

LICENCE PROFESSIONNELLE

CHIMIE ANALYTIQUE, CONTRÔLE,
QUALITÉ, ENVIRONNEMENT

METROLOGIE CHIMIQUE & NUCLEAIRE



La chimie et la radiochimie dans les centrales nucléaires

Marine PIERRE
marine.pierre@edf.fr



CHANGER L'ÉNERGIE ENSEMBLE

SOMMAIRE

- Partie 1.** Le nucléaire et la production d'électricité
- Partie 2.** Comment fonctionne un réacteur à eau pressurisée ?
- Partie 3.** Les acteurs du nucléaire et la réglementation
- Partie 4.** La chimie dans les centrales nucléaires
- Partie 5.** Les mesures chimiques et radiochimiques
- Partie 6.** Le circuit primaire – Les paramètres mesurés
- Partie 7.** Le circuit secondaire – Les paramètres mesurés
- Partie 8.** Le circuit tertiaire – Les paramètres mesurés
- Partie 9.** La maîtrise des rejets chimiques et radioactifs
- Partie 10.** La surveillance de l'environnement

PARTIE 1

LE NUCLÉAIRE ET LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

QUELQUES CHIFFRES ASSOCIÉS AU NUCLÉAIRE
EN FRANCE ET À L'INTERNATIONAL

LA SOCIETE EDF EN QUELQUES CHIFFRES ET DATES CLES

Quelques dates clefs de l'Histoire d'EDF :

- ❑ La société EDF est créée en 1946, durant l'après guerre, par la nationalisation des 1450 entreprises françaises de production, transport et distribution d'électricité et de gaz
- ❑ La construction du parc électronucléaire 1960 – 2000 (Chinon A = 1963 – La Boule)
- ❑ Début des années 2000, lancement du projet EPR de Flamanville => démarrage calé à 2023 (initialement prévu en 2012)
- ❑ EDF devient une société anonyme en 2004 (puis introduction en bourse en 2005) afin de se préparer à l'ouverture à la concurrence du marché de l'énergie en Europe
- ❑ A partir de 2010 : renforcement de l'internationalisation d'EDF par diverses acquisitions et projets
- ❑ 2020 : 1^{er} arrêt d'un réacteur REP => 2 réacteurs de Fessenheim
- ❑ 2021 : Etudes lancées sur les nouveaux réacteurs « SMR »
- ❑ 2022 : Relance du programme nucléaire en France => 6 nouveaux réacteurs prévus à partir de 2037
- ❑ 2024 : Annonce d'Emmanuel Macron de la volonté d'ajouter 8 autres nouveaux EPR2 => soit 14 nouveaux réacteurs nucléaires

LES CHIFFRES CLÉS DU GROUPE EDF EN 2023

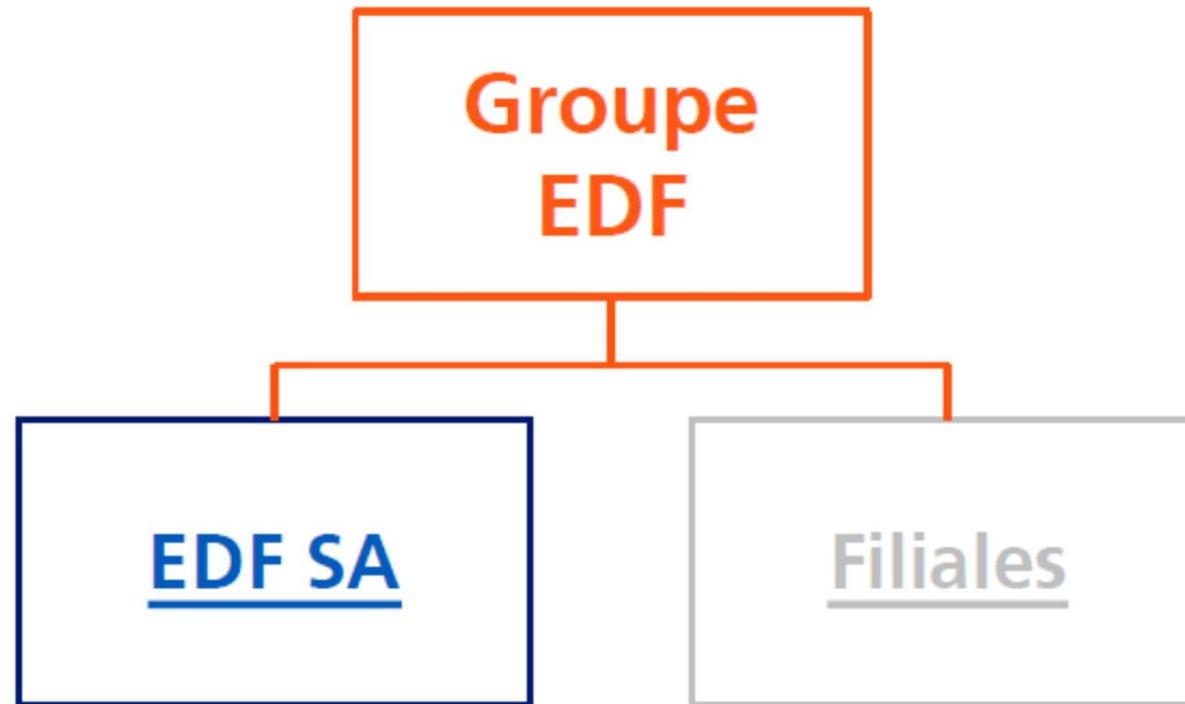
139,7
Mds€
de chiffre d'affaires

434
TWh
d'électricité produite
en France

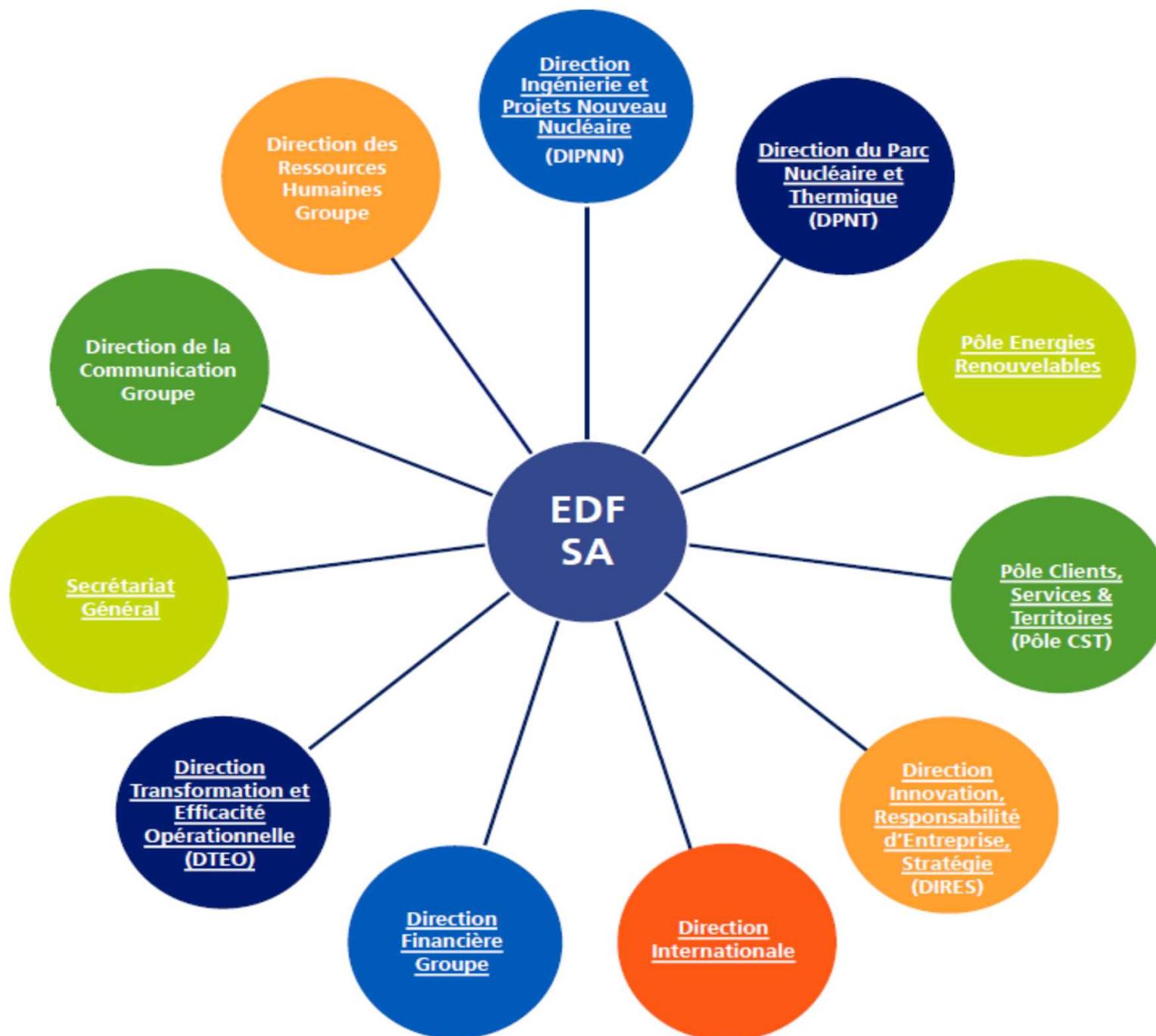
93
%
de production
sans CO₂

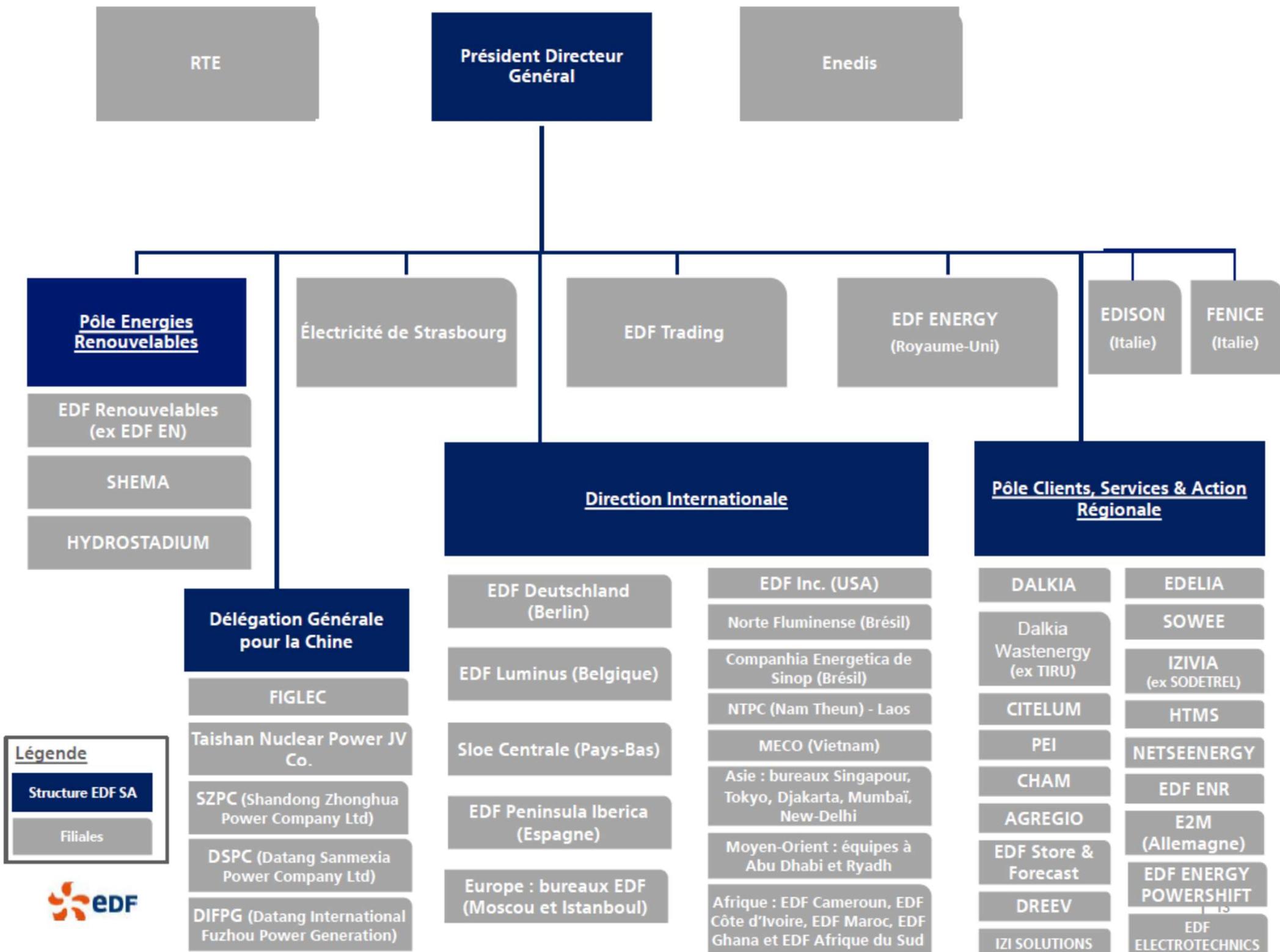
- ❑ **39,9 Mds€** d'EBITDA
- ❑ **10,0 Mds€** de résultats nets courants
- ❑ **19 Mds€** d'investissements nets
Hors plan de cessions du Groupe
- ❑ **40,9 millions** de sites clients
- ❑ **171490** : effectifs (2022)

LA SOCIETE EDF EN QUELQUES CHIFFRES ET DATES CLES



LES ENTITÉS D'EDF SA





QUELS METIERS DANS LE NUCLEAIRE ...

De nombreux métiers au sein du milieu du nucléaire sont en lien avec les compétences associées à la Chimie et à la réglementation, quelques exemples de domaines :

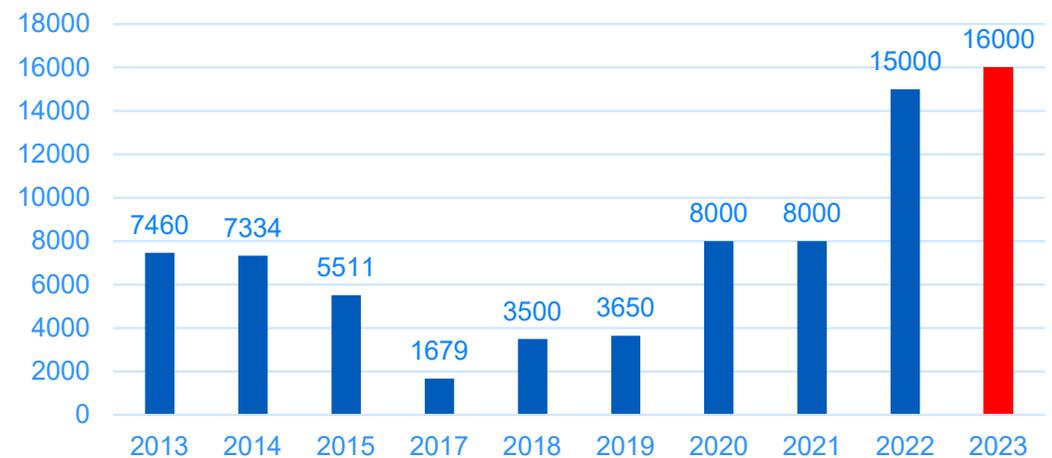
- ❑ La production d'électricité sur site : suivi des installations et de l'environnement, rejets...
- ❑ L'ingénierie opérationnelle sur site ou au niveau national : appui aux exploitants, expertise, déconstruction...
- ❑ L'ingénierie d'étude : développement de méthodes, étude et évolution des pratiques
- ❑ La réglementation environnementale
- ❑ La R&D

Données 2022 :

- ❖ Groupe EDF (France) : 171490 collaborateurs

Les offres d'emploi, d'alternance et de stage sont disponibles sur le site : <http://www.edfrecrute.com>

Recrutements EDF sur les 10 dernières années

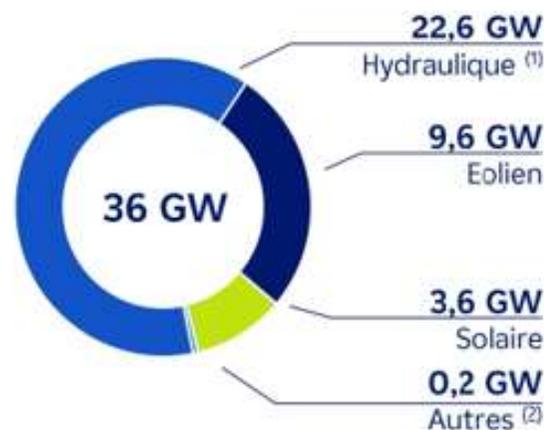


LA PRODUCTION NUCLEAIRE EN FRANCE

Notre mix de production par filière (en TWh, 2022)⁽¹⁾



Notre mix de production EnR par filière (en GW nets, à fin 2022)



En 2030, un objectif de 60 GW nets dans le monde grâce à une forte accélération dans l'éolien en mer, terrestre, et le solaire.

LES REACTEURS INSTALLES EN FRANCE

Carte des sites nucléaire d'EDF

❖ **HWGCR** – Water Gas Cooled Reactor

1 unité, 70 MWe, à l'arrêt

❖ **UNGG** – Uranium Naturel Graphite Gaz

9 unités, 0 à 540 MWe, à l'arrêt

❖ **RNR** – Réacteurs à Neutrons Rapides

2 unités, 130 et 1200 MWe, à l'arrêt

❖ **REP** – Réacteurs à Eau Pressurisée

56 unités, ≈ 900 à 1450 MWe, en fonctionnement

+ 1 REP en construction 1650 MWe (EPR)

Réacteurs de recherche : 33 à l'arrêt, 9 en fonctionnement, 4 en projet.

La Marine Nationale possède plusieurs réacteurs pour ses sous-marins et porte-avions à propulsion nucléaire.



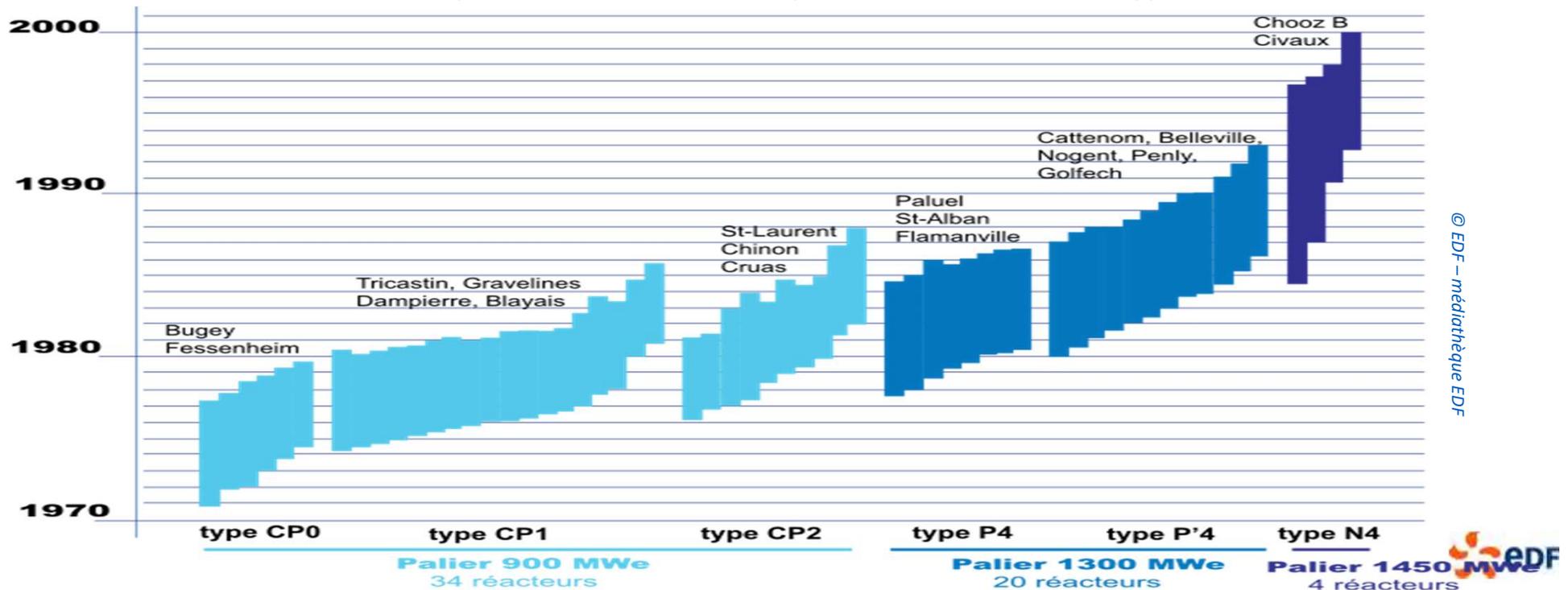
L'HISTOIRE DU PARC ELECTRONUCLEAIRE FRANCAIS

La construction du parc REP actuel a commencé dans les années 70, soit quelques années après les autres grands pays nucléarisés (USA, Russie, UK, Japon, Allemagne...).

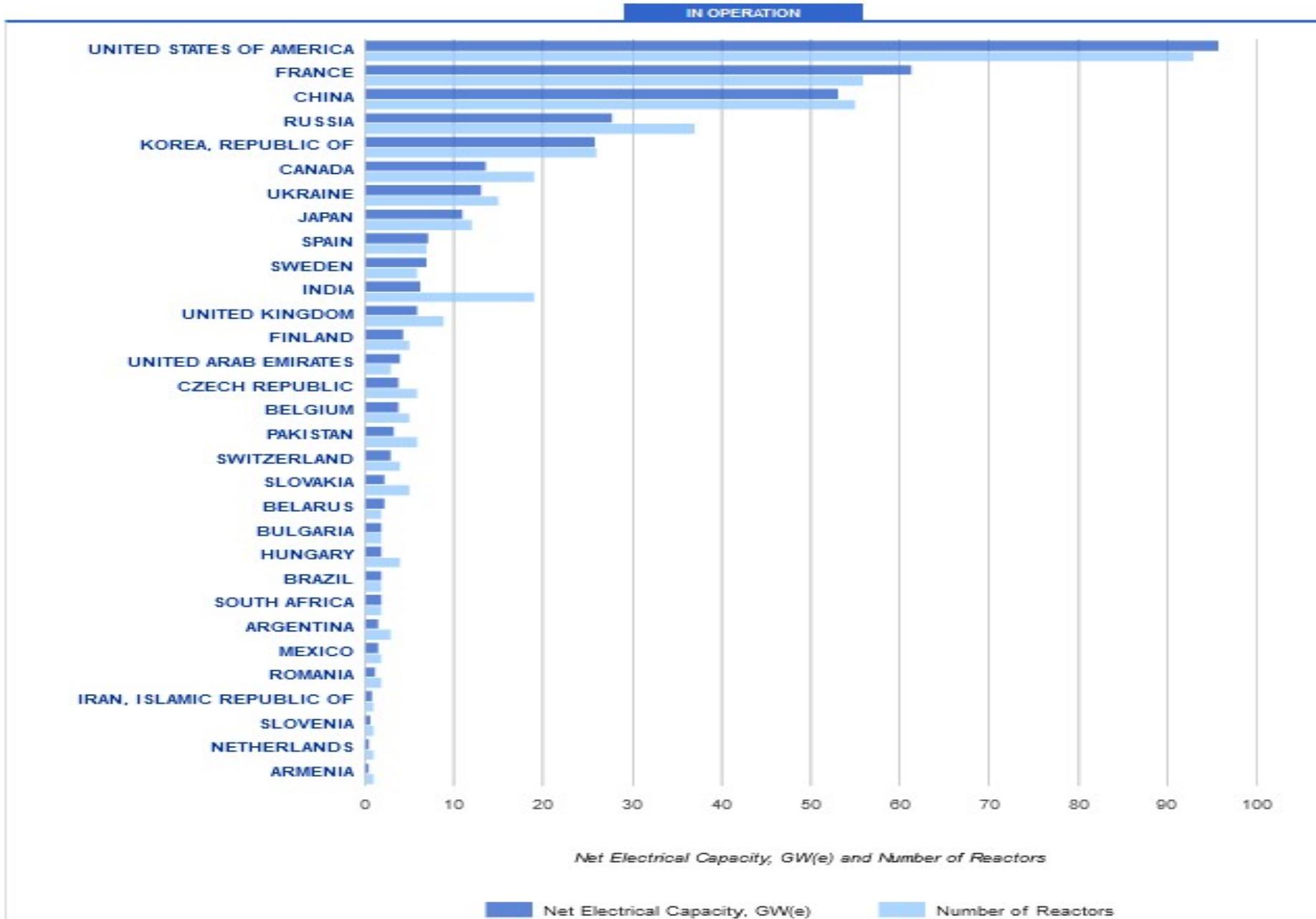
Le design initial est basé sur une licence américaine (achetée), perfectionnée avec le retour d'expérience international et entre les différents paliers français.

Des améliorations sont régulièrement opérées sur les centrales sur la base des avancées technologiques et du retour d'expérience (incidents, accidents, bonnes pratiques).

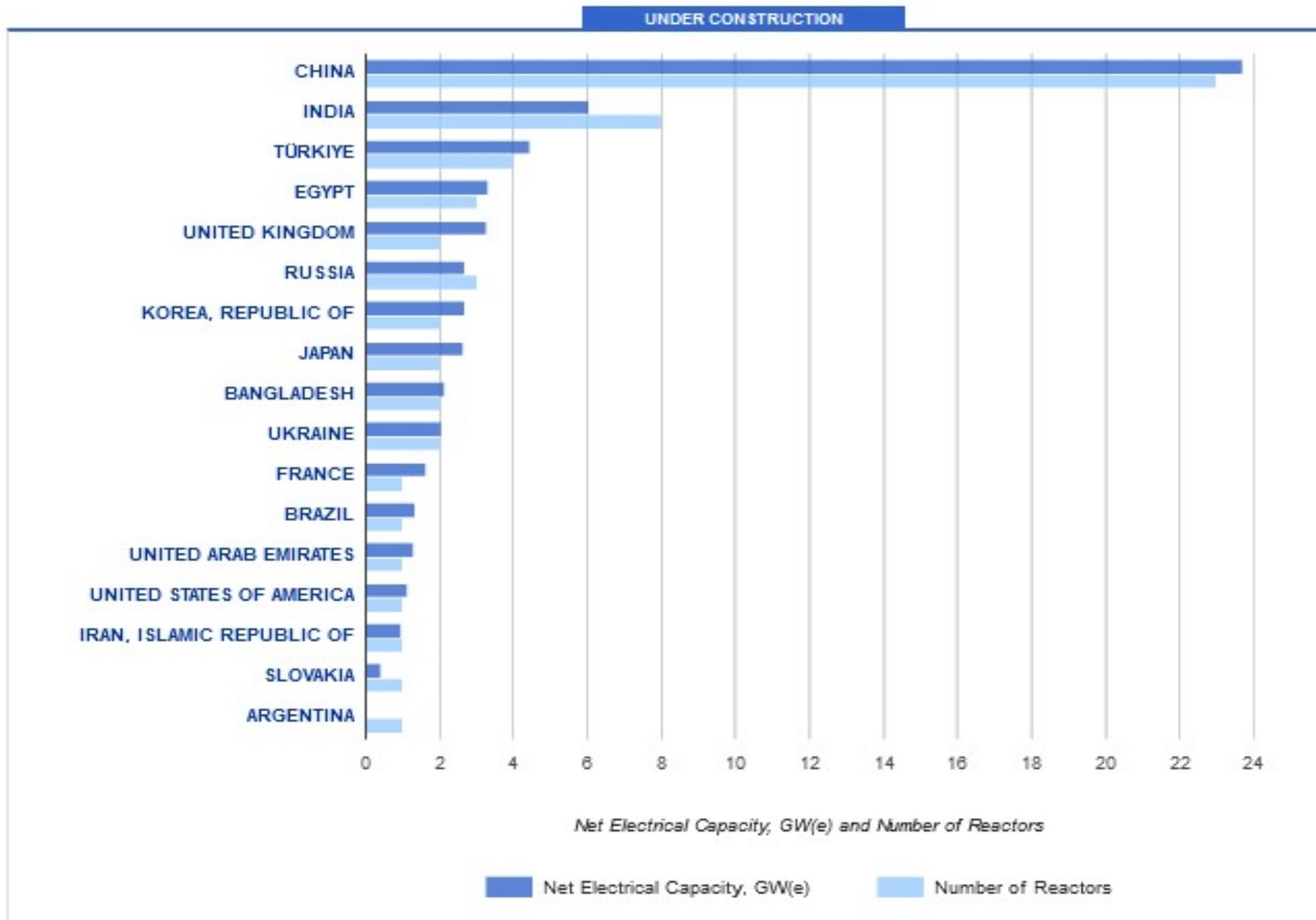
Historique de la construction du parc électronucléaire de type REP



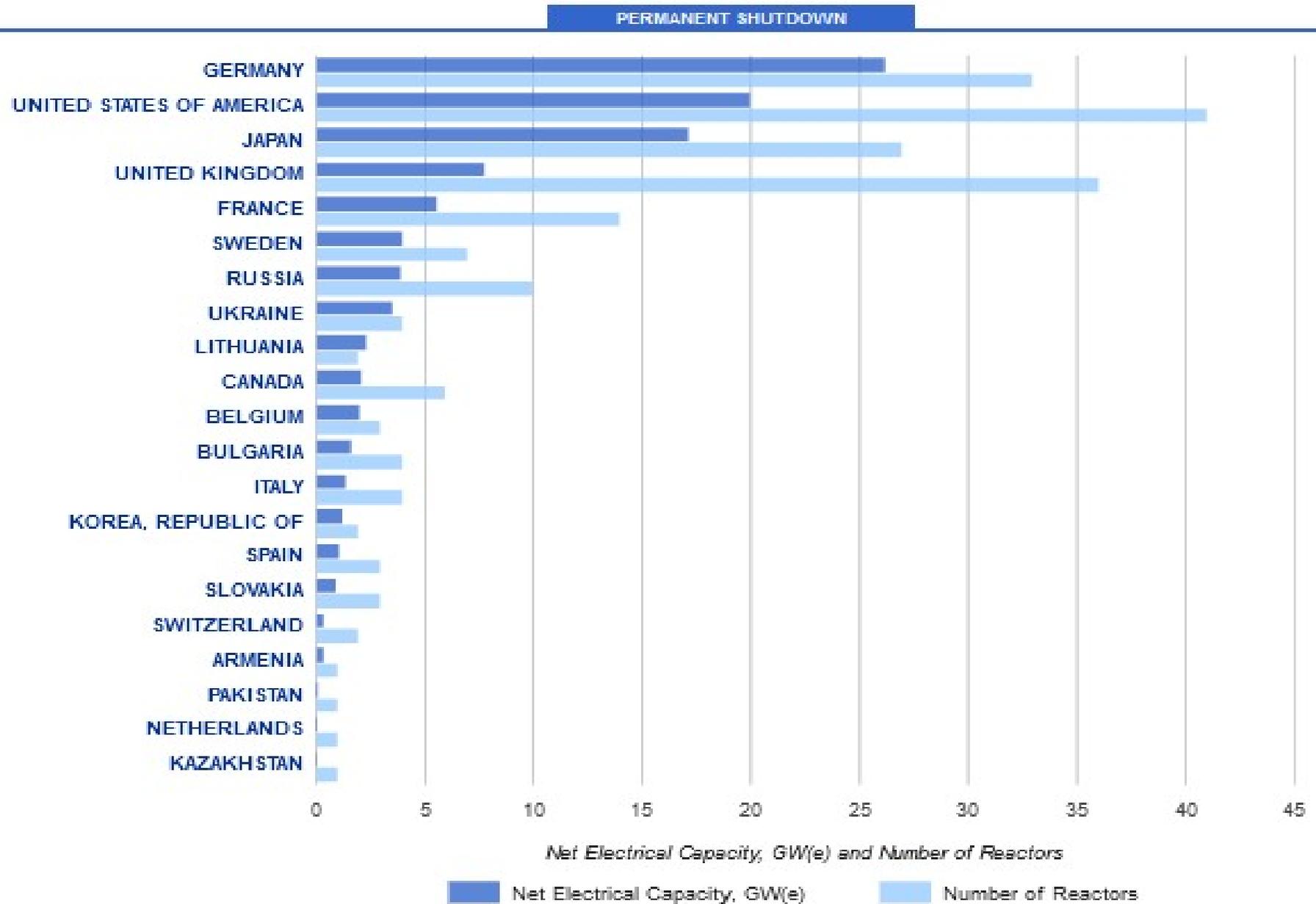
SITUATION FRANCAISE PAR RAPPORT A L'INTERNATIONAL



RÉACTEURS EN CONSTRUCTION

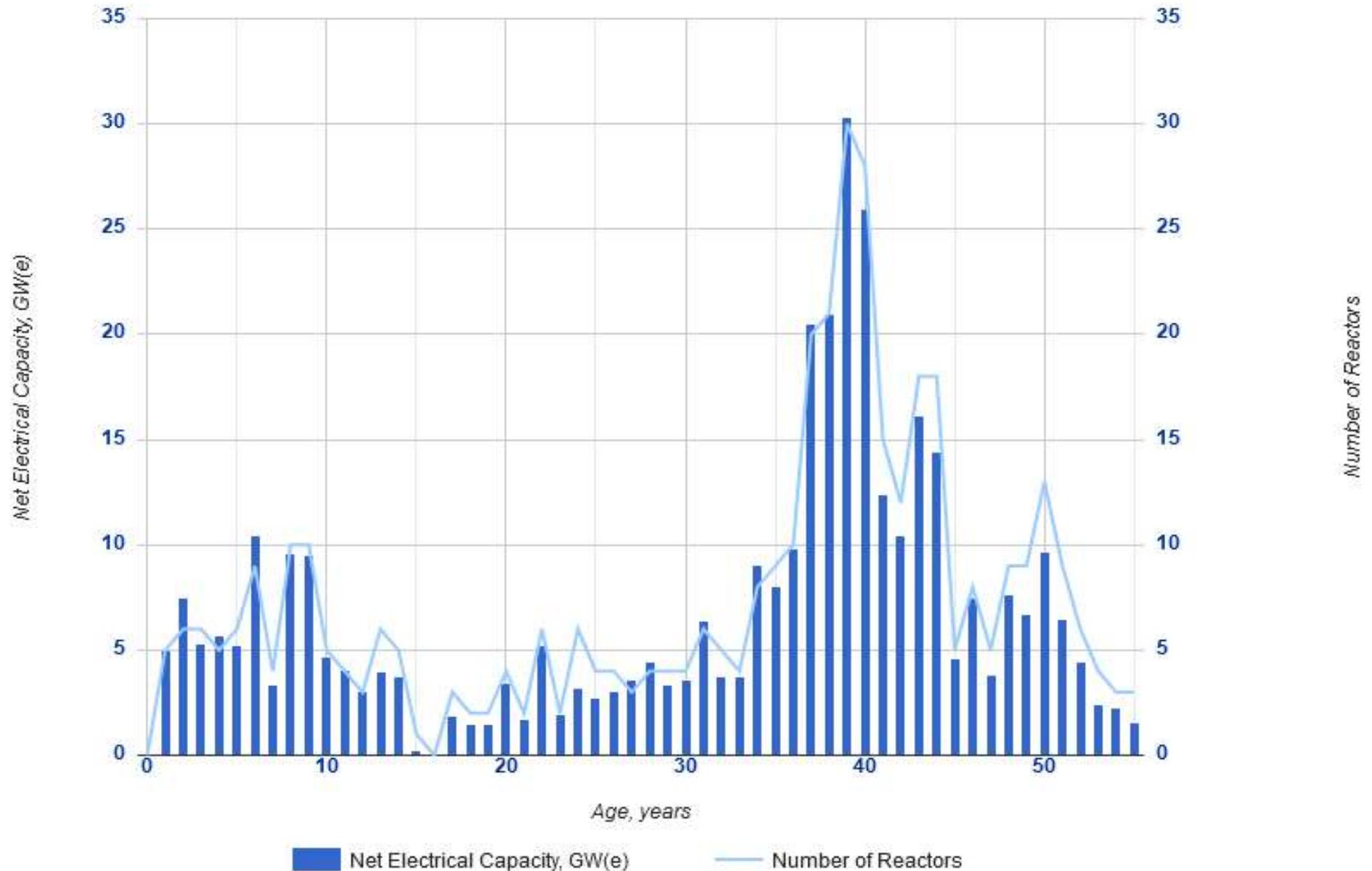


RÉACTEURS À L'ARRÊT



QUEL AGE ONT LES REACTEURS NUCLEAIRES ?

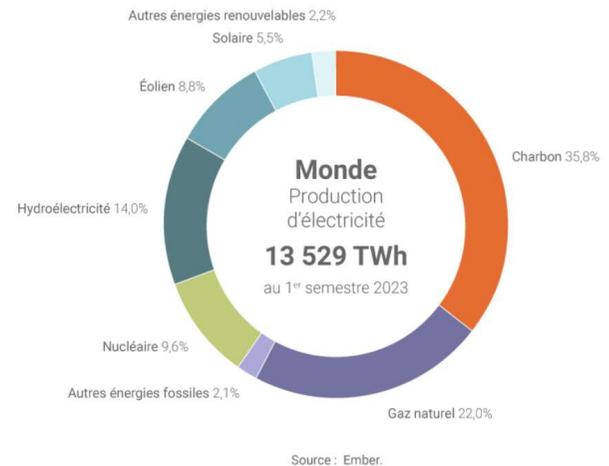
AGE DISTRIBUTION



CE QU'IL FAUT RETENIR ...

❖ Le nucléaire contribue à env. 10% de la production mondiale d'électricité loin derrière les énergies fossiles >60%

❖ Sur les 20 dernières années, le nombre de réacteur en service a peu évolué, la puissance installée a augmenté d'environ +11%



❖ Les nouvelles constructions ont lieu majoritairement dans les "pays émergents" alors que les arrêts concernent les pays développés (US, Europe)

❖ Plusieurs pays, suite à l'accident de Fukushima et/ou des choix politiques se désengagent de la filière nucléaire (ex : Allemagne) → difficultés de remplacement

❖ La déconstruction des 190 réacteurs à l'arrêt représente un enjeu industriel, politique, économique et écologique majeur (technique, coût, déchets...)

① AIEA/PRIS (Power Reactor Information System), données actualisées sur le parc mondial de réacteurs : <https://www.iaea.org/PRIS/home.aspx>

① Carte interactive des réacteurs dans le monde : <https://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds-nuclear-power-plants#>

PARTIE 2

COMMENT FONCTIONNE UN RÉACTEUR À EAU PRESSURISÉE ?

SCHÉMA DE PRINCIPE ET ZOOM SUR LE
CHANTIER EPR DE FLAMANVILLE 3

FONCTIONNEMENT D'UN RÉACTEUR A EAU PRESSURISÉE

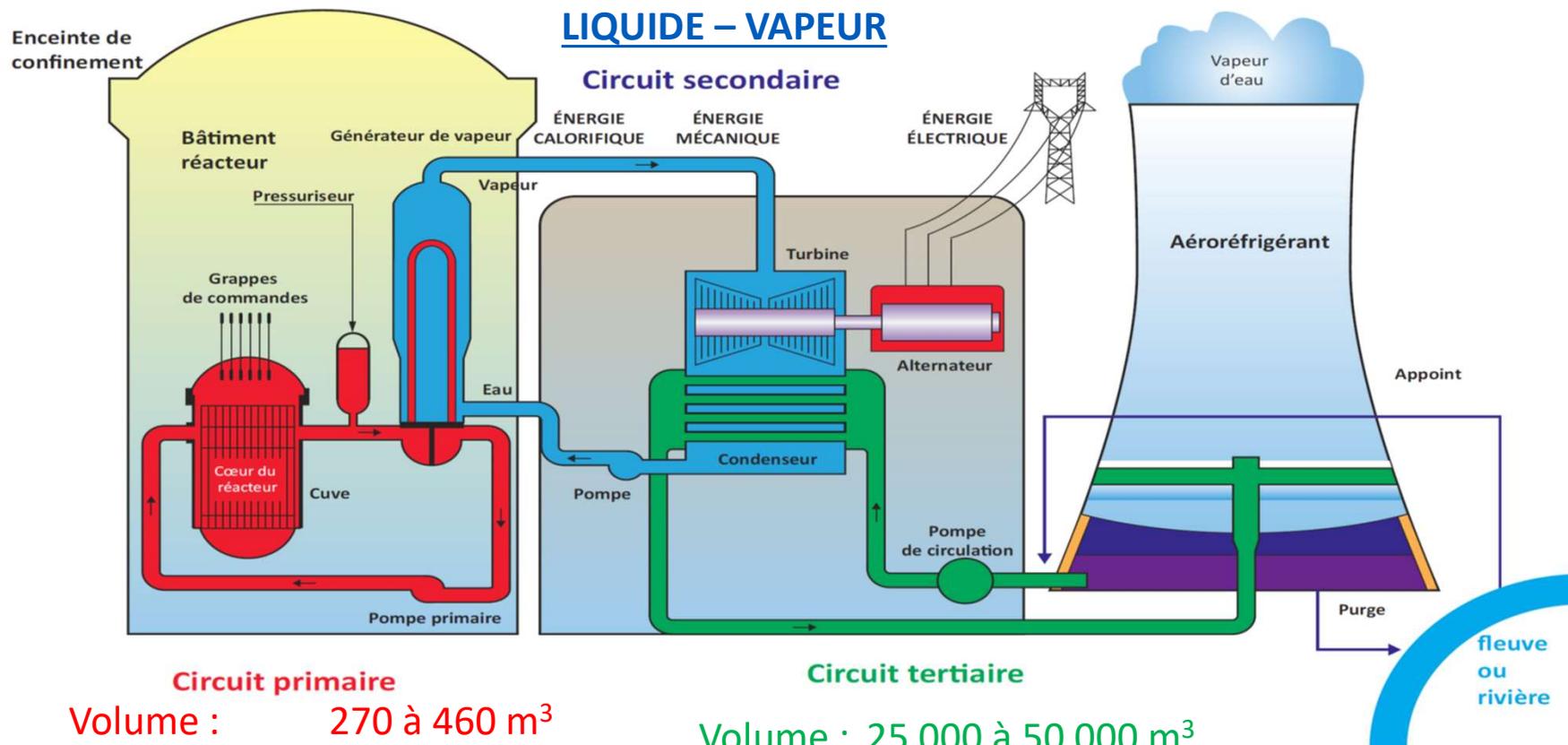
Un réacteur à eau sous pression est composé de 3 circuits distincts.

Volume : 2 000 à 2 500 m³
Pression : jusqu'à 55 à 77 bars
Température : jusqu'à 270 à 288°C

REP

alternateur

LIQUIDE – VAPEUR



Circuit primaire

Volume : 270 à 460 m³
Pression : 155 bars
Température : 286 à 323 °C

LIQUIDE

Circuit tertiaire

Volume : 25 000 à 50 000 m³
LIQUIDE

L'EPR : LE RÉACTEUR LE PLUS PUISSANT DU MONDE



Pose du dôme de l'EPR – 2013

Renforcement de la sûreté de l'EPR :

Caractéristiques de l'[EPR](#) – European Pressurized water Reactor

Puissance : 1650 MW

Design : Français - Allemand

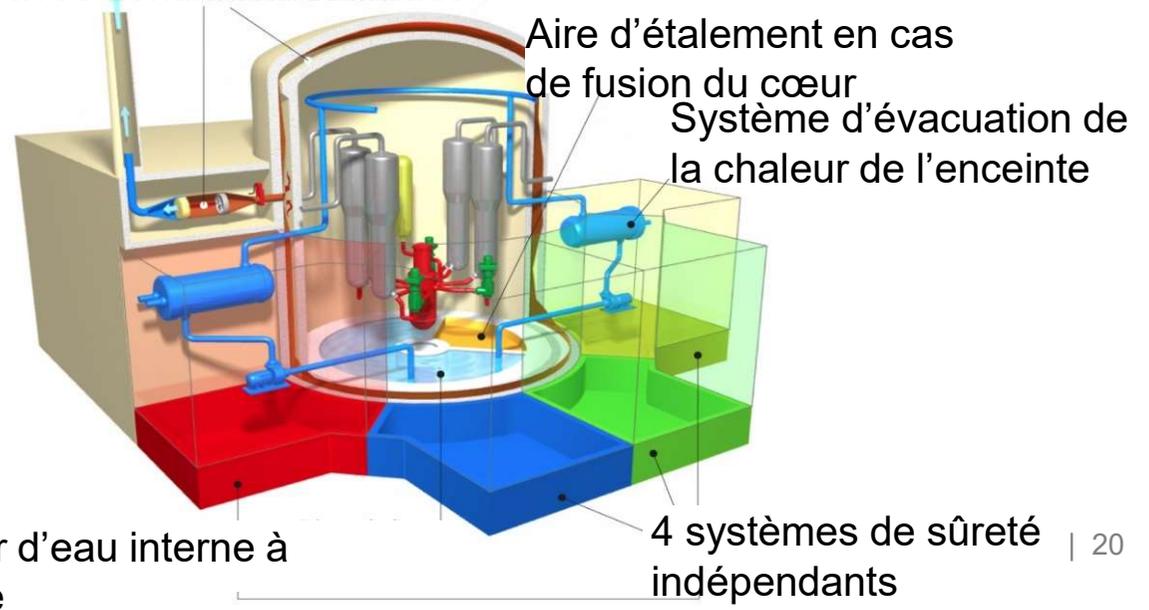
Durée de fonctionnement prévue : 60 ans

En fonctionnement : 2 en Chine (Taishan), 1 en Finlande

En construction : 1 en France

Lancement récent de 2 en Angleterre (EDF Energy)

Double enceinte de confinement avec ventilation et filtration





Vue aérienne du bâtiment réacteur - 2012

© EDF - Médiathèque EDF



Installation des internes dans la cuve du réacteur - 2016

© EDF - Médiathèque EDF



Dessous du couvercle de cuve (non équipé) - 2016

© EDF - Médiathèque EDF



Cuve du réacteur - 2014

B. PHILIPPOT - Cours ULCO - Master 2 ACCIE
© EDF - Médiathèque EDF



© EDF – Médiathèque EDF

Raccordement des lignes d'échantillonnage nucléaire - 2015



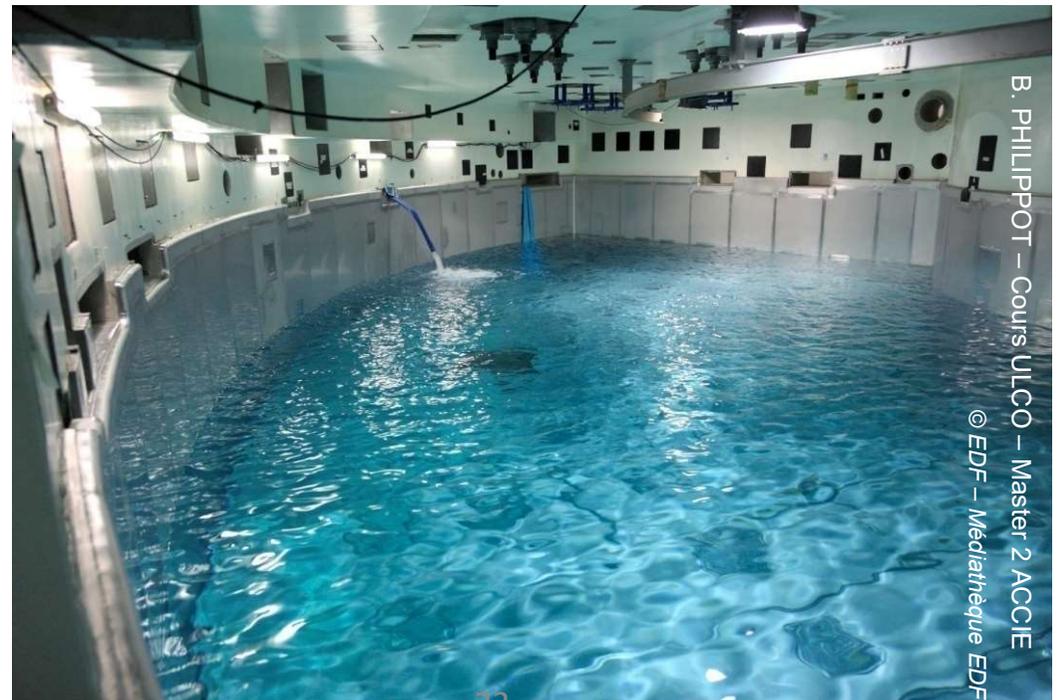
© EDF – Médiathèque EDF

Réservoir de recueil des purges des sécheurs surchauffeurs - 2010



© EDF – Médiathèque EDF

Générateur de vapeur - 2014



B. PHILIPPOT – Cours ULCO – Master 2 ACCIE
© EDF – Médiathèque EDF

Test du réservoir de sauvegarde, spécifique EPR - 2013



© EDF - Médiathèque EDF

Mise en place du rotor dans le stator de l'alternateur - 2012



© EDF - Médiathèque EDF

Salle des machines (turbine) - 2016



© EDF - Médiathèque EDF

Tuyauterie de rejet du circuit de refroidissement - 2009



© EDF - Médiathèque EDF

Galerie de rejet - 2009

2007



© EDF - Médiathèque EDF

2008



© EDF - Médiathèque EDF

2009



© EDF - Médiathèque EDF

2010



© EDF - Médiathèque EDF

2012



© EDF - Médiathèque EDF

2013



B. PHILIPPOT - Cours
© EDF - Médiathèque EDF

2015



© EDF - Médiathèque EDF

2016



ULCO - Master 2 A.C.C.I.E
© EDF - Médiathèque EDF



Essais à chaud - Salle de commande
Les essais à chaud se poursuivent à l'EPR de Flamanville 3



Bâtiment de traitement des effluents
Rinçage sur ligne en eau du système des effluents liquides usés avant la réalisation d'essais.



Bâtiment des auxiliaires nucléaires - Raccordement de cannes de prélèvement d'air sur un système se trouvant à l'intérieur de la cheminé



Le chantier EPR Flamanville 3 – janvier 2020

PARTIE 3

LES ACTEURS DU NUCLÉAIRE ET LA RÉGLEMENTATION

PRODUCTEURS, UTILISATEURS, RÉGULATEURS,
ASSOCIATIONS, ...
ET LA LOI

ACTEURS DU NUCLÉAIRE – LES EXPLOITANTS



Cycle du combustible (de la mine au retraitement), équipements nucléaires et mise en œuvre de procédés industriels



Architecte ensemble, exploitant de CNPE pour la fourniture d'électricité



Centres de recherches sur les thèmes ayant attrait à l'énergie, au nucléaire civil et militaire



Retraitement et stockage des déchets nucléaires



Concepteur de sous-marins et porte-avions à propulsion nucléaires



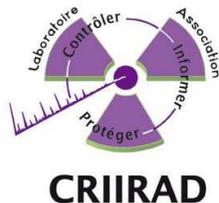
Exploitant de sous-marins et porte-avions à propulsion nucléaires

ACTEURS DU NUCLÉAIRE – LES EXPLOITANTS

- ❖ **Les centres de recherche et laboratoires privés** : mesure, production de radionucléides, expérimentation...
- ❖ **Les hôpitaux** : radiothérapie, chimiothérapie, imagerie médicale : scintigraphie (^{133}Ba), radio...
- ❖ **Les autres industriels** : tirs radiographiques (expertise des matériaux) agroalimentaire (irradiation des aliments), horlogerie...

ACTEURS DU NUCLÉAIRE – LES ASSOCIATIONS

- ❖ Les Commissions Locales d'Informations (**CLI**) sont des instances représentatives de la population, elles sont présentes à proximité des installations nucléaires, il s'agit d'une exigence réglementaire. Les CLI sont informées de la vie des installations, sont destinataires des rapports émis par les industriels (bilans, événements...) et émettent des avis sur les projets. Les CLI sont représentées au niveau national par l'ANCLI.
- ❖ Associations loi 1901 menant des mesures et études sur l'impact du nucléaire sur l'environnement et l'Homme.



ACTEURS DU NUCLÉAIRE – LES CONTRÔLEURS ET RÉGULATEURS



Autorité administrative française indépendante de contrôle de la sûreté, de la radioprotection en France et de l'information des citoyens.

Elle rend compte directement au parlement (assure son indépendance). Elle est à l'origine de la réglementation afférente au nucléaire et réalise le contrôle.



Organisme de recherche et d'expertise dans le domaine du nucléaire (au sens large). Elle assure également une mission d'appuis technique à l'ASN (inspection, avis...).



Les Directions régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), au nombre de 21, ont été créées fin 2007. Elles dépendent des préfets.

Ses missions portent sur la préservation de l'environnement (impacts, préservation des ressources...), l'information du public, appliquer la réglementation nationale et locale.

Elle ne couvre pas le domaine de la sûreté nucléaire.

ACTEURS DU NUCLÉAIRE – LES CONTRÔLEURS ET RÉGULATEURS

LES 
**AGENCES
DE L'EAU**

ÉTABLISSEMENTS PUBLICS DU MINISTÈRE
EN CHARGE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Les agences de l'eau, au nombre de 6, organisées par bassin versant, dépendent du ministère en charge du développement durable. Elles ont pour mission la surveillance et la préservation de la ressource en eau au travers notamment de l'application des schéma directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) liés à la directive cadre sur l'eau.



Organisation internationale sous l'égide de l'ONU fondée en 1957 et située à Vienne (Au). Elle a pour mission l'inspection d'installations nucléaires (sûreté et usage civil du nucléaire), l'information et la publication de standards internationaux notamment sur la sûreté.



Instance officielle multidisciplinaire, composée de représentant des différentes parties intéressées (administration, scientifiques, industriels et associatifs), en charge de l'information, la concertation et le débat sur la sûreté nucléaire.



Instance officielle en charge de la sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. Elle est notamment en charge du contrôle de la radioactivité des aliments.

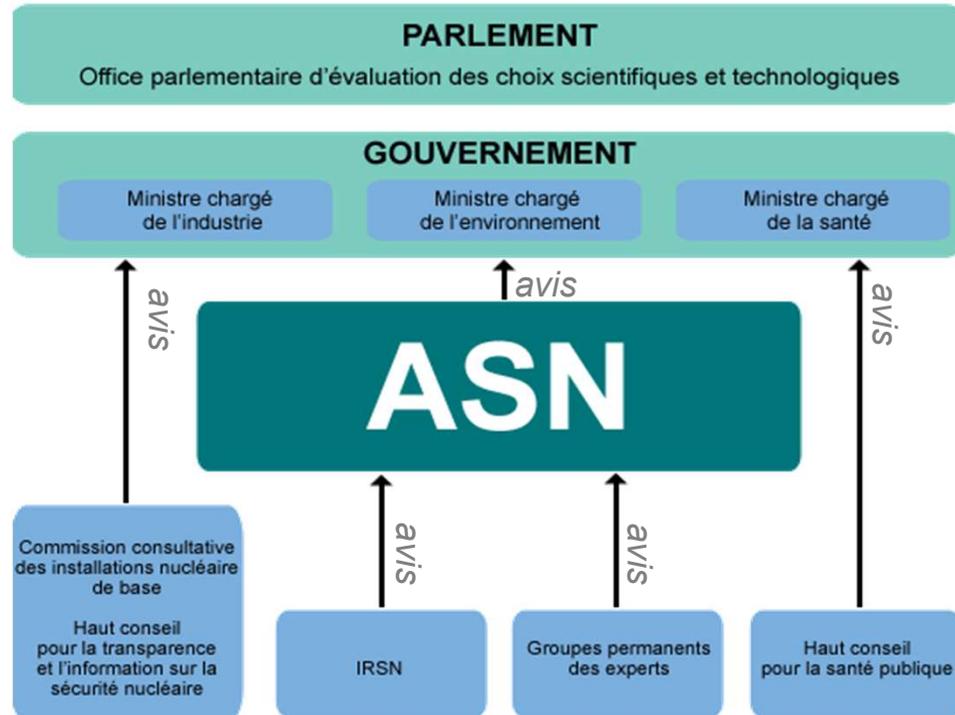
LA RÉGLEMENTATION

La construction, l'exploitation, la modification et le démantèlement des installations nucléaires ainsi que la manipulation de matériaux radioactifs sont réglementés.

La réglementation liée au domaine du nucléaire est définie par 3 acteurs majeurs :

- ❖ **le gouvernement** qui édicte la réglementation technique générale liée au nucléaire.
- ❖ **Le parlement** qui analyse et vote les textes.
- ❖ **L'ASN** qui prépare les textes réglementaires, précise la réglementation par des décisions et est en charge du contrôle.

Cette organisation est notamment affirmée dans la loi dite de Transparence et Sûreté Nucléaire (TSN) du 13 juin 2006.



LA RÉGLEMENTATION

Les centrales nucléaires, en tant qu'Installation Nucléaire de Base (INB), ont une réglementation spécifique venant s'appliquer en complément de la réglementation globale. Quelques exemples :

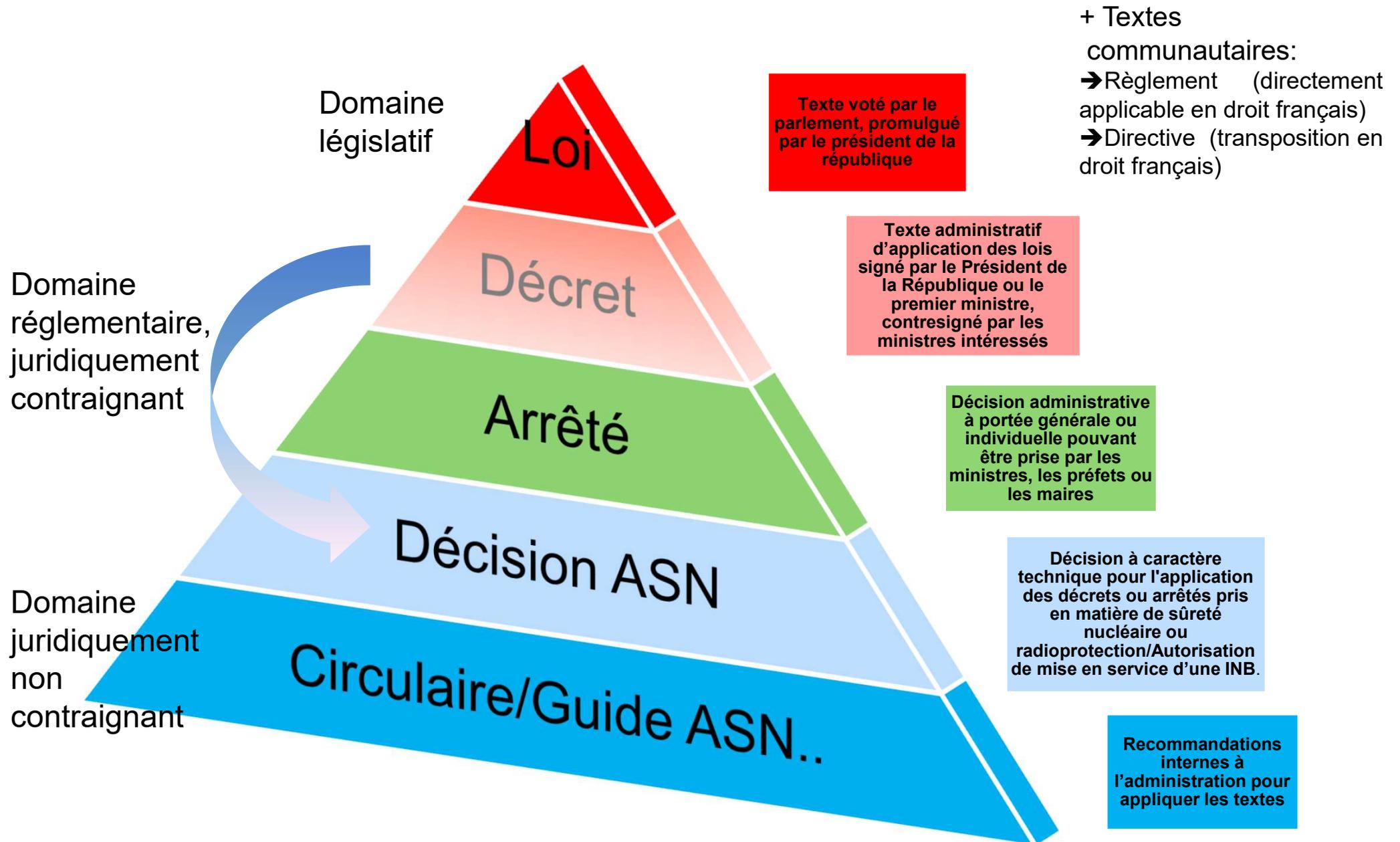
- ❖ **Réglementation générale conventionnelle** : Code de l'environnement, Directive cadre sur l'eau, Natura2000, directive RSDE (Recherche des substances dangereuses dans l'eau)...
- ❖ **Réglementation générale « nucléaire »** : Arrêté du 7 février 2012 fixant les règles générales relatives aux INB, Décisions ASN (Environnement, déchets, etc.)...
- ❖ **Réglementation particulière** : Arrêtés de Rejet et de Prise d'Eau (ARPE) de chaque Installation Nucléaire de Base, Décrets d'Autorisation de Création...

Les textes réglementaires sont soumis à la **consultation du public**.

L'appropriation et l'application de la réglementation et son évolution font partie du quotidien des industriels au travers de contrôles, rapports, paiements... et constituent un enjeu majeur conditionnant son « permis d'exploitation » de son installation.

Des contrôles inopinés et/ou prévus sont réalisés régulièrement par les organismes de l'état (DREAL, Agence de l'eau, ASN...) afin de vérifier la bonne application de la réglementation.

LA HIÉRARCHIE DES TEXTES RÉGLEMENTAIRES



PARTIE 4

LA CHIMIE DANS LES CIRCUITS DES CENTRALES NUCLÉAIRES

UN ÉLÉMENT CLÉ POUR LA SÛRETÉ

LE COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

De la mine au cœur d'un réacteur, chronique de la transformation d'un minéral en combustible nucléaire.

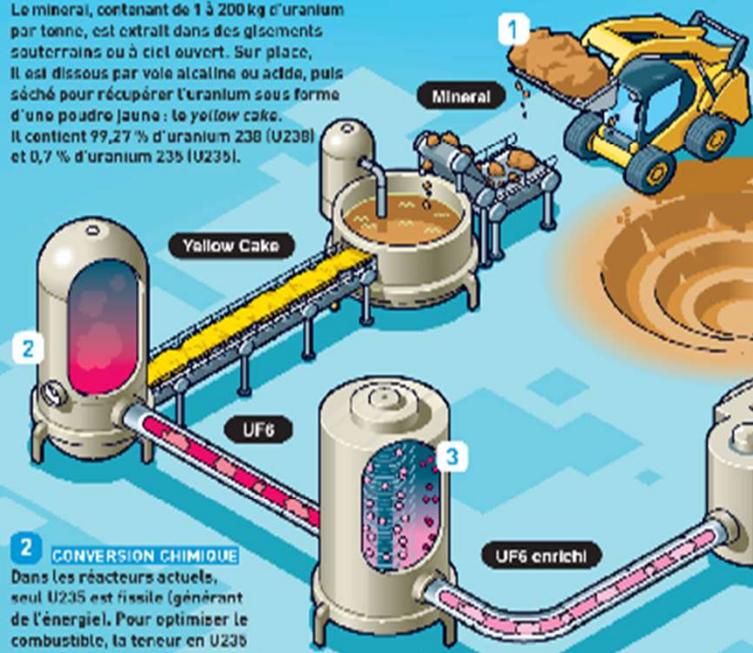
Le combustible nucléaire

LE PRINCIPE

Extraction, conversion chimique, enrichissement, conditionnement... : l'uranium subit de nombreuses opérations pour former le combustible des réacteurs. Après utilisation, il est en majorité recyclé dans du nouveau combustible.

1 EXTRACTION DE L'URANIUM

Le minéral, contenant de 1 à 200 kg d'uranium par tonne, est extrait dans des gisements souterrains ou à ciel ouvert. Sur place, il est dissous par voie alcaline ou acide, puis séché pour récupérer l'uranium sous forme d'une poudre jaune : le *yellow cake*. Il contient 99,27 % d'uranium 238 (U238) et 0,7 % d'uranium 235 (U235).



2 CONVERSION CHIMIQUE

Dans les réacteurs actuels, seul U235 est fissile (générant de l'énergie). Pour optimiser le combustible, la teneur en U235 devra être augmentée jusqu'à 5 % par enrichissement. Au préalable, le *yellow cake* est purifié, ajouté à de l'acide fluorhydrique puis à du fluor gazeux pour le convertir en hexafluorure d'uranium (UF6), solide à température ambiante mais gazeux au-dessus de 60 °C.

3 ENRICHISSEMENT PAR ULTRACENTRIFUGATION OU DIFFUSION GAZEUSE

Les molécules du gaz UF6 formées d'U235 sont plus légères que celles formées d'U238. Avec l'ultra-centrifugation et sa force centrifuge, les premières restent dans l'axe de rotation de la centrifugeuse où elles sont pompées. Par diffusion gazeuse, elles sont plus rapides à franchir une paroi aux pores microscopiques : le gaz récolté derrière est ainsi plus riche en U235.



5 FISSION NUCLÉAIRE

Dans le réacteur, les noyaux d'U235 du combustible sont cassés par des neutrons. Cette fission libère de l'énergie et de nouveaux neutrons qui, à leur tour, cassent d'autres noyaux U235 (la réaction en chaîne). Cette chaleur libérée produit de la vapeur d'eau qui actionne des turbines pour générer l'électricité.

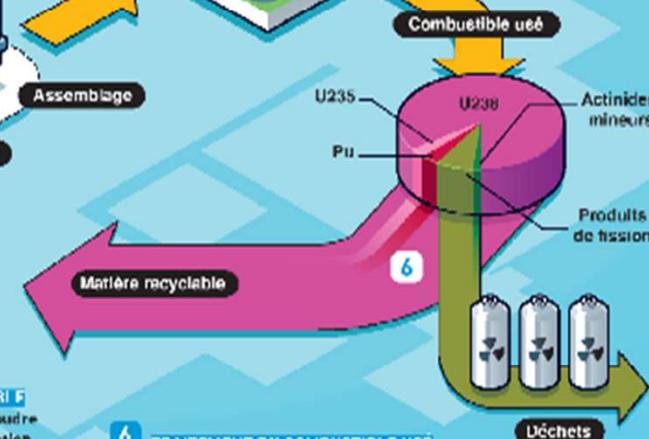


4 CONDITIONNEMENT DU COMBUSTIBLE

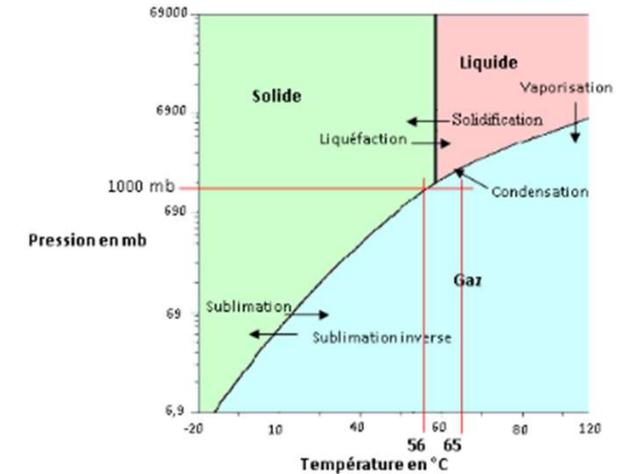
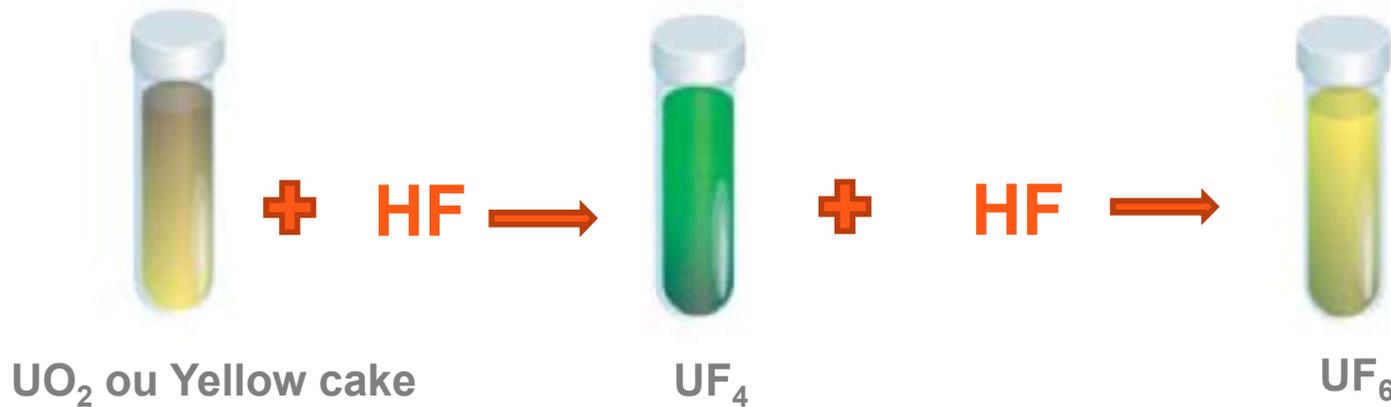
L'UF6 gazeux enrichi est transformé en poudre d'oxyde d'uranium (UO₂) après sa défluoruration dans un four à haute température (800 °C). UO₂, enrichi de 3 à 5 % en U235, est comprimé en pastilles de 7 g, aussi énergétiques qu'une tonne de charbon ! Celles-ci sont empilées dans des tubes en alliage de zirconium, les « crayons ». Un réacteur de 900 MW compte 157 assemblages de 266 crayons combustibles.

6 TRAITEMENT DU COMBUSTIBLE USE

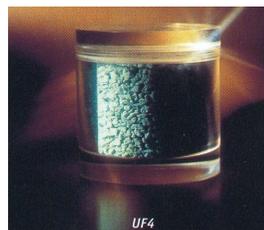
Après quatre ans en réacteur pour produire de l'électricité, le combustible usé contient 4 % de déchets (dont 0,1 % d'actinides mineurs) et 96 % de matière recyclable, récupérée par séparation chimique. Le plutonium (1 %) est recyclé dans du combustible MOX utilisé dans 20 réacteurs sur 58 en France, et l'uranium (95 %, dont 1 % d'U235) sert à la refabrication du combustible. Les déchets sont vitrifiés et conditionnés pour être stockés de façon accessible en profondeur.



LE COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE – LA CONVERSION



Tétrafluorure d'uranium
Permet la préparation de l'uranium métallique anciennement utilisé dans les centrales de filière à uranium naturel (UNGG)



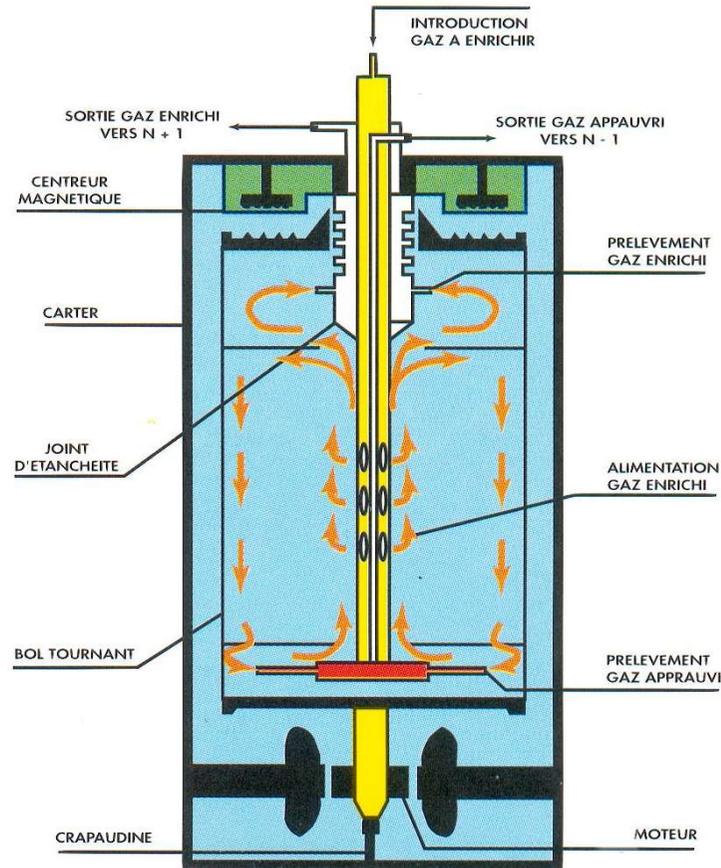
Hexafluorure d'uranium
Solide à température ordinaire, se sublime à partir de 56°C à Patm et gazeux à 65°C => se prête facilement à l'enrichissement par diffusion gazeuse



LE COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE – L'ENRICHISSEMENT

- ❖ Le gaz UF_6 est introduit dans le cylindre tournant à très haute vitesse, sous vide, dans un carter étanche.
- ❖ Les molécules les plus lourdes, sous l'effet de la force centrifuge, sont envoyées à la périphérie du tube tandis que les plus légères ($U235$) migrent vers le centre.
- ❖ Le gaz enrichi en isotope léger uranium 235, au centre du tube, monte. Le gaz enrichi en uranium 238, plus lourd, descend.
- ❖ Les produits enrichis et appauvris sont récupérés aux deux extrémités, haute et basse, du tube.

Cette étape élémentaire de séparation des molécules est répétée au sein d'un ensemble de centrifugeuses en cascades.



POURQUOI LA CHIMIE ?

La chimie assure un rôle capital dans de nombreux domaines, notamment concernant le conditionnement chimique des différents circuits contribuant à la maîtrise la réactivité, la protection les circuits contre la corrosion, la diminution de la radioactivité dans les circuits ainsi que la lutte contre le tartre et les micro-organismes.

Les enjeux associés sont liés aux actions de la chimie sont importants, ils relèvent de la sûreté, la dosimétrie, les rejets, la disponibilité et la conformité réglementaires.

Lors des phases d'arrêt et de maintenance, un conditionnement particulier des composants est effectué afin d'assurer leur préservation ou les nettoyer.

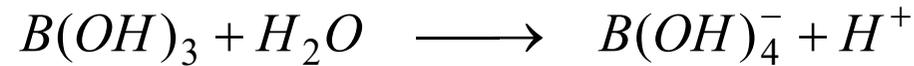
Circuit primaire :

- ❖ **Maîtrise de la réactivité** : Acide Borique H_3BO_3
Le Bore-10 (20% du bore total) absorbe les neutrons en formant du 3H et du 7Li (stable).
Sa concentration baisse au fur et à mesure de l'épuisement du combustible (1 200 à 0 ppm).
- ❖ **Prévention de la corrosion** : Lithine $LiOH$, Hydrazine N_2H_4
Utilisé en faibles quantités, la lithine permet d'assurer un pH de moindre corrosion. L'hydrazine est injectée pour consommer les traces d'oxygène.
- ❖ **Surveillance de la première barrière** :
Suivi d'indicateurs radiochimiques pour la vérification de l'étanchéité du combustible.
- ❖ **Réduction de la dosimétrie** : suivi des indicateurs physico-chimiques, chimiques et radiochimiques pour la réalisation des phases d'arrêt et redémarrage.

L'ACIDE BORIQUE

L'acide borique pour contrôler la réactivité neutronique (^{10}B neutrophage): il n'entraîne pas de corrosion inacceptable des matériaux du CPP.

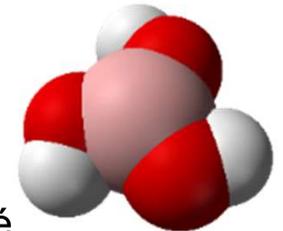
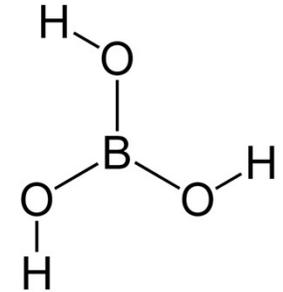
- ❖ Utilisé sous forme d'acide borique : H_3BO_3 ou $\text{B}(\text{OH})_3$
- ❖ (Tri)Acide très faible : $\text{pK}_a \approx 9,24$ à 25°C



- Encore plus faible à haute température
- Acidité \rightarrow lien avec la corrosion généralisée
- ❖ Bore naturel = mélange de deux isotopes ^{10}B ($\approx 20\%$ at) et ^{11}B (80% at)
 - ^{10}B : neutrophage (poison neutronique)
 - ^{11}B : pas actif sur la neutronique

\Rightarrow Le bore-10 est un agent soluble de contrôle de la réactivité

\Rightarrow Concentration à respecter fixée par la neutronique

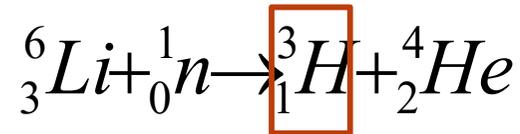


- ❖ La teneur en bore décroît au long de la campagne de combustible de 2000 à 0 mg/kg, en fonction de l'usure du combustible

LA LITHINE

La lithine pour être en milieu faiblement alcalin et minimiser la corrosion généralisée des matériaux du CPP.

- ❖ Utilisé sous forme d'hydroxyde de lithium (LiOH)
- ❖ Neutralise l'acide borique pour se placer à un **pH optimum : pH = 7,2 à 300°C** ($\text{pH}_{\text{Neutre}} \approx 5,7$ à 300°C)
- ❖ Base forte, solubilité limitée
- ❖ Li enrichi à 99,9% en ${}^7\text{Li}$ pour minimiser la production de tritium :
 - ❶ Li naturel = 7,5% de ${}^6\text{Li}$ et 92,5% en ${}^7\text{Li}$



- ❖ ${}^7\text{Li}$: produit "naturellement" par activation de ${}^{10}\text{B}$; pas de PA gênant
- ❖ Autres bases envisagées :
 - Soude et potasse → **non retenue**
 - risque de concentration + corrosion visserie interne
 - s'activent en ${}^{24}\text{Na}$ et ${}^{42}\text{K}$, émetteurs gamma
 - Ammoniaque → **non retenue**
 - peu stable : décomposition par radiolyse

POURQUOI LA CHIMIE ?

Circuit secondaire : **Prévention de la corrosion**

- ❖ Hydrazine N_2H_4
L'hydrazine joue un double rôle : consommer l'oxygène et maîtriser le pH par l'ammoniaque issue de sa dégradation.
- ❖ Morpholine C_4H_9NO , Ethanolamine C_2H_7NO et Ammoniaque NH_4OH
Ces amines, seules ou en combinaison, complètent l'action de l'hydrazine pour le maintien d'un pH de moindre corrosion.

Circuit tertiaire (circuits fermés) :

- ❖ **Lutte contre l'entartrage** : Acide sulfurique H_2SO_4 ...
L'acide forme avec les bicarbonates des sulfates plus solubles limitant les dépôts de tartre.
Des antitartres organiques ou de l'acide chlorhydrique ou du CO_2 peuvent également être employés.
- ❖ **Lutte contre les micro-organismes** : Monochloramine NH_2Cl ou Chloration massive $NaClO$
La monochloramine est produite in situ par mélange d'eau de javel et d'ammoniaque.
Ces traitements sont opérés par campagne ou en continu, selon le besoin.

Circuit tertiaire (bord de mer) :

- ❖ **Lutte contre les salissures biologiques** : Eau de javel $NaClO$
L'eau de javel est produite directement à partir de l'eau de mer par électrochloration.

POURQUOI LA CHIMIE ?



Station de déminéralisation Tricastin

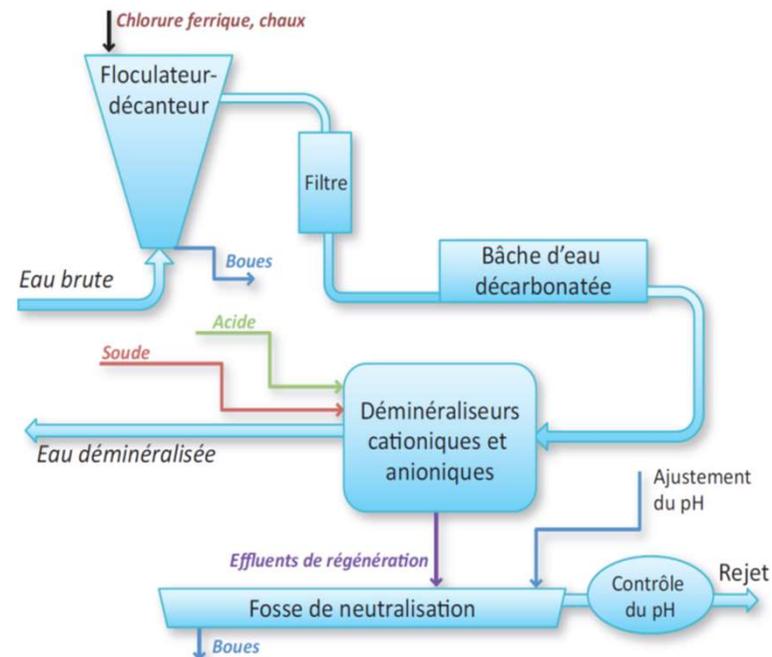
La chimie joue également un rôle important dans les centrales au travers de la **production d'eau déminéralisée**. La qualité de l'eau produite influe sur la **préservation des matériaux** et la **production de produits d'activation** (dosimétrie et rejets).

Les différents circuits emploient de l'eau déminéralisée, pour un volume s'élevant à environ 180 000 m³/an /réacteur.

Celle-ci est produite à partir du réseau urbain d'eau potable, d'eau douce de surface ou souterraine (traitée) ou de mer de mer dessalée.

L'approvisionnement est assuré par d'importantes infrastructures :

Schéma de la production d'eau déminéralisée (cas eau brute douce)



LES ENJEUX ASSOCIES AUX MESURES CHIMIQUES ET RADIOCHIMIQUES

Sûreté nucléaire : garantir le respect des données d'entrée utilisées lors des études d'incident/accident de dimensionnement du Rapport de Sûreté.

Radioprotection (mesures radiochimiques uniquement) : limiter l'exposition des intervenants aux rayonnements provenant des produits de fission, de corrosion activés ou de produits d'activation, que le réacteur soit en fonctionnement ou à l'arrêt.

Environnement : limiter les rejets dans l'environnement . Les limites peuvent être variables selon les sites. Elles sont fixées par les arrêtés de rejet ou par l'ANDRA (pour les colis de déchets).

Durée de fonctionnement : détection d'une dégradation de matériel, la surveillance des paramètres chimiques contribue au maintien de la durée de fonctionnement et la disponibilité des tranches

LES SPECIFICATIONS CHIMIQUES ET RADIOCHIMIQUES

Les **Spécifications** font partie des **Règles Générales d'Exploitation** (RGE).

Les **Spécifications** sont prescriptives

Elles comprennent les paramètres qui :

- ❖ relèvent des RGE, dont le respect est exigé au titre d'un intérêt de la loi TSN et qui sont approuvés de manière générique par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN). Toute évolution de la définition de ces paramètres devra faire l'objet, avant sa mise en application, d'une demande d'accord préalable par l'ASN.
- ❖ ne relèvent pas des RGE, dont le respect est exigé au titre des prescriptions EDF. La possibilité d'y déroger est soumise à l'accord de la Direction de la DPN, tel que décrit dans la Directive 001.

LES SPECIFICATIONS CHIMIQUES ET RADIOCHIMIQUES

Les **Spécifications Chimiques** des centrales de type REP ont été élaborées par les unités d'ingénierie.

Elles sont établies à partir d'éléments de doctrine qui s'appuient sur le rapport de sûreté et les RGE, des documents constructeurs, des documents EDF (notes d'étude, CST, etc.), des guidelines EPRI, du retour d'expérience des CNPE en France et à l'étranger, et des essais de laboratoire et de centrales.

Les Spécifications définissent les principes sur lesquels se base l'exploitant pour limiter la corrosion des matériaux constitutifs des circuits des centrales du type REP, afin de maintenir l'installation dans un état sûr et performant.

Elles sont présentées par **domaine d'exploitation**, et par **système élémentaire**. On trouvera pour chaque paramètre à contrôler, **l'unité de mesure, la valeur attendue et/ou la valeur limite, la fréquence d'analyse et la conduite à tenir** en cas de dépassement d'une valeur limite ou en cas de défaillance d'un automate chimique.

LES SPECIFICATIONS CHIMIQUES ET RADIOCHIMIQUES

Les **Spécifications Radiochimiques** des centrales du type REP ont été élaborées par les unités d'ingénierie

Elles sont établies à partir d'éléments de doctrine qui s'appuient sur le rapport de sûreté, les Règles Générales d'Exploitation, des documents EDF (notes d'étude, de doctrine, etc.) et le retour d'expérience des CNPE.

Les Spécifications sont présentées par **domaine d'exploitation**, et par **système élémentaire**. On trouvera pour chaque paramètre à contrôler, **l'unité de mesure, la valeur attendue et/ou la valeur limite, la fréquence d'analyse et la conduite à tenir** en cas de dépassement ou de non respect de l'un de ces paramètres.

PARTIE 5

LES MESURES CHIMIQUES ET RADIOCHIMIQUES

LES TECHNIQUES UTILISÉES

MESURE DE LA RADIOACTIVITE

LE COMPTEUR PROPORTIONNEL

Principe général de fonctionnement

L'analyse par compteur à gaz ne permet pas de discriminer le radionucléide en présence, seule la nature du rayonnement mesuré peut éventuellement être sélectionnée par un réglage approprié. On parle de mesures globales.

Cette technique est utilisée pour la mesure d'activités globales, de radionucléides spécifiques (après purification), de RX et pour la radioprotection.

Pour les mesures d'activité globale, le résultat est rendu en équivalent à un radionucléide de référence (utilisé pour la détermination du rendement lors de l'étalonnage).



*Évaporateur automatique
PPI Evapro*



*Coupelles avec résidu sec d'eau
et matières en suspension*



*Tiroir d'un compteur
proportionnel
Itech G542 M - Quad*

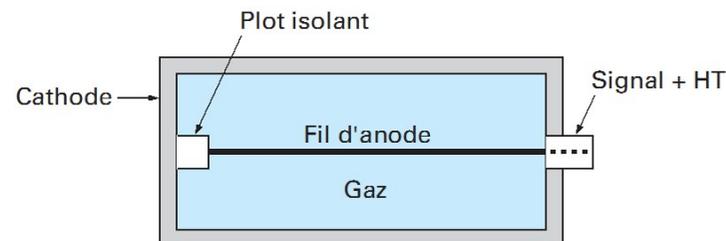
MESURE DE LA RADIOACTIVITE

LE COMPTEUR PROPORTIONNEL

Principe général de fonctionnement

Un compteur proportionnel à gaz se compose des éléments suivants :

- ❖ Une enceinte qui possède une fenêtre étanche à l'air, transparente aux rayonnements, dans laquelle circule un gaz ;
- ❖ Une anode sous forme de filament qui traverse l'enceinte en son centre ;
- ❖ Un générateur et régulateur de haute tension qui génère une différence de potentiel entre la paroi de l'enceinte et le filament (la paroi de l'enceinte constitue la cathode).



Le fonctionnement du compteur proportionnel à gaz repose sur l'ionisation des molécules de gaz par la particule à détecter. Le gaz doit favoriser l'absorption du rayonnement, permettre la collection des charges en évitant les phénomènes de recombinaison et éviter toute instabilité de fonctionnement au cours du phénomène de multiplication.

Les ions et électrons créés sont attirés vers l'anode en provoquant une impulsion de courant ou « coup ». Le nombre de coups obtenu, généralement exprimé en « coups par minute » (cpm) ou « coups par seconde » (cps) est donc proportionnel au nombre de particules ayant traversé le détecteur.

MESURE DE LA RADIOACTIVITE

LA SCINTILLATION LIQUIDE

La mesure de certains radionucléides émetteurs β uniquement (dits « β purs ») nécessite l'emploi d'une technique dédiée.

La scintillation fonctionne en plusieurs étapes :

- A. Excitation du scintillateur par la particule β** \Rightarrow La désexcitation du scintillateurs produit un photon
- B. Collecte du/des photon(s) par une photocathode émettant des e^-**
- C. Démultiplication du signal et traitement**

Le principe de détection repose sur deux propriétés :

- ❖ L'intensité lumineuse d'une scintillation est proportionnelle à l'énergie cédée par le rayonnement ;
- ❖ Le nombre de scintillations par seconde est proportionnel à l'activité de la source.

Dans le cas de la scintillation liquide, le scintillant est mélangé directement avec l'échantillon pour limiter les pertes en énergie \rightarrow Indispensable pour les particules de faibles énergie.

Il existe également des scintillateurs solides et gazeux : NaI, ZnS, plastique...

MESURE DE LA RADIOACTIVITE

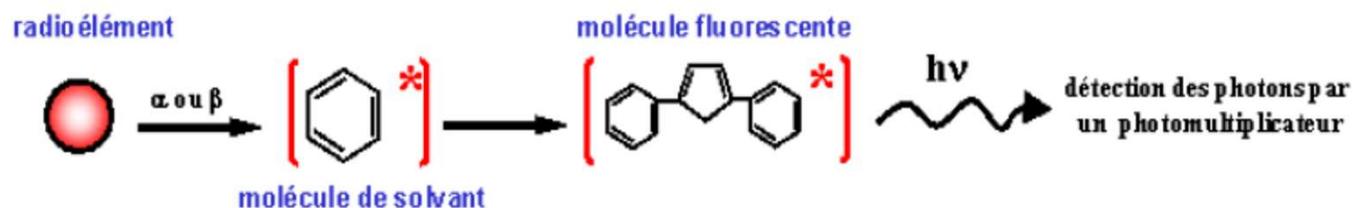
LA SCINTILLATION LIQUIDE

Le liquide scintillant est un transformateur de rayonnement ionisant en lumière permettant la détection des radionucléides émetteurs bêta essentiellement (^3H , ^{14}C , ^{63}Ni , etc.)

→ Utilisés par tous les laboratoires de mesure de radioactivité selon le schéma suivant : mélange de l'échantillon et du liquide scintillant dans des proportions définies et figées

Composition : Solvant + scintillateurs (primaire & secondaire) + surfactant

→ Milieu organique



Rôles : (1) excitation suite à la désintégration de l'atome radioactif, (2) transfert de l'énergie d'excitation et (3) excitation des solutés fluorescents

→ Emission de photons

Une extraction du RN d'intérêt est parfois réalisée afin d'éliminer les interférences (chimiques, RN...), changer de solvant et/ou de le concentrer.

Il est possible de réaliser de la scintillation liquide sur des solides mis en suspension, un solvant sous forme de gel est alors utilisé.

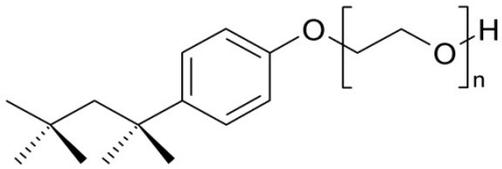
MESURE DE LA RADIOACTIVITE

LA SCINTILLATION LIQUIDE

Composition des liquides scintillants : Solvant + scintillateurs (primaire & secondaire) + surfactant

➤ Surfactant :

*Ethoxylates de nonylphenol
(NPE)*

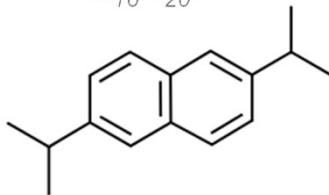


Ex : Triton – X -100

- ✓ Miscibilité du liquide scintillant / échantillons aqueux
- ✓ Stabilisation du mélange phase aqueuse / phase organique
- ✓ Optimisation des transferts d'énergie

➤ Solvant :

*Di-isopropylnaphtalène
(DIN)*



- ✓ Solvant inerte, transparent à la lumière, peu volatil, avec un point éclair élevé & économique

MESURE DE LA RADIOACTIVITE

LA SCINTILLATION LIQUIDE

Exemple de radionucléides pouvant être mesurés par scintillation liquide :

- ^3H : $E_{\text{max}} = 18,6 \text{ keV}$
- ^{14}C : $E_{\text{max}} = 156,5 \text{ keV}$
- ^{32}P : $E_{\text{max}} = 1,71 \text{ MeV}$
- ^{35}S : $E_{\text{max}} = 167,3 \text{ keV}$
- ^{36}Cl : $E_{\text{max}} = 710 \text{ keV}$ (98%)
- ^{55}Fe : $E_{\text{max}} = 5,9$ (25%) et $6,5 \text{ keV}$ (3,4%) (RX)
- ^{59}Fe : $E_{\text{max}} = 273 \text{ keV}$ (45%) 466 keV (53%)
- ^{63}Ni : $E_{\text{max}} = 67,0 \text{ keV}$
- ^{90}Sr - ^{90}Y : $E_{\text{max}} = 546,0 \text{ keV}$ et $2,28 \text{ MeV}$
- ^{99}Tc : $E_{\text{max}} = 294 \text{ keV}$



*Mélange échantillon
– liquide scintillant*

MESURE DE LA RADIOACTIVITE

LA SPECTROMETRIE GAMMA

Un photon γ ne peut être détecté que s'il interagit avec la matière, dans notre cas le détecteur, en cédant tout ou partie de son énergie à un ou plusieurs électrons du milieu.

Le type d'interaction dépend du matériau traversé et de l'énergie du photon incident. Trois types d'interaction peuvent se produire :

- ❖ **Pas d'interaction**
- ❖ **Déviaton sans communication d'énergie** (diffusion Rayleigh)
- ❖ **Effet photoélectrique** : absorption totale du photon γ
- ❖ **Effet Compton** : choc élastique sur un e^- du cortège électronique de l'atome
- ❖ **Création de paire** : matérialisation du photon γ dans le champ d'un noyau en une paire e^- / e^+

(i.e. : création de 2 photons d'annihilation de 511 keV) *photon initial d'énergie > 1 022 keV.*

MESURE DE LA RADIOACTIVITE

LA SPECTROMETRIE GAMMA

Trois grandes technologies de détecteurs permettent l'observation des rayonnements gamma :

- ❖ **Les scintillateurs** : utilisation de scintillateurs solides
- ❖ *L'ionisation de gaz (peu utilisée)*
- ❖ **Semi-conducteurs (ionisation solide)** :

La réalisation d'une interaction par un photon gamma avec un détecteur est de 3 eV pour un semi-conducteur (électron-trou), 30 eV pour une ionisation de gaz (électron-ion) et 350 eV pour une scintillation (NaI).

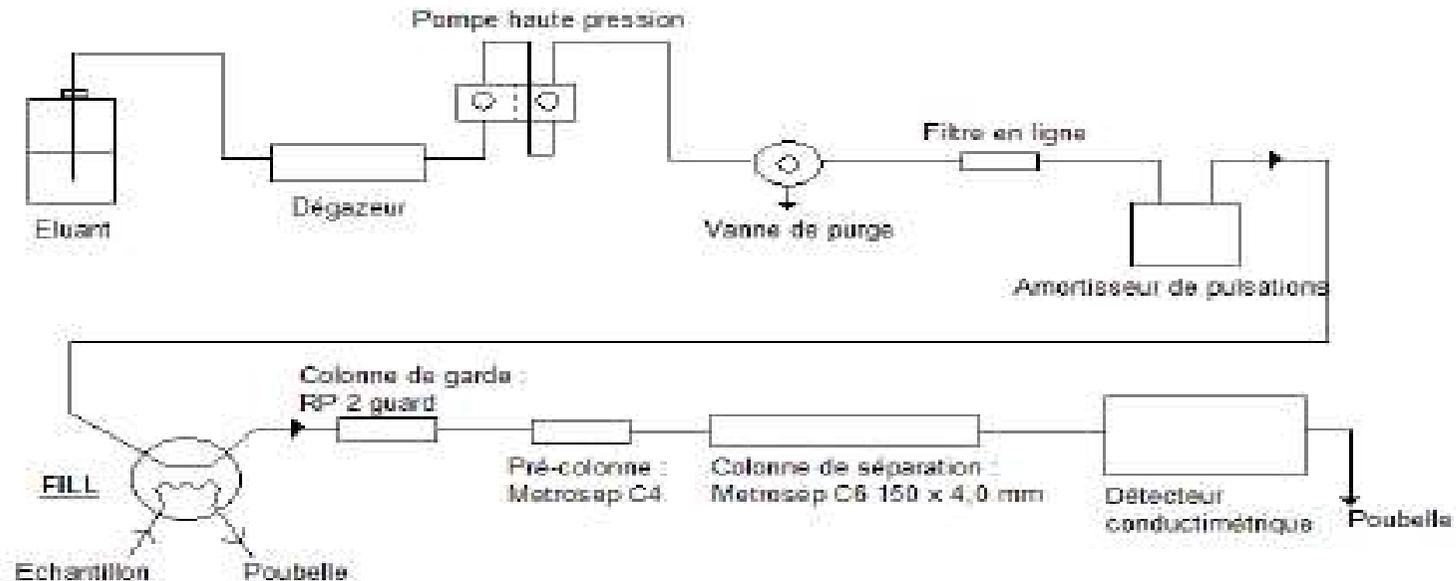
Chaque type de détecteur présente des avantages et des contraintes spécifiques l'orientant vers un usage particulier (mesure globale, analyse fine, utilisation de terrain...).

Le domaine des émissions de photons gamma va de 10 keV à 10 MeV, chaque type de spectrométrie est conçue pour exceller dans un domaine particulier. On ne mesure pas de la même manière les très faibles et hautes énergies, le domaine d'activité joue également une grande importance.

Il n'existe donc pas une chaine de spectrométrie gamma mais des chaines, chacune spécifique au besoin !

MESURE CHIMIQUE

CHROMATOGRAPHIE IONIQUE



La **chromatographie ionique** est une méthode d'analyse séparative qui s'applique aux ions.

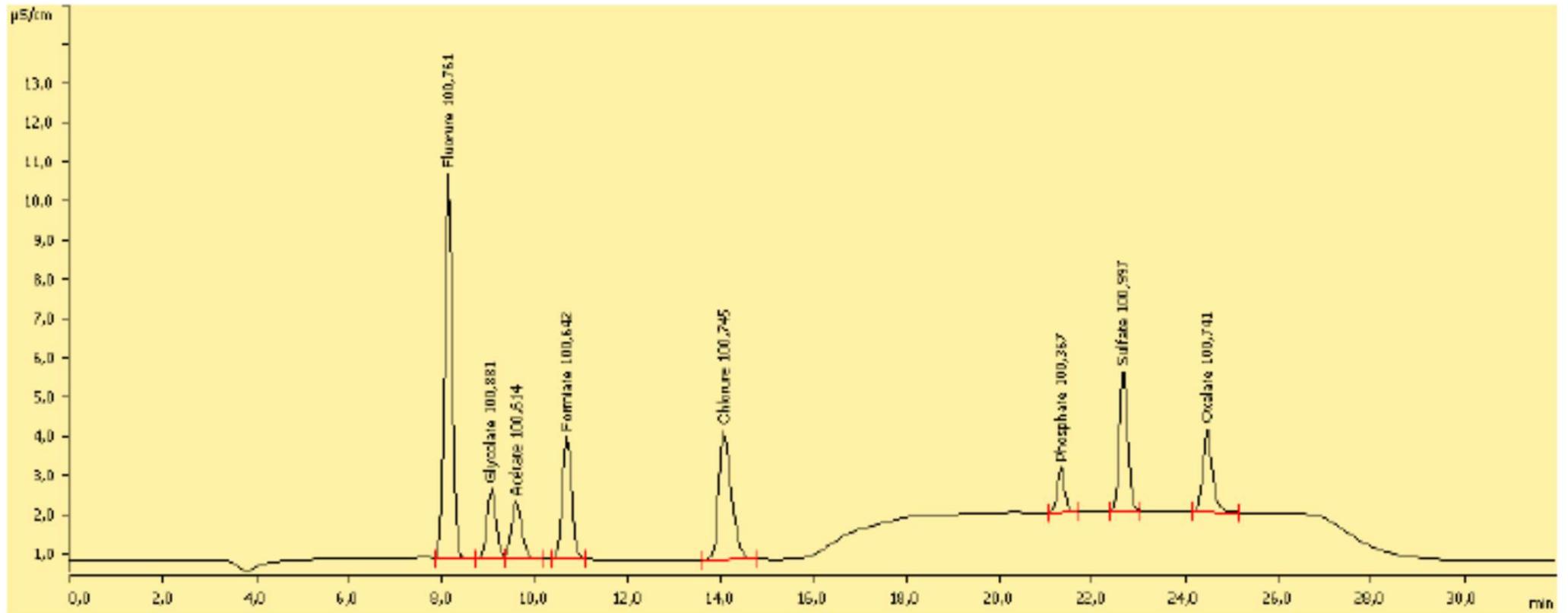
1. Introduction de de l'échantillon en tête de colonne de séparation
2. Un éluant permet la migration des ions dans la colonne
3. La séparation s'effectue en fonction des affinités des ions avec l'éluant et la phase stationnaire (résine échangeuse d'ions)
4. Détection en sortie des ions par conductimétrie => mesure de la conductance de la phase mobile entre deux microélectrodes

Les informations fournies sont les suivantes :

- ❖ Temps de rétention pour identification des composants
- ❖ Surface des pics pour quantification du composant

MESURE CHIMIQUE

CHROMATOGRAPHIE IONIQUE



MESURE CHIMIQUE

ICP-MS (Inductively coupled Plasma - Mass Spectrometry)

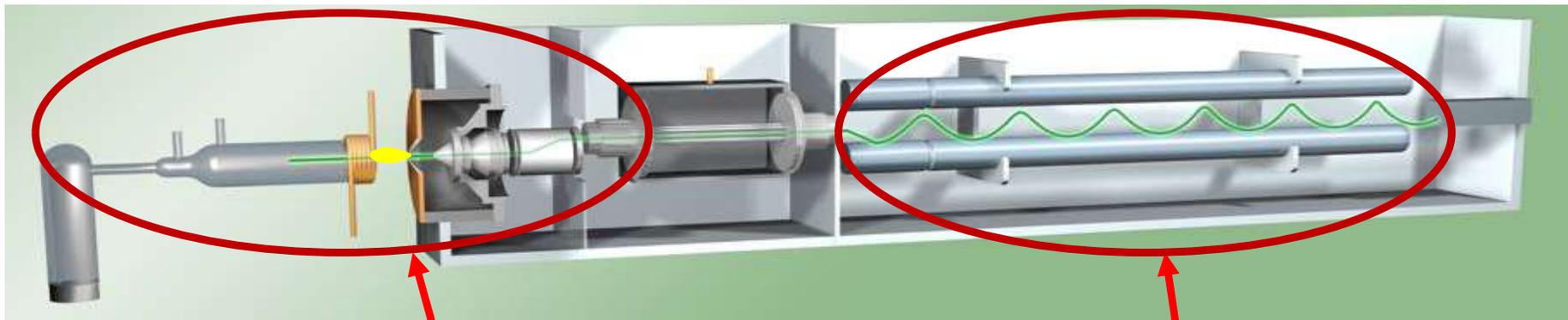
❖ **Technique multi-élémentaire** : permet de mesurer tous les éléments en 1 seule analyse, solution étalon multi-élémentaire contenant tous les éléments à doser



Multi-élémentaire ne signifie pas que tous les éléments du tableau périodique sont mesurables par cette technique (prise en compte du potentiel d'ionisation des éléments)

❖ **Technique sensible** : permet de descendre à des concentrations de l'ordre de 100 ng/L

❖ **Temps d'analyse courts** : quelques minutes par échantillon



ICP – Torche Plasma à couplage inductif

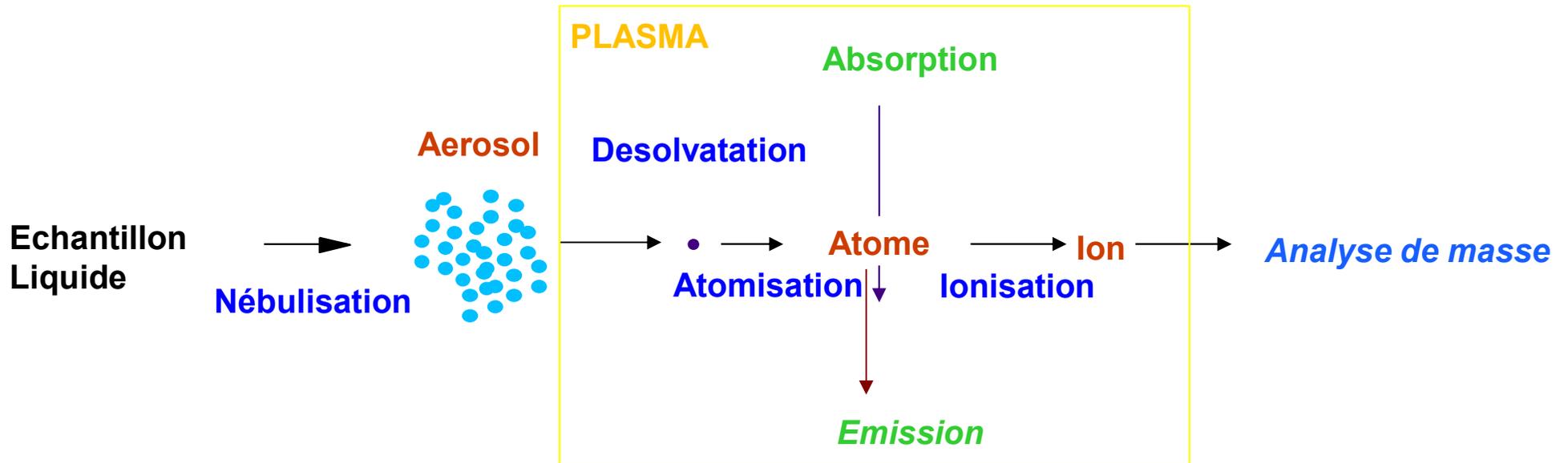
- Haute température (~6500 K)
- Décompose, atomise et ionise l'échantillon

MS – Spectromètre de Masse

- Mesure multiélémentaire pour les masses allant de 7 à 250 uma (Li à U...)
- Mesure rapports isotopiques

MESURE CHIMIQUE

ICP-MS (Inductively coupled Plasma - Mass Spectrometry)



- ❖ Les échantillons liquides sont transformés en aérosol au moyen d'un nébuliseur et d'une chambre de nébulisation refroidie par effet Peltier à 2°C.
- ❖ Dans le plasma d'argon, l'échantillon est désolvaté et les composés présents se décomposent en atomes constituants puis sont ionisés.
- ❖ Les ions sont extraits du plasma via l'interface (cônes), puis transitent dans l'optique ionique dont le rôle est de focaliser les ions vers le détecteur de masse.
- ❖ Dans le spectromètre de masse, les ions positifs sont filtrés en fonction de leur rapport masse sur charge (m/z)

PARTIE 6

LE CIRCUIT PRIMAIRE

LES PARAMÈTRES MESURÉS

LES PARAMETRES RADIOACTIFS MESURES

Paramètre	Origine	Objectifs de mesure	Enjeu	Moyen de mesure
Rapport $^{133}\text{Xe}/^{135}\text{Xe}$	Produits de fission	Détection d'une perte d'étanchéité du circuit primaire	sûreté	Spectrométrie gamma
^{131}I et ^{133}Xe	Produits de fission	Qualification réacteur « propre » ou « sans défaut » lors transitoire important ou lors du transitoire de mise à arrêt du réacteur En amont du transitoire, anticiper l'obtention des critères radiochimiques pour ajuster la stratégie de la mise à l'arrêt	Sûreté et environnement	Spectrométrie gamma
^{134}Cs et ^{137}Cs	Produits de fission	Estimation de l'épuisement du combustible inétanche	Sûreté	Spectrométrie gamma
Mesure de l'indice de radioactivité alpha global	Produits issus de captures neutroniques de ^{235}U et ^{238}U et ^{238}Pu	Surveillance de la dissémination combustible	Radioprotection	Compteur proportionnel
^{134}I	Produit de fission	Surveillance de la dissémination de matière fissile Diagnostic de l'état de la gaine combustible lors redémarrage	Sûreté	Spectrométrie gamma

LES PARAMETRES RADIOACTIFS MESURES

Paramètre	Origine	Objectifs de mesure	Enjeu	Moyen de mesure
Radionucléides émetteurs alpha	Produits issus des captures neutroniques de ^{235}U , ^{238}U , et ^{238}Pu	Surveillance de la dissémination de la matière fissile	Radioprotection	Spectrométrie alpha
Indice de radioactivité gamma global	Produits de fission et d'activation	Surveillance de la dissémination de matière fissile	Sûreté, radioprotection et environnement	Spectrométrie gamma
Equivalent ^{131}I (1)	Produits de fission	Respect des hypothèses de calcul des conséquences radiologiques d'un accident	Sûreté, radioprotection et environnement	Spectrométrie gamma
Somme des gaz (2)	Produits de fission	Paramètre de décision vis à vis de la limitation des conséquences d'une défaillance de la première barrière en fonctionnement incidentel/accidentel	Sûreté , Radioprotection	Spectrométrie gamma
^{58}Co et ^{51}Cr	Produits de corrosion activés	Maîtrise du terme source en produits de corrosion activés	Sûreté, Radioprotection	Spectrométrie alpha
Tritium	Produit d'activation	Maîtrise du terme source en produits d'activation	Sûreté, radioprotection et environnement	Scintillation liquide

$$(1) A(Eq. ^{131}\text{I}) = A(^{131}\text{I}) + \frac{A(^{132}\text{I})}{30} + \frac{A(^{133}\text{I})}{4} + \frac{A(^{134}\text{I})}{50} + \frac{A(^{135}\text{I})}{10}$$

$$(2) A(\Sigma\text{Gaz}) = A(^{133m}\text{Xe}) + A(^{133}\text{Xe}) + A(^{135}\text{Xe}) + A(^{138}\text{Xe}) + A(^{85m}\text{Kr}) + A(^{87}\text{Kr}) + A(^{88}\text{Kr})$$

LES PARAMETRES CHIMIQUES MESURES

Paramètre	Origine	Objectifs de mesure	Enjeu	Moyen de mesure
Bore	Produit de conditionnement	Contrôle de la réactivité	Sûreté	Titrimétrie
Lithium	Produit de conditionnement	Maîtrise du pH de moindre corrosion du circuit primaire	Sûreté	SAA et CIPL
Hydrogène	Produit de conditionnement	Maîtriser les conditions réductrices du circuit primaire afin de limiter la corrosion	Sûreté	CPG
Oxygène	Présence résiduelle dans le fluide primaire en fonctionnement	Maîtriser la corrosion du circuit primaire S'assurer de la limitation du risque d'explosion en raison de la présence d'un mélange H ₂ /O ₂	Sûreté	Oxygène mètre en ligne (conductimétrie)
Chlorures et fluorures	Présence résiduelle dans le fluide primaire	Maîtrise de la corrosion du circuit primaire	Sûreté	CIPL
Sodium	Présence résiduelle dans le fluide primaire	Maîtrise de la corrosion du circuit primaire	Sûreté	ICP-MS et CIPL
Sulfates	Présence résiduelle dans le fluide primaire	Maîtrise de la corrosion dans le fluide primaire	Sûreté	CIPL
Phosphates	Produit de conditionnement	Maîtrise de la corrosion du circuit primaire	Sûreté	CIPL

LES PARAMETRES CHIMIQUES MESURES

Paramètre	Origine	Objectifs de mesure	Enjeu	Moyen de mesure
pH	///	Maîtriser la corrosion dans le circuit primaire		pH mètre en ligne (conductimétrie)
Silice	Résines échangeuse d'ions utilisées pour le traitement des effluents	Maîtrise de la corrosion du circuit primaire	Sûreté	SAM
Calcium/aluminium/magnésium	Produits résiduels présents dans le circuit primaire	Limiter la formation de dépôts indésirables dans les circuits (notamment au niveau des échangeurs GV)	Exploitation	ICP-MS
Matière En Suspension	Produits de corrosion	Indicateurs de l'efficacité du conditionnement	Sûreté	Pesée
Fer et Cuivre	Produits de corrosion	Indicateurs de l'efficacité du conditionnement	Sûreté	ICP-MS

PARTIE 7

LE CIRCUIT SECONDAIRE

LES PARAMÈTRES MESURÉS

LES PARAMETRES RADIOACTIFS MESURES

Paramètre	Origine	Objectifs de mesure	Enjeu	Moyen de mesure
Tritium	Produits de fission	Indicateurs sur les fuites du circuit primaire vers le circuit secondaire	Sûreté, radioprotection, environnement	Scintillation liquide
^{16}N	Produit d'activation	Indicateur sur les fuites du circuit primaire vers le circuit secondaire	Sûreté, radioprotection, environnement	Spectrométrie gamma
Indice de radioactivité gamma global + produits de fission et produits de corrosion activés	Produits de fission et d'activation	Indicateur sur les fuites du circuit primaire vers le circuit secondaire	Sûreté, radioprotection et environnement	Spectrométrie gamma

LES PARAMETRES CHIMIQUES MESURES

Paramètre	Origine	Objectifs de mesure	Enjeu	Moyen de mesure
Oxygène	Présence résiduelle	Maîtriser la corrosion du circuit primaire S'assurer de la limitation du risque d'explosion en raison de la présence d'un mélange H ₂ /O ₂	Sûreté	Oxygène mètre en ligne (conductimétrie)
Chlorures et fluorures	Présence résiduelle	Maîtrise de la corrosion du circuit primaire	Sûreté	CIPL
Sodium	Présence résiduelle	Maîtrise de la corrosion du circuit primaire	Sûreté	CIPL et ICP-MS
Sulfates	Présence résiduelle	Maîtrise de la corrosion dans le fluide primaire	Sûreté	CIPL
Phosphates	Produit de conditionnement	Maitrise de la corrosion du circuit primaire	Sûreté	CIPL
Anions	Polluants	Détection de faibles concentrations en polluants anioniques (sauf Soude)	Sûreté	CIPL

LES PARAMETRES CHIMIQUES MESURES

Paramètre	Origine	Objectifs de mesure	Enjeu	Moyen de mesure
pH	///	Maîtriser la corrosion dans le circuit primaire	Sûreté	pH mètre en ligne (conductimétrie)
Hydrazine	Produit de conditionnement	Élimination de l'oxygène et limitation de la corrosion des circuits	Sûreté	SAM et CIPL
Silice	Résines échangeuse d'ions utilisées pour le traitement des effluents	Maîtrise de la corrosion du circuit primaire	Sûreté	SAM
Conductivité totale	///	Indicateur de pureté de l'eau déminéralisée	Sûreté	Conductimétrie en ligne
Calcium/aluminium/magnésium	Produits résiduels présents dans le circuit primaire	Limiter la formation de dépôts indésirables dans les circuits (notamment au niveau des échangeurs GV)	Exploitation	ICP-MS
Matière En Suspension	Produits de corrosion	Indicateurs de l'efficacité du conditionnement	Sûreté	Pesée
Fer et Cuivre	Produits de corrosion	Indicateurs de l'efficacité du conditionnement	Sûreté	ICP-MS
Morpholine / Ethanolamine / Ammoniaque	Produits de conditionnement	Atteinte du pH de moindre corrosion	Sûreté	CIPL

PARTIE 8

LE CIRCUIT TERTIAIRE

LES PARAMÈTRES MESURÉS

LES PARAMETRES BIOLOGIQUES MESURES

Paramètre	Origine	Objectifs de mesure	Enjeu
Légionelles	Formation bactérienne	Efficacité du traitement à la monochloramine - Surveillance	Environnement / Sanitaire
Amibes	Formation de microorganisme	Efficacité du traitement à la monochloramine - Surveillance	Environnement / Sanitaire

PARTIE 9

LA MAÎTRISE DES REJETS CHIMIQUES ET RADIOACTIFS

LES PARAMÈTRES MESURÉS

L'ORIGINE DES REJETS

L'exploitation d'une centrale nucléaire entraîne la production d'effluents radioactifs, chimiques et thermiques dont les rejets dans l'environnement sont strictement réglementés.

Les effluents sont collectés et traités selon leur nature afin notamment de réduire les rejets (décroissance de la radioactivité, recyclage de l'acide borique, destruction de l'hydrazine...). Les rejets sont contrôlés par des analyses préalables ainsi qu'au moyen de dispositifs de mesure de la radioactivité en continu pendant le rejet.

Depuis les années 1980 l'amélioration de la gestion des effluents a permis de réduire les rejets d'activité de gaz rares d'un facteur 50 et les rejets liquides de 100 hors ^3H et ^{14}C .

Parmi les différents types de rejet, on distingue :

- ❖ **Les rejets radioactifs liquides et gazeux** issus des circuits nucléaires (circuit primaire et auxiliaires nucléaires, piscine de désactivation du combustible utilisé...) qui contiennent également des substances chimiques,
- ❖ **les rejets chimiques non radioactifs** provenant :
 - des salles des machines (circuit dit « secondaire »),
 - du circuit tertiaire,
 - de la station de déminéralisation,
 - de la station d'épuration des eaux usées,
 - des égouts collectant notamment les eaux de pluie.

L'ORIGINE DES RADIONUCLÉIDES REJETES

De nombreux radionucléides sont formés durant le fonctionnement du réacteur mais seul certains et en petite quantité sont présents dans les rejets.

Les radionucléides ont deux origines possibles :

Produits de Fission : issus de la réaction de fission

Les PF sont confinés en quasi-totalité dans le combustible

Principaux : ^{85}Kr , ^{113}Xe , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I , ^{129}I

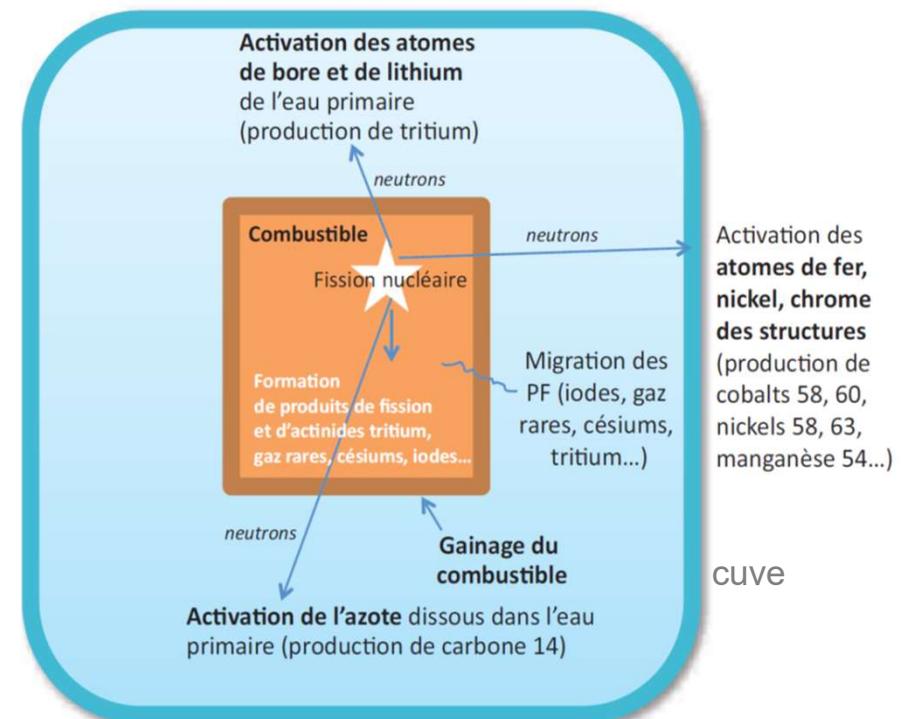
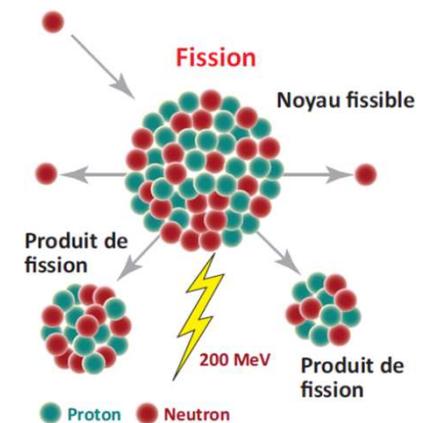
Produits d'Activation : issus de l'activation sous flux neutronique d'éléments divers (matériaux, composés chimiques, impuretés...).

Les PA produits dans le combustibles sont confinés en quasi-totalité.

Les systèmes d'épuration du primaire retiennent certains radionucléides.

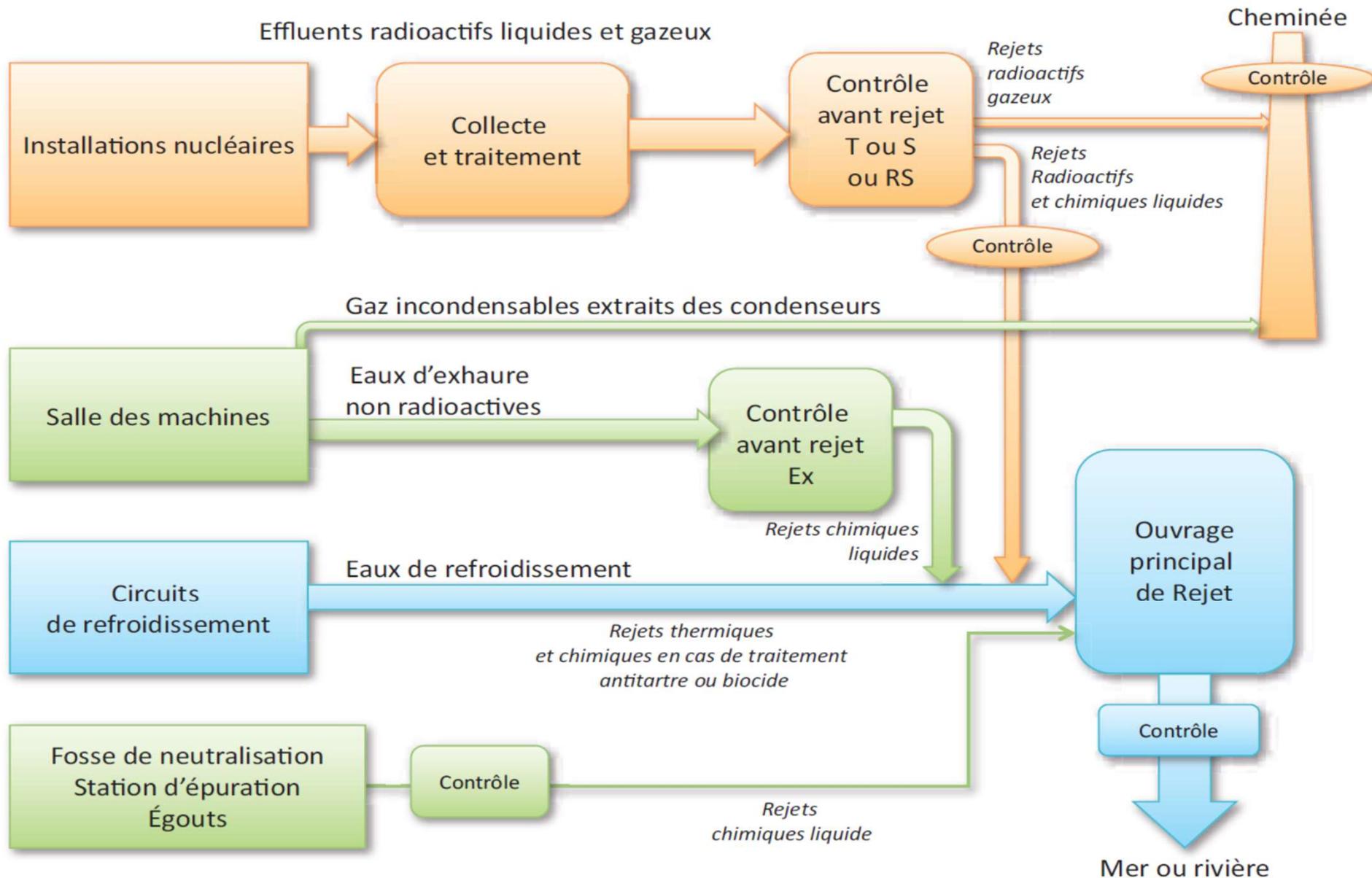
Principaux : ^{60}Co , ^{58}Co , ^{124}Sn , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{51}Cr , ^{63}Ni , ^{14}C , ^3H

Remarque : Des radionucléides émetteurs alpha (U, Pu, Np, Am, Cu) sont produits mais sont contenus dans le combustible, ils sont donc absents des rejets.



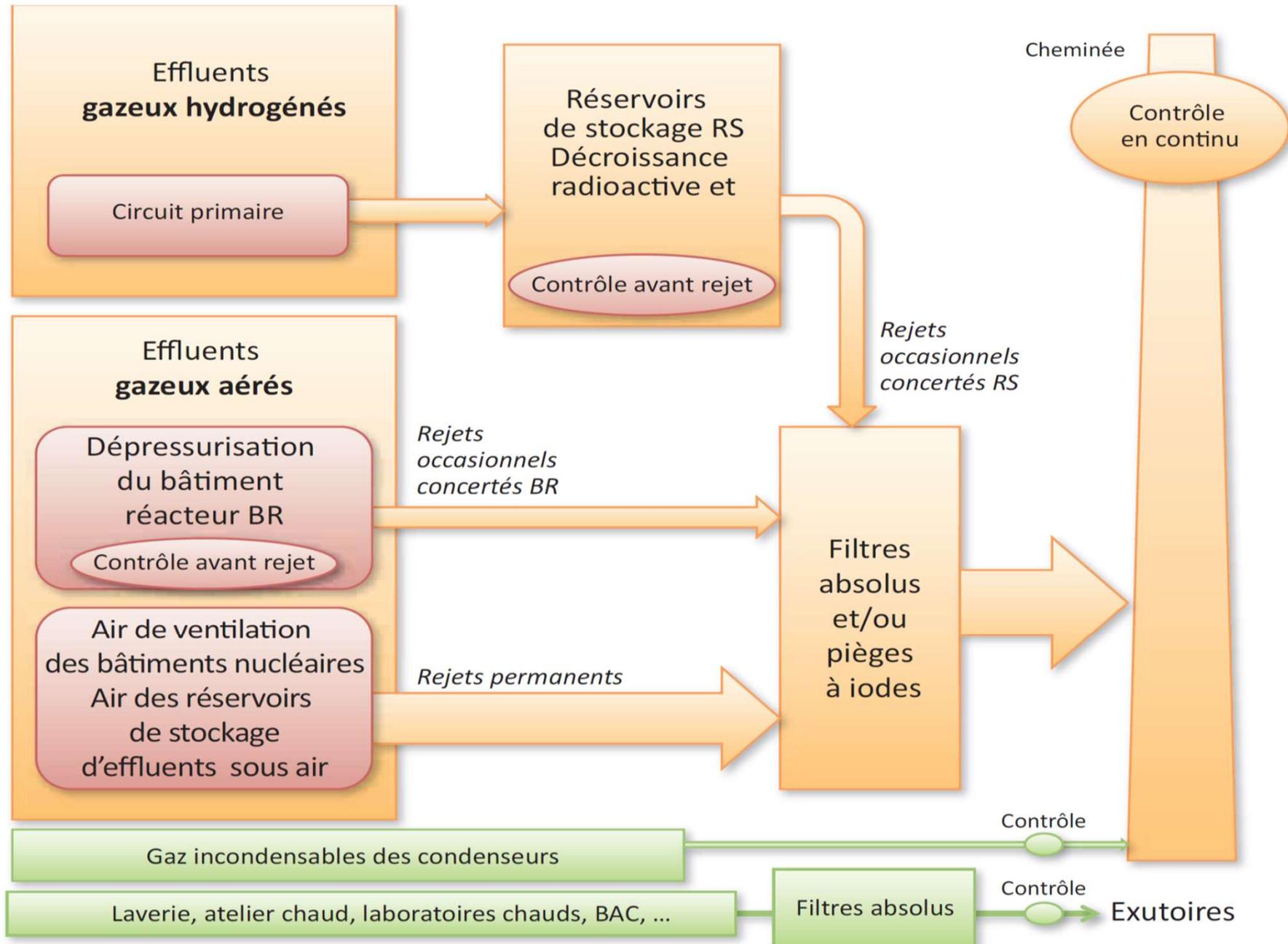
LES SYSTÈMES DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS

Schéma de principe de la collecte, du traitement et du contrôle des effluents



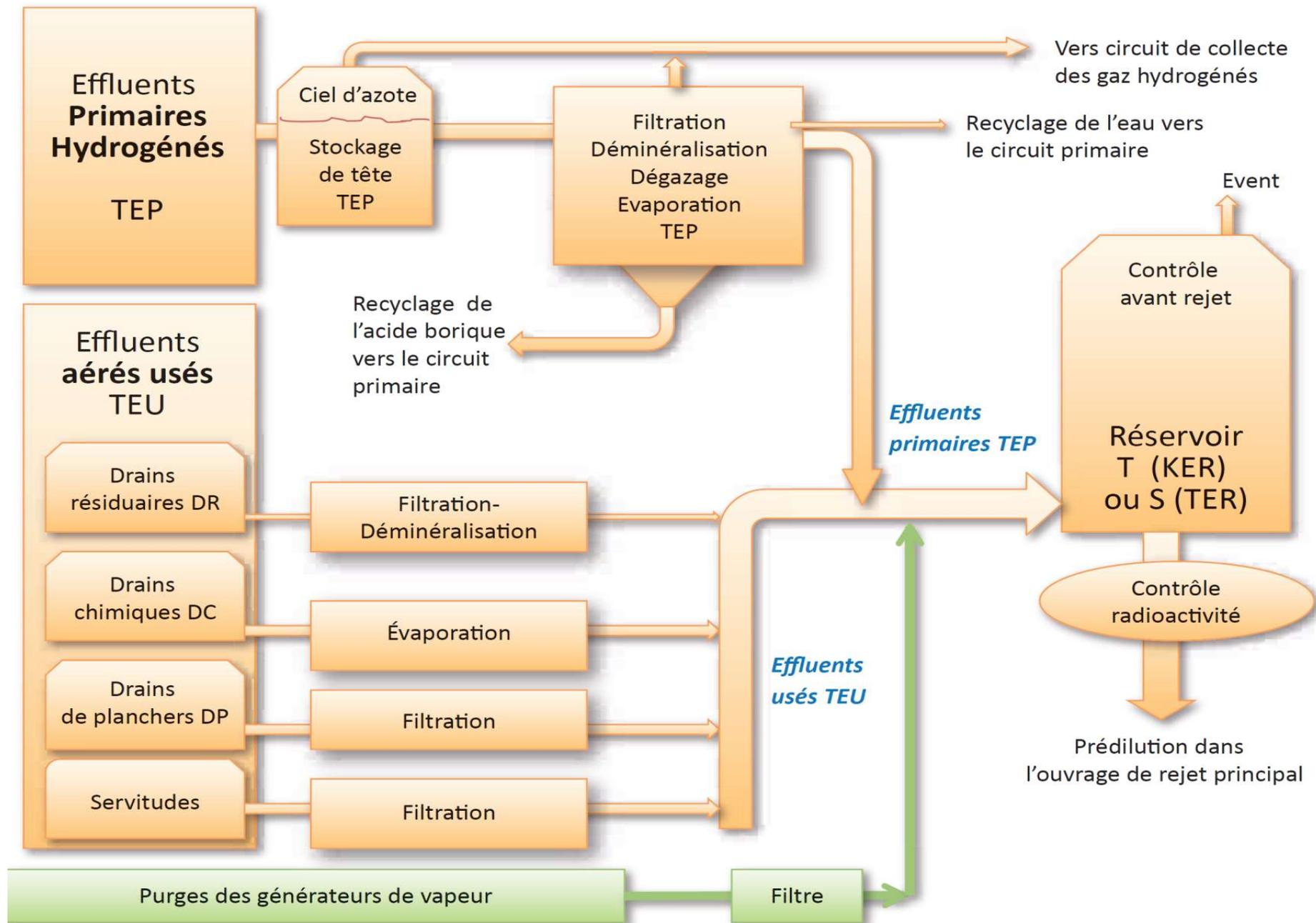
LES SYSTÈMES DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS

Schéma de principe de la collecte, du traitement et du contrôle des effluents radioactifs gazeux



LES SYSTÈMES DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS

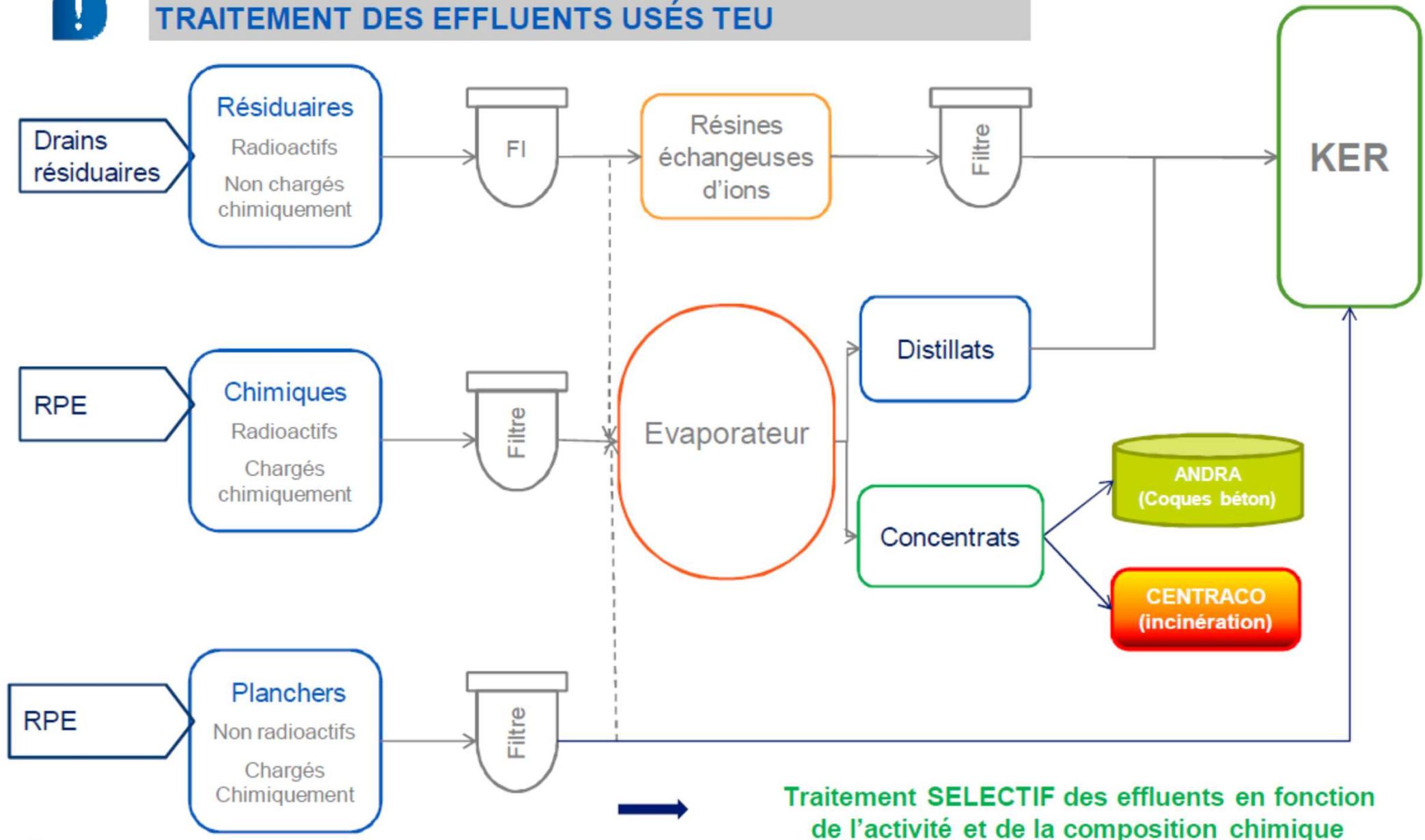
Schéma de principe de la collecte, du traitement et du contrôle des effluents radioactifs liquides



LES SYSTÈMES DE TRAITEMENT DES EFFLUENTS



TRAITEMENT DES EFFLUENTS USÉS TEU



LES PARAMETRES REGLEMENTES

REJETS RADIOACTIFS

Extrait de la décision des limites de rejets du CNPE de Saint Alban
Rejets d'effluents radioactifs gazeux

[EDF-SAL-124] L'activité des effluents radioactifs rejetés à l'atmosphère par les installations du site sous forme gazeuse ou d'aérosols solides n'excède pas les limites annuelles suivantes :

PARAMÈTRES	ACTIVITÉ ANNUELLE REJETÉE (en GBq/an)
Carbone 14 Scintillation liquide	1 400
Tritium Scintillation liquide	4 500
Gaz rares Spectrométrie gamma	25 000
Iodes Spectrométrie gamma	0,8
Autres produits de fission ou d'activation émetteurs bêta ou gamma Spectrométrie gamma	0,1

L'exploitant doit être en mesure de fournir la répartition des émissions atmosphériques par cheminée.

[EDF-SAL-125] Le débit d'activité à la cheminée de chaque bâtiment des auxiliaires nucléaires (BAN) n'excède pas les limites suivantes :

PARAMÈTRES	DÉBIT D'ACTIVITÉ PAR CHEMINÉE (en Bq/s)
Tritium	$5 \cdot 10^6$
Gaz rares	$5 \cdot 10^7$ (1)
Iodes	$5 \cdot 10^2$ (2)
Autres produits de fission ou d'activation émetteurs bêta ou gamma	$5 \cdot 10^2$

(1) Ce débit d'activité peut être dépassé sans toutefois que le débit d'activité pour l'ensemble du site ne dépasse 1.10^8 Bq/s.
(2) Ce débit d'activité peut être dépassé sans toutefois que le débit d'activité pour l'ensemble du site ne dépasse 1.10^3 Bq/s.
L'exploitant devra justifier chaque dépassement de débit d'activité par cheminée dans les registres prévus au I de l'article 4.4.2 de l'arrêté du 7 février 2012.

LES PARAMETRES REGLEMENTES

REJETS RADIOACTIFS

Extrait de la décision des limites de rejets du CNPE de Saint Alban

Rejets d'effluents radioactifs liquides

[EDF-SAL-130] L'activité des effluents liquides radioactifs n'excède pas les limites annuelles suivantes :

PARAMÈTRES	LIMITES ANNUELLES (en GBq/an)
Tritium	80 000
Carbone 14	190
Iodes	0,1
Autres produits de fission ou d'activation émetteurs bêta ou gamma	10

[EDF-SAL-131] Le débit d'activité au point de rejet principal pour un débit D (l/s) du Rhône est au maximum, en valeur moyenne sur 24 heures, de :

PARAMÈTRES	DÉBIT D'ACTIVITÉ (Bq/s)
Tritium	80 x D
Iodes	0,1 x D
Autres produits de fission ou d'activation émetteurs bêta ou gamma	0,7 x D

LES PARAMETRES REGLEMENTES

REJETS CHIMIQUES

Extrait de la décision des limites de rejets du CNPE de Saint Alban

SUBSTANCES		PRINCIPALES ORIGINES	FLUX 2 H ajouté (kg)	FLUX 24 H ajouté (kg)	FLUX ANNUEL ajouté (kg)	CONCENTRATION maximale ajoutée dans le canal de rejet (mg/l)
Acide borique (1) (5)	SAM	Réservoirs T et S	300	1 500	14 000	0,574
Morpholine (2)	CIPL	Réservoirs T, S et Ex « SEO »	-	17 (3)	700	0,155
Ethanolamine (2)	CIPL	Réservoirs T, S et Ex « SEO »	-	9,5 (3)	350	0,038
Hydrazine (5)	SAM/CIPL	Réservoirs T, S et Ex	-	1,5 (4)	17	0,002
Détergents	SAM	Réservoirs T et S	160	200	3 000	0,306
Azote (ammonium + nitrates + nitrites)	CIPL	Réservoirs T, S et Ex	-	55	6 900	0,08
Phosphates	CIPL	Réservoirs T, S et Ex « SEO »	100	150	1 600	0,191
Sodium	ICP-MS / CIPL	Station de déminéralisation	85	770	-	0,163
Chlorures	CIPL	Station de déminéralisation	125	1 050	-	0,235
Métaux totaux	ICP-MS	Réservoirs T, S et Ex	-	-	70 (6)	0,005
MES	Pesée	Réservoirs T, S et Ex	-	80	-	0,061
DCO	SAM	Réservoirs T, S et Ex	-	150	-	0,255

QUELS ORDRES DE GRANDEUR POUR LES REJETS

Rejets radioactifs – Années 2002-2011

	Rejets liquides GBq/an /unité	Rejets gazeux GBq/an /unité
Tritium	10 000 à 30 000	200 à 2 000
Carbone 14	10 à 20	130 à 270
Iode	< 0,01	0,01 à 0,32
Autres PF/PA	< 1	0,002 à 0,007
Gaz rares	-	300 à 2 300

Les rejets des sites sont conformes aux autorisations de rejet.

*Rejets chimiques hors tertiaire et condenseur
Années 2002-2011*

Origine et substance		Quantité kg/an /unité
Primaire / secondaire	Acide borique	1 000 à 7 000
	Hydrazine	< 6
	Lithine	< 1
	Morpholine	40 à 250
	Ethanolamine	10 à 150
	Ammonium	< 3000
	Phosphates	< 1000
Déminé.	Sulfates	< 70 000
	Chlorures	1 500 à 100 000
	Sodium	5 000 à 60 000
	Matières en suspension	150 à 50 000
Station d'épuration	Bromoformes	3 000 à 20 000
	Azote K	< 800
	DBO 5	< 400
	DCO	< 2 000
	P	< 200
	Matières en suspension	< 1 100

PARTIE 10

LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT

LES PARAMÈTRES MESURÉS

LA SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT - RÉGLEMENTATION

La surveillance de l'environnement est une exigence réglementaire, le contenu minimum de cette surveillance est prescrit.

Cette surveillance vise deux objectifs principaux :

- ❖ Vérifier la bonne dilution des rejets dans le milieu récepteur, conformément à des limites définies ;
- ❖ Observer les éventuels impact de l'installation sur l'environnement dans le temps.

Les prélèvements et mesures sont réalisés sous couvert d'agréments au [Réseau National de Mesure de la radioactivité de l'environnement](#) délivrés par l'ASN.

Ces agréments sont conditionnés par la réussite à des Essais Inter-Laboratoires organisés par l'IRSN et une conformité des pratiques à la norme NF EN ISO/IEC 17025.

Les résultats de la surveillance radiologique de l'environnement réalisée par l'ensemble des exploitants nucléaires, de l'administration... sont mis à disposition du public sur le site du RNM www.mesure-radioactivite.fr (1,4 millions de résultats disponibles).



LES PARAMETRES RADIOACTIFS REGLEMENTES

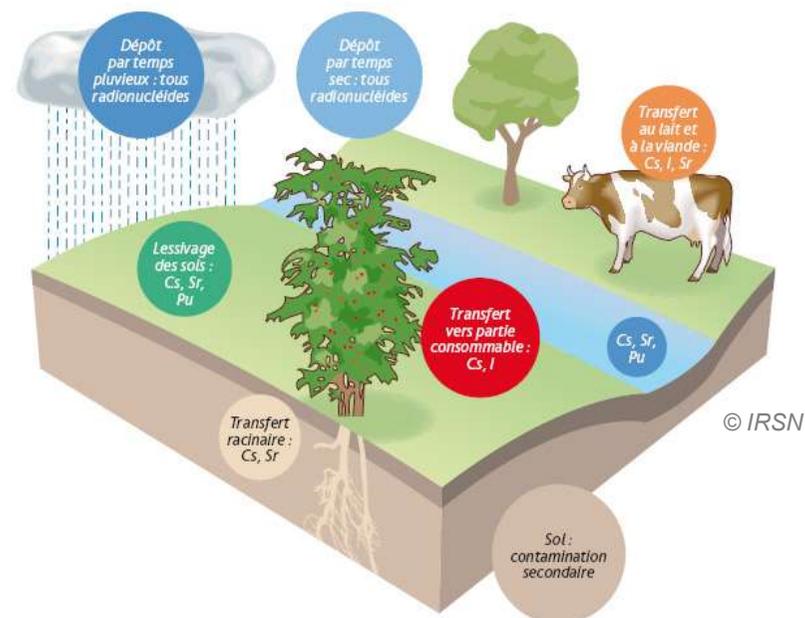
Matrice		Mesure	Fréquence	Prélèvement	Seuil de décision
EAU	En aval du site	Tritium	1 / jour	Aliquote	5 Bq/L
		B global + K Tritium	Lors du rejet	Aliquote	0,2 Bq/L 5 Bq/L
	Eau de mer	B global + K Tritium	Tous les 15 jours	Ponctuel	0,2 Bq/L 5 Bq/L
	Eau de pluie	B global + K Tritium	1 / mois	Continu	0,2 Bq/L 5 Bq/L
	Eau souterraine	B global + K Tritium	De 15 jours à 6 mois	Ponctuel	0,2 Bq/L 5 Bq/L
AIR	Aérosols	β global	1 / jour	Continu	1 mBq/m ³
	Air	Tritium	De 7 à 10 jours	Continu	0,1 Bq/m ³
	Air	γ ambient	Continue	-	Selon BdF
BIOLOGIQUE	Plante	B global + K Spectro γ	1 / mois	Ponctuel	12,5 Bq/kg sec 1 Bq/kg sec (¹³⁷ Cs)
		Carbone 14	3 / mois		200 Bq/kg sec
	Lait	Strontium 90 Spectro γ	1 / mois	Ponctuel	0,5 Bq/L 0,5 Bq/kg dry matter (¹³⁷ Cs)
		(Tritium) (Carbone 14)	De 6 mois à 1 an		3 Bq/L 30 Bq/L
	Agriculture	B global + K Spectro γ Carbone 14 Tritium	1/ an	Ponctuel	Variable

LES TRANSFERTS DES RADIONUCLÉIDES DANS LA NATURE

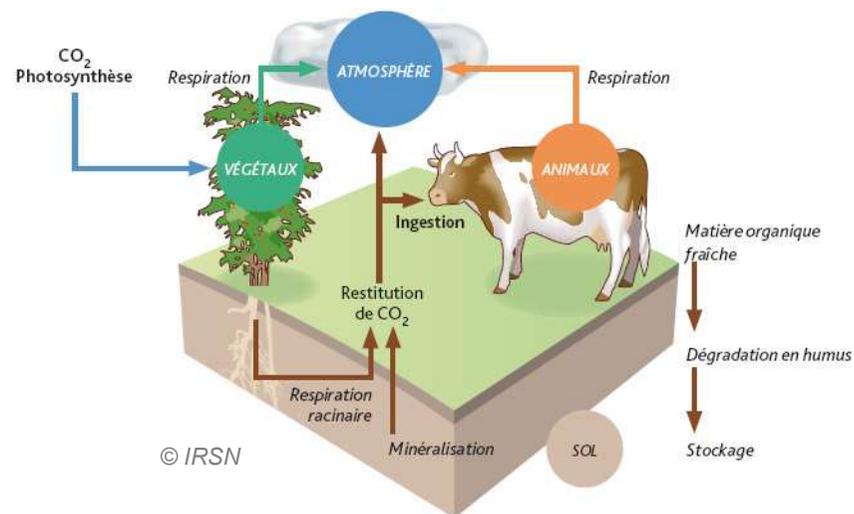
Les radionucléides se comportent de manière similaires aux espèces chimiques stables.

Leur devenir dans l'environnement, **dispersion et chaîne d'absorption**, dépend de leur état physique + forme chimique et des conditions environnementales (météo, hydrologie...).

Des phénomènes d'accumulation de certains radionucléides dans des espèces spécifiques peuvent être observés. Celle-ci sont choisies comme **bio-indicateur** car elles constituent un marqueur environnemental, ex : végétaux - ^{14}C , champignons - ^{137}Cs ...



Principaux compartiments et vecteurs de transfert des radionucléides dans l'environnement



FIN

LE CIRCUIT PRIMAIRE – RÔLE ET FONCTIONNEMENT

Le **circuit primaire** est composé du réacteur relié par des tuyauteries aux **générateurs de vapeur** (3 ou 4 générateurs suivant la puissance) et à un **pressuriseur** qui maintient l'eau du circuit sous forte pression (155 bars). Ce circuit constitue la « **2^{ème} barrière** ».

L'eau du circuit primaire circule en boucle grâce à de puissantes pompes et s'échauffe en traversant le cœur du réacteur ; en fonctionnement, sa température varie entre 286 °C et 323 °C selon la puissance (eau maintenue liquide par la pression). Ces matériels sont implantés dans un **bâtiment confiné**, dénommé **Bâtiment du Réacteur « 3^{ème} barrière »** (BR).

Du fait des rayonnements émis par le réacteur, **l'eau du circuit primaire est radioactive**.

Un phénomène particulier, la radiolyse de l'eau

Sous l'effet des **rayonnements ionisants**, un phénomène de radiolyse de l'eau du circuit primaire peut intervenir, il s'agit d'une cassure de la molécule d'eau : $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^\bullet + \text{HO}^\bullet$

Cette réaction produit des radicaux très réactifs en milieu oxydant posant des problématiques de corrosion des matériaux . Pour prévenir ce phénomène, le **circuit primaire est désoxygéné lors du démarrage et en léger excès d'hydrogène** forçant ainsi la recombinaison des radicaux.

LE CIRCUIT PRIMAIRE – RÔLE ET FONCTIONNEMENT

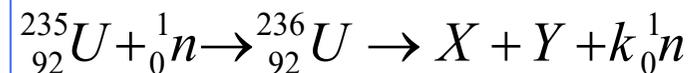
Combustible et réaction de fission

Le combustible est présent sous la forme de petites pastilles empilées dans un tube étanche de 4 mètres appelé **crayon combustible**. La **gaine métallique** empêche les radionucléides de s'échapper dans l'eau du circuit primaire, c'est la « **1^{ère} barrière** ». Quelques centaines de ces crayons sont assemblés pour former un **assemblage combustible**.

L'eau du circuit primaire circule entre les tubes et au contact des crayons, va extraire la **chaleur dégagée par la fission** (1kg de combustible produit une énergie thermique équivalente à 1 900 T de pétrole).

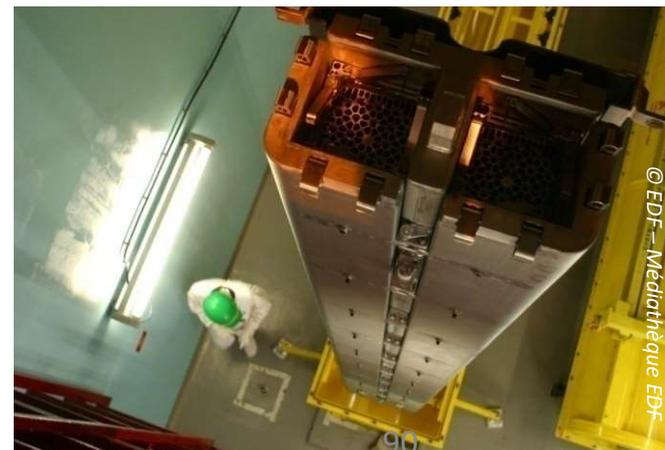
Dans un REP, la réaction nucléaire en chaîne n'est possible dans la durée que si le combustible composé d'oxyde uranium est enrichi à hauteur de **3 à 5 % en ²³⁵U** (seul fissile). *L'uranium naturel en contient environ 0,7 %, le reste étant de l'²³⁸U (produisant du Pu par capture neutronique). Un REP de 1 000 MWe consomme environ 4 kg de combustible /jour.*

Réaction de fission : $k = 2 \text{ ou } 3$

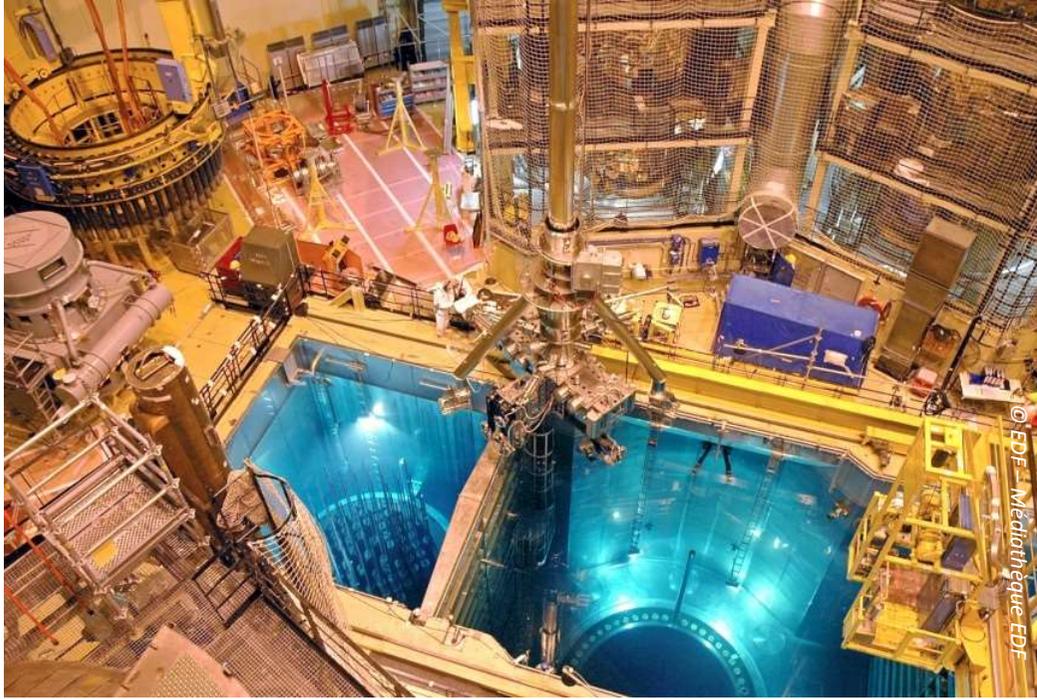


La fission peut aussi être obtenue avec des isotopes du plutonium (ex : ²³⁹Pu). Certains combustibles sont donc réalisés à partir d'oxyde mixte d'uranium et de plutonium (appelé MOX).

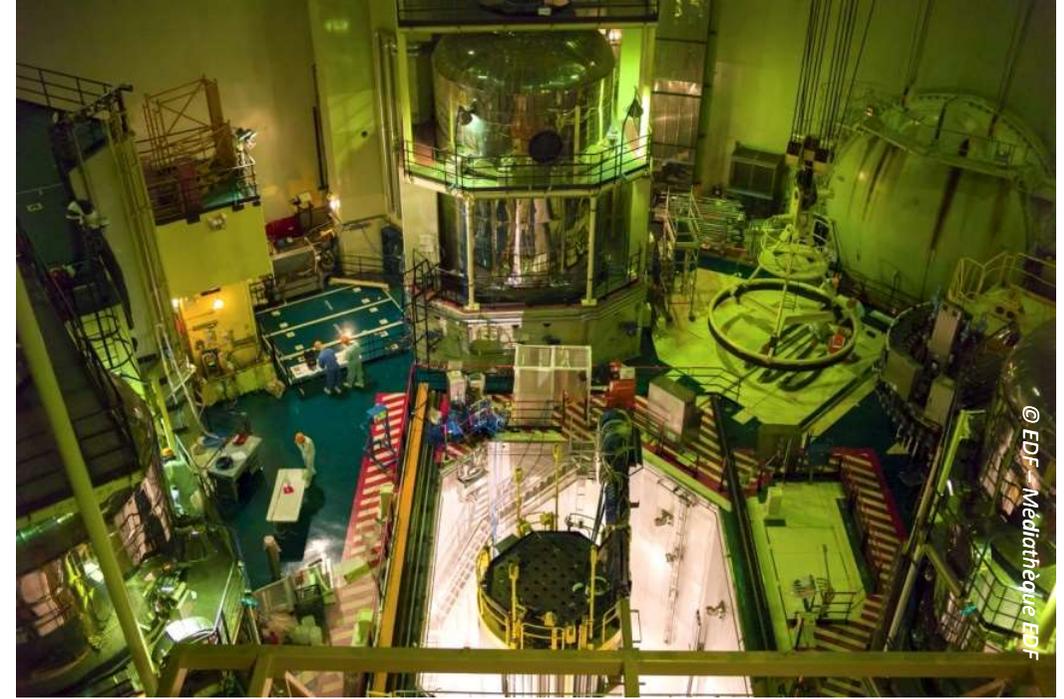
Le stockage du combustible neuf ou après utilisation (refroidissement et décroissance) est réalisé dans la piscine du bâtiment combustible (**BK**).



Assemblage combustible neuf – Saint-Alban



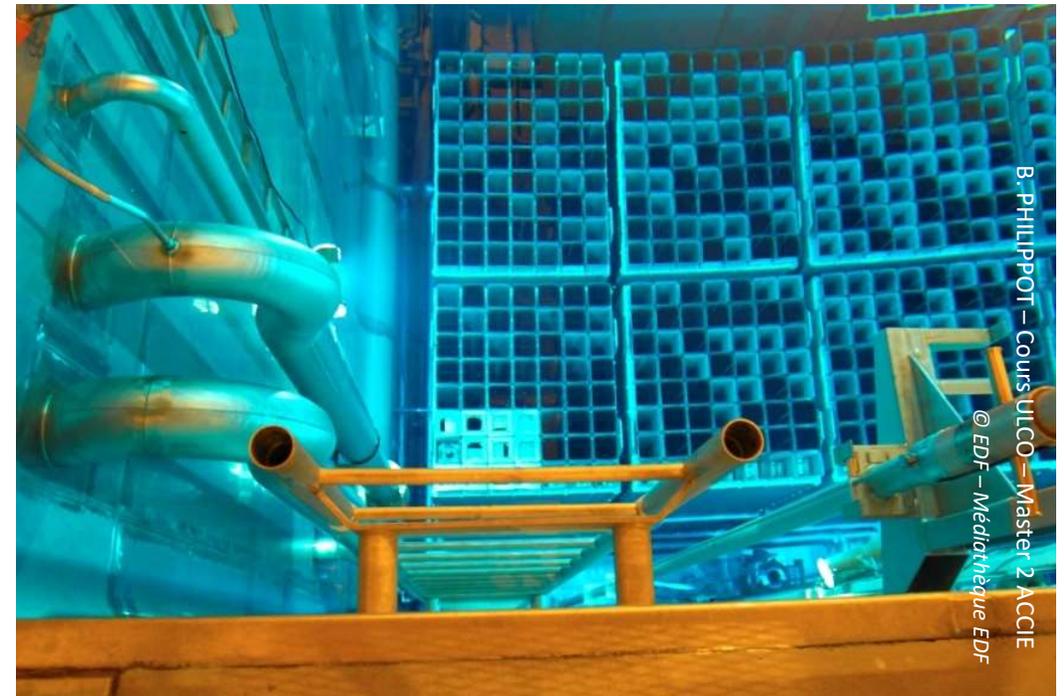
Bâtiment réacteur, inspection de la cuve – Paluel



Intérieur du bâtiment réacteur – Cruas



Bâtiment combustible – Chooz



Piscine combustible – Chooz

LE CIRCUIT PRIMAIRE – RÔLE ET FONCTIONNEMENT

Modérateur et maîtrise de la réactivité

Le modérateur

La fission d'un noyau de ^{235}U ou d'autres atomes fissiles est beaucoup plus facile si les neutrons ont une faible énergie ou vitesse (2 km/s).

Or les neutrons produits par la fission sont émis à très grande vitesse (20 000 km/s). Ceux-ci sont donc ralentis en les faisant « rebondir » sur des atomes légers, dans un REP cette fonction de modérateur est assurée par l'eau du circuit primaire.

Remarque : Dans d'autres types de réacteur, le modérateur peut être du graphite...

L'eau possède un autre avantage, en cas "d'emballement" de la réaction en chaîne, l'élévation de la température diminue la densité de l'eau ce qui réduit son pouvoir de ralentissement et donc diminue la réactivité (↘ densité : ↘ proba rencontre neutron-atome).

Cette propriété peut être utilisée pour piloter le réacteur afin de faire varier la puissance thermique délivrée.

LE CIRCUIT PRIMAIRE – RÔLE ET FONCTIONNEMENT

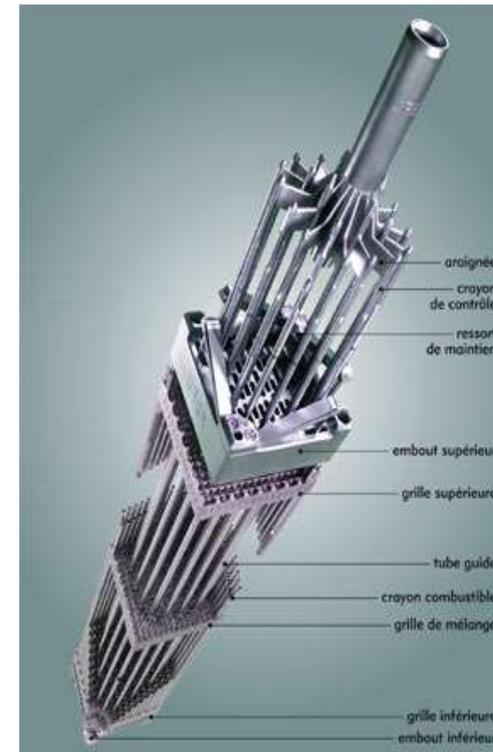
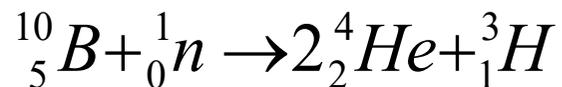
Modérateur et maîtrise de la réactivité

Le contrôle de la réaction nucléaire en chaîne

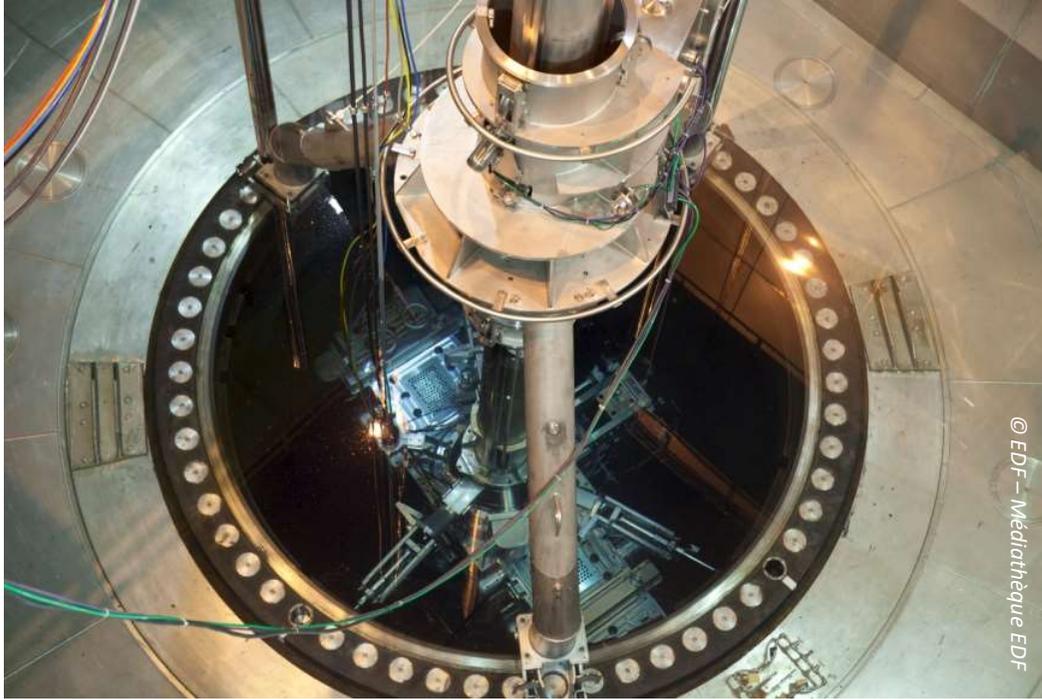
Pour entretenir une **réaction en chaîne**, il est nécessaire que le nombre de neutrons produits lors des fissions soit égal au nombre de neutrons qui disparaissent par capture dans le combustible et les structures du réacteur ou en s'échappant du cœur, il s'agit de la **criticité**.

Pour assurer cet équilibre, il est notamment possible d'agir :

- ❖ **sur les grappes de commande**, au nombre de 48, que l'on introduit plus ou moins dans le combustible pour modifier le flux de neutrons (composées notamment de bore) ;
- ❖ **en injectant du bore 10** sous la forme d'acide borique, qui a la propriété de capturer les neutrons mais présente l'inconvénient de produire du tritium :

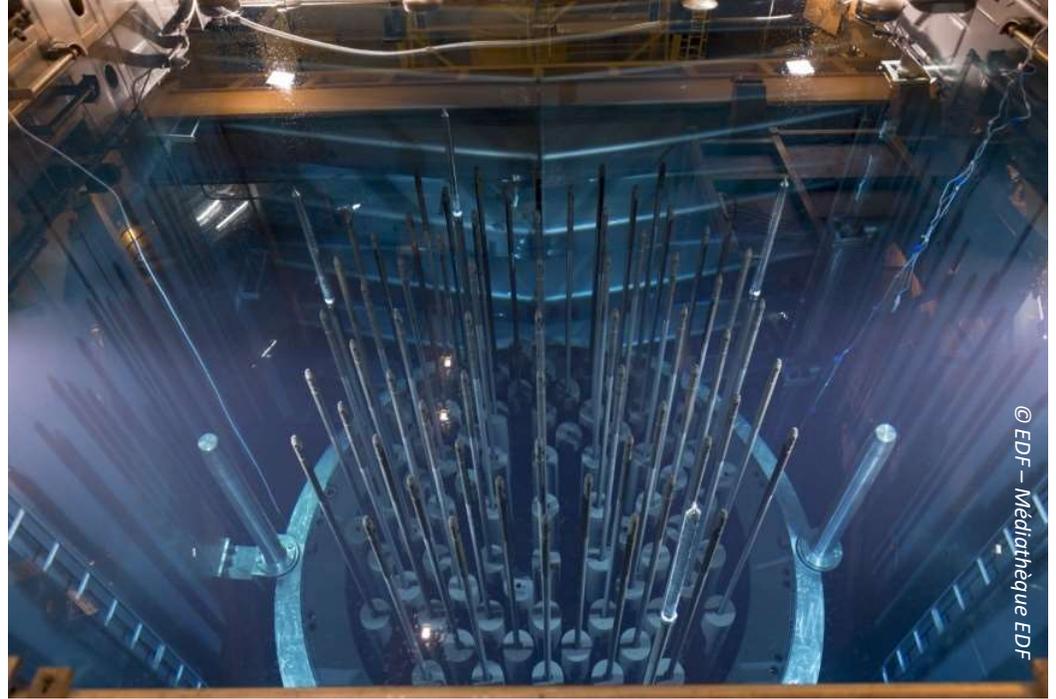


Insertion d'une grappe de commande dans un assemblage combustible



© EDF – Médiathèque EDF

Inspection de la cuve – Bugey



© EDF – Médiathèque EDF

*Tiges de commande –
Nogent*



© EDF – Médiathèque EDF

Cuve du réacteur – Nogent



© EDF – Médiathèque EDF

*Internes supérieures de
la cuve du réacteur*



LE CIRCUIT SECONDAIRE – RÔLE ET FONCTIONNEMENT

Dans le **circuit secondaire**, l'eau suit un **cycle thermodynamique fermé** qui la fait passer alternativement de phase liquide [condenseur] en phase vapeur [générateur de vapeur].

La **vapeur** issue des **générateurs de vapeur** sous pression (58 bars – 77 bars) alimente la **turbine** tournant à $\approx 1\,500$ tr/min entraînant l'**alternateur** qui produit de l'électricité.

Après avoir cédée une partie de son énergie, la vapeur s'échappe vers le **condenseur** où elle passe en **phase liquide** en cédant son énergie à l'eau froide du **circuit tertiaire** circulant dans les faisceaux de tubes du condenseur.

Environ 1/3 de la puissance thermique produite est convertie en électricité.

Reprise par de puissantes pompes, l'eau du circuit secondaire parcourt le poste d'eau (remise à température) puis le circuit **d'alimentation des générateurs de vapeur** pour recommencer son cycle.

N'étant pas en contact direct avec l'eau du circuit primaire, **l'eau du circuit secondaire n'est pas radioactive**.

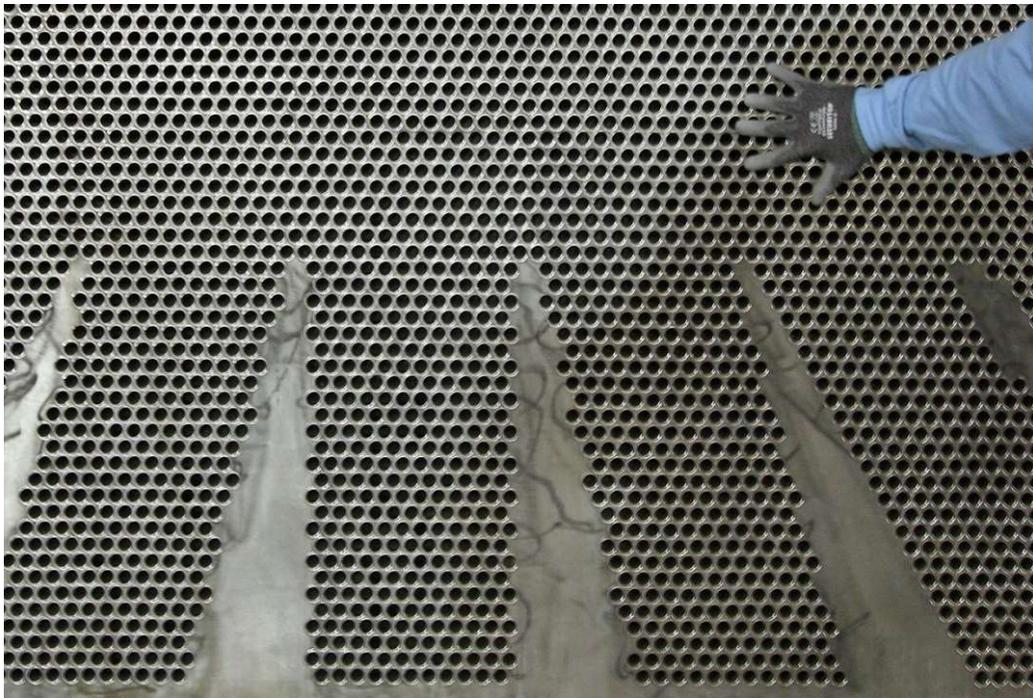


© EDF – Médiathèque EDF

Salle des machines – Nogent



Plaque de répartition du condenseur



Faisceaux tubulaire du condenseur – EPR



Salle des machines, groupes turbo-alternateur et sécheur surchauffeur – Tricastin

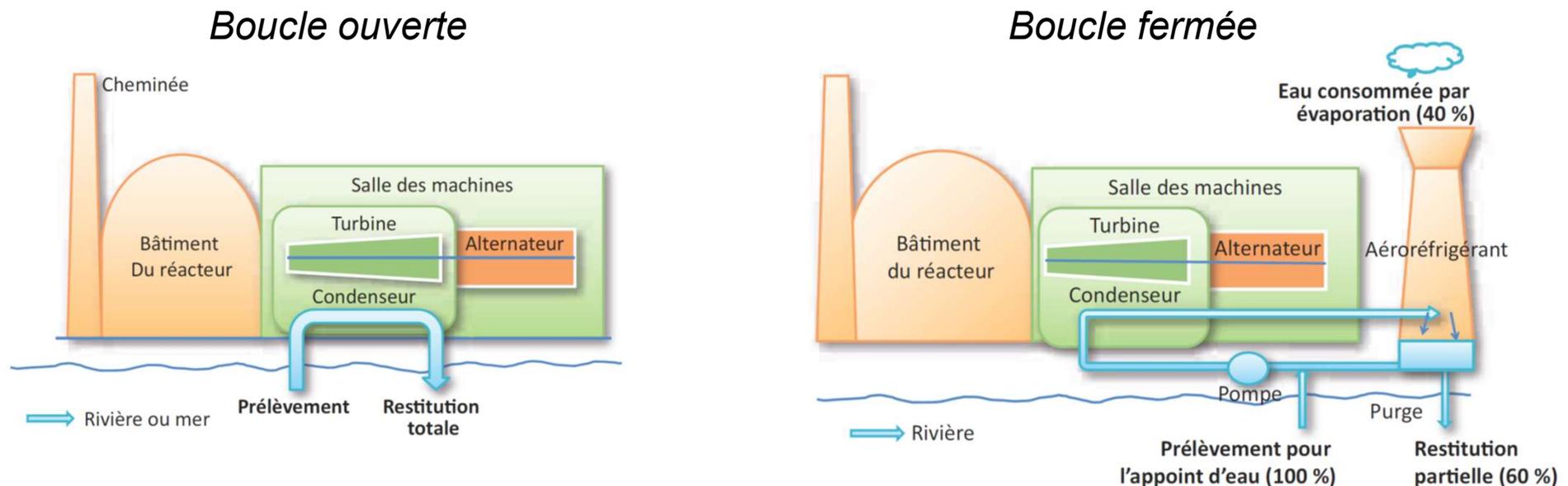


LE CIRCUIT TERTIAIRE – RÔLE ET FONCTIONNEMENT

L'eau prélevée au milieu extérieur est filtrée puis parcourt l'intérieur des tubes du condenseur s'échauffant à leur contact et permettant ainsi le refroidissement du circuit secondaire. Puis,

- ❖ en **circuit ouvert**, retour direct au milieu aquatique. Prélèvement 40 à 60 m³/s /réacteur
- ❖ en **circuit « fermé »**, refroidissement au moyen d'un aéroréfrigérant. Prélèvement 2 à 5 m³/s /réacteur.

Une gestion de l'entartrage et du développement microbologique est réalisée par différents procédés (traitement par chloration, ammoniacque, acide...).



Ordre de grandeur du volume annuel moyen prélevé pour une unité :

900 à 1 900 millions de m³/an

40 à 140 millions de m³/an



B. PHILIPPOT – Cours ULCO – Master 2 AC
© EDF – Médiathèque EDF

Intérieur d'un aéroréfrigérant – Cattenom



1. PRÉSENTATION DU GROUPE EDF

Histoire et évolution de la Société

1.1 HISTOIRE ET ÉVOLUTION DE LA SOCIÉTÉ

Dans le cadre de la nationalisation des secteurs de l'électricité et du gaz, la loi du 8 avril 1946 crée EDF sous la forme d'un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) et fonde le statut du personnel des Industries Electriques et Gazières (les IEG). La loi laisse toutefois subsister un certain nombre de Distributeurs Non Nationalisés (DNN) ou Entreprises Locales de Distribution (ELD).

Les années 1946-2000 sont marquées par le développement de l'outil industriel. Il s'agit d'abord du parc thermique (charbon puis fioul) et du parc hydraulique, avec notamment la construction des barrages de Tignes en 1952 et de Serre-Ponçon en 1960. En 1963, EDF met en service la première unité de production nucléaire à Chinon (70 MW), première d'une série de six tranches de la filière Uranium Naturel - Graphite - Gaz (UNGG), dont la construction s'est échelonnée jusqu'en 1972. Les chocs pétroliers de 1973 et 1979 se traduisent par une accélération de la substitution du thermique par le nucléaire. En 1969, la filière UNGG est abandonnée pour la filière Réacteur à Eau Pressurisée (REP), qui sera utilisée pour les nouvelles centrales.

À partir des années 1990, EDF s'implante de manière significative à l'étranger avec notamment, en décembre 1998, l'acquisition de London Electricity (devenue EDF Energy le 30 juin 2003). Cette politique se poursuit en 2001, avec l'acquisition de 20 % d'EnBW (participation ensuite augmentée successivement pour être portée à 45,01 % en 2005), et avec la montée au capital de l'Italien Edison par le consortium IEB (63,8 %), dont EDF détient 18,03 %, et en 2002, avec l'acquisition de EPN Distribution plc. et de Seaboard plc., deux sociétés de distribution d'électricité situées en Angleterre.

En France, le développement majeur de ces dernières années est l'ouverture du marché, sous l'impulsion de la réglementation communautaire. En février 1999, les sites dont la consommation d'électricité dépasse 100 GWh/an, soit 20 % du marché, peuvent choisir leur fournisseur. Le seuil d'éligibilité est ensuite progressivement abaissé, ouvrant ainsi 30 % du marché en mai 2000, puis 37 % en février 2003, et 69 % en juillet 2004, avec l'ouverture de l'ensemble du marché des professionnels. Depuis juillet 2007, l'ouverture est réalisée à 100 % avec l'ouverture du marché des résidentiels.

Parallèlement, les structures nécessaires au bon fonctionnement d'un marché concurrentiel sont mises en place. La Commission de Régulation de l'Électricité, devenue Commission de régulation de l'énergie (CRE), est créée en mai 2000. La même année, afin de garantir un accès non discriminatoire à tous les acteurs du marché, EDF crée le Réseau de Transport d'Électricité (devenu, en 2005, filiale⁽¹⁾ d'EDF sous la dénomination RTE EDF Transport, et aujourd'hui renommé RTE Réseau de Transport d'Électricité), en charge de gérer le réseau public de transport Haute Tension et Très Haute Tension de l'électricité. En 2000, le Groupe forme, avec le spécialiste du négoce Louis Dreyfus, la société de négoce EDF Trading. Elle deviendra une filiale à 100 % d'EDF en 2003. En 2001, Euronext et différents acteurs industriels et financiers du marché de l'électricité, dont EDF, créent Powernext, la Bourse française de l'électricité. En 2001, en contrepartie de l'autorisation de la prise de participation d'EDF dans EnBW, la Commission européenne demande à EDF de mettre en place un système d'enchères de capacités de production d'électricité (*Virtual Power Plants* – VPP), pour faciliter l'accès au marché à d'autres commercialisateurs. En 2003, le groupe EDF cède sa participation dans la Compagnie nationale du Rhône à Suez (désormais Engie).

Le 20 novembre 2004, en application de la loi du 9 août 2004, EDF devient une société anonyme à Conseil d'administration.

En 2005, EDF et AZA SA (anciennement AEM SpA) prennent le contrôle conjoint d'Edison à la suite du lancement d'une offre publique d'achat. Le Groupe met par ailleurs en œuvre sa stratégie de recentrage sur l'Europe en cédant le contrôle de ses filiales Edenor (Argentine) et Light (Brésil), ainsi que ses actifs au Mexique.

EDF est introduit en Bourse en novembre 2005 par l'émission de 196 371 090 actions nouvelles et la cession de plus de 34,5 millions de titres détenus par l'État auprès de salariés et anciens salariés d'EDF et de certaines de ses filiales. Cette opération est suivie par la cession de 45 millions de titres détenus par l'État le 3 décembre 2007.

Fin 2006, EDF Énergies Nouvelles, détenue à 50 % par le groupe EDF, est introduite en Bourse.

Depuis le 1^{er} janvier 2008, l'activité de distribution d'EDF est assurée par Enedis⁽²⁾ (anciennement ERDF), société issue de la filialisation des activités de distribution en application de la loi du 7 décembre 2006 relative au secteur de l'énergie.

En 2008-2009, le groupe EDF devient un acteur majeur du renouveau du nucléaire à l'international, en créant une joint-venture avec l'électricien chinois CGN et en rachetant British Energy, l'un des plus gros énergéticiens du Royaume-Uni, et près de la moitié des actifs nucléaires de Constellation Energy aux États-Unis. EDF acquiert par ailleurs 51 % de la société belge EDF Luminus, participation portée à 63,5 % courant 2010.

EDF cède en 2010 ses réseaux de distribution britanniques au groupe Cheung Kong de Hong Kong, et en 2011 sa participation dans EnBW au Land de Bade-Wurtemberg.

En 2011, EDF renforce son positionnement d'acteur de référence de la production d'électricité à base d'énergies renouvelables en portant sa participation dans EDF Énergies Nouvelles à 100 % à l'issue d'une offre publique alternative simplifiée d'achat et d'échange suivie d'un retrait obligatoire.

En 2012, après plus de sept ans de partenariat stratégique avec A2A, EDF prend le contrôle d'Edison, l'un des principaux acteurs du marché électrique italien, quatrième marché européen. Cette opération s'inscrit dans la mise en œuvre de la stratégie gazière du Groupe, qui s'appuie sur les compétences d'Edison dans l'ensemble de la chaîne gazière.

En 2014, EDF délègue à Exelon, premier exploitant nucléaire américain, la gestion opérationnelle des cinq réacteurs nucléaires de la société Constellation Energy Nuclear Group (CENG), détenue à 49,99 % par EDF et à 50,01 % par Exelon. En outre, EDF reprend l'intégralité des activités de Dalkia en France, y compris le groupe Citelum, tandis que les activités du groupe Dalkia à l'international sont reprises par Veolia. Enfin, F2i, Edison et EDF Énergies Nouvelles créent le troisième plus grand opérateur italien du secteur des énergies renouvelables, détenu à 70 % par F2i et à 30 % par une société holding détenue par Edison et EDF Énergies Nouvelles.

En 2015, EDF et China General Nuclear Power Corporation (CGN) ont signé un accord stratégique d'investissement non engageant pour la construction et l'exploitation de la centrale nucléaire de Hinkley Point C dans le Somerset. Ce partenariat a été approuvé le 28 juillet 2016 par le Conseil d'administration d'EDF. La signature de la documentation contractuelle est intervenue le 29 septembre 2016.

En 2015 et 2016, EDF et AREVA SA ont conclu deux protocoles d'accord non engageants prévoyant l'acquisition par EDF du contrôle exclusif d'AREVA NP ainsi qu'un partenariat stratégique et industriel global. Conformément aux termes de ces protocoles, un contrat fixant les conditions de la cession d'une participation conférant à EDF le contrôle exclusif d'une entité (« New NP ») filiale à 100 % d'AREVA NP a été conclu le 15 novembre 2016. La cession est intervenue le 31 décembre 2017 et New NP, désormais dénommée Framatome, est détenue à 75,5 % par EDF aux côtés de Mitsubishi Heavy Industries (19,5 %) et Assystem (5 %). Framatome regroupe les activités industrielles, de conception et de fourniture de réacteurs nucléaires et d'équipements, d'assemblages combustible et de services à la base installée et compte 14 000 salariés environ. Il a également été créé en juin 2017, Edvance, société dédiée, détenue à hauteur de 80 % par EDF et 20 % par Framatome, qui regroupe les activités des deux entreprises relatives à la

conception (*basic* et *detailed* design) et à la réalisation (approvisionnements, montages et démarrage) des îlots nucléaires et du contrôle commande des réacteurs neufs en France et à l'international.

EDF a, par ailleurs, signé le 31 mars 2017 un accord visant à céder une participation indirecte de 49,9 % du capital de RTE à la Caisse des Dépôts et CNP Assurances.

Le 30 mars 2017, EDF a réalisé une augmentation de capital en numéraire avec maintien du DPS d'un montant brut (prime d'émission incluse) de 4 018 millions d'euros, qui s'est traduite par l'émission de 632 741 004 actions nouvelles au prix unitaire d'émission de 6,35 euros. L'État français a souscrit 3 milliards d'euros, soit environ 75 % de l'augmentation de capital. Cette augmentation de capital a été un succès et la demande totale s'est élevée à environ 4,9 milliards d'euros. La part marché a été ainsi souscrite à hauteur de 185,9 %.

