA reference scenario</i>)		49,154	47,285	57,456

Source: World Nuclear Association *Nuclear Fuel Report 2013 & 2105*, information paper on [China's Nuclear Fuel Cycle](#), Areva [2014 Reference Document](#) for most 2013 figures.

* Diffusion, closed mid-2013, US centrifuge proposed.

Capacité mondiale:

Tenex = 45%

Urenco = 25%

Orano = 12%

Des cas problématiques...

➤ Iran : S'appuie sur l'argument d'enrichissement pour le civil...
Article 4 du TNP « droit inaliénable....de développer la recherche, la production et utilisation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques ».

➤ Corée du Nord : usine « secrète » (Kangson).

➤ Pakistan : Site de Chashma.

➤ Inde : usine « pilote » au Bhabha Atomic Research Center (BARC) +
“Rare Materials Project”, en fonctionnement depuis 1990 à Rattehalli
(centrifugation, Sud du pays)

L'AIEA veille et les USA imposent leur loi dans quelques pays :
Loi américaine (Bush 2006) : un pays qui s'engage dans une coopération
avec les Etats-Unis dans le domaine nucléaire doit satisfaire au préalable
à 9 critères de non-prolifération (conformité évaluée par le congrès
Américain)

Sommaire

18h – Intro 5 min

18h05 - Uranium 235 (6 slides => 10 min)

18h15 - Séparation isotopique et Diffusion Gazeuse (11 slides =>15 min.) + 3 min de vidéo => 20 min max

18h35 - Centrifugation (11 slides =>15 min.)

18h50 - Risques de prolifération (3 slides => 5 min)

18h55 - L'Usine GBII d'Orano Tricastin + marché de l'enrichissement (10 slides =>15 min.) + 2 min vidéo => 20 min max

19h15 - Autres Procédés (6 slides => 10 min)

19h25 : Place aux questions