

## Differents types de réacteurs nucléaires

ED 01

### 1 – Critères de classement des différents types

#### 1 – 1 Par générations

Le classement des réacteurs nucléaires par génération se fait en fonction de divers critères, notamment l'amélioration de la sécurité, de l'efficacité, de la durabilité et de la technologie utilisée. Voici les principales générations de réacteurs nucléaires et les critères de classement associés :

#### Génération I (Années 1950-1960)

##### 1. Technologie Initiale :

- Réacteurs pionniers développés pour la recherche et les premières applications commerciales.
- Exemples : Réacteur de Shippingport (États-Unis), Calder Hall (Royaume-Uni).

##### 2. Caractéristiques :

- Technologie de base avec peu de mesures de sécurité avancées.
- Rendement énergétique relativement faible.
- Durée de vie courte.

#### Génération II (Années 1970-1990)

##### 1. Commercialisation et Amélioration de la Sécurité :

- Développement de réacteurs à eau légère (LWR), y compris réacteurs à eau bouillante (BWR) et réacteurs à eau pressurisée (PWR).
- Exemples : Réacteurs des séries Westinghouse PWR et GE BWR.

##### 2. Caractéristiques :

- Meilleure efficacité énergétique.
- Systèmes de sécurité améliorés, mais toujours basés sur des principes de sécurité passive limitée.
- Durée de vie d'environ 30 à 40 ans.

#### Génération III et III+ (Années 1990-2010)

### 1. **Améliorations Technologiques et Sécurité Passive** :

- Conception de réacteurs avec des mesures de sécurité plus robustes et des systèmes de sécurité passive.
- Exemples : Réacteur Européen à Eau sous Pression (EPR), AP1000 de Westinghouse, ABWR de Toshiba.

### 2. **Caractéristiques** :

- Efficacité énergétique accrue.
- Durée de vie plus longue (jusqu'à 60 ans ou plus).
- Capacité à résister à des accidents sévères sans intervention humaine.

## **Génération IV (En développement, prévu pour 2030 et au-delà)**

### 1. **Innovation et Durabilité** :

- Réacteurs innovants visant une meilleure utilisation du combustible et une production de déchets réduite.
- Exemples : Réacteurs rapides refroidis au sodium (SFR), réacteurs à haute température refroidis au gaz (HTGR), réacteurs à sels fondus (MSR).

### 2. **Caractéristiques** :

- Utilisation de cycles de combustible avancés pour maximiser l'efficacité et minimiser les déchets.
- Sécurité passive avancée et robustesse accrue contre les accidents.
- Flexibilité pour produire de l'hydrogène et d'autres produits chimiques en plus de l'électricité.
- Durée de vie et fiabilité améliorées.

## **Critères de Classement**

1. **Sécurité** : Chaque génération vise à améliorer la sécurité en intégrant des systèmes de sécurité passive et active.
2. **Efficacité Énergétique** : L'amélioration de l'efficacité thermique et la meilleure utilisation du combustible nucléaire sont des critères clés.
3. **Durabilité et Environnement** : Réduction des déchets radioactifs et utilisation durable des ressources en uranium et en thorium.
4. **Coûts** : Réduction des coûts de construction, d'exploitation et de démantèlement.
5. **Flexibilité** : Capacité à s'adapter à différentes applications énergétiques, y compris la production de chaleur industrielle et d'hydrogène.

Les progrès entre chaque génération reflètent les leçons tirées des incidents nucléaires, les avancées technologiques et les exigences croissantes en matière de durabilité et de protection environnementale.

## 1 – 2 - Par filière:

Le classement des réacteurs nucléaires par filières repose sur divers critères technologiques, opérationnels et de performance. Chaque filière présente des caractéristiques distinctes en termes de conception, de type de combustible, de modérateur, de refroidissement, et de sécurité. Voici les principaux critères de classement des réacteurs nucléaires par filières :

### 1 – 2 - 1. Type de Réacteur

- **Réacteurs à Eau Pressurisée (PWR)**
  - **Modérateur et Réfrigérant** : Eau légère.
  - **Caractéristiques** : Réacteur le plus couramment utilisé dans le monde. Utilise une pression élevée pour garder l'eau liquide à des températures élevées.
  - **Avantages** : Haute sécurité et maturité technologique.
  
- **Réacteurs à Eau Bouillante (BWR)**
  - **Modérateur et Réfrigérant** : Eau légère.
  - **Caractéristiques** : L'eau bout directement dans le réacteur pour produire de la vapeur qui entraîne une turbine.
  - **Avantages** : Conception plus simple que les PWR, mais présente des défis pour la gestion de la radioactivité.
  -
  
- **Réacteurs à Eau Lourde sous Pression (PHWR)**
  - **Modérateur et Réfrigérant** : Eau lourde.
  - **Caractéristiques** : Utilise de l'uranium naturel comme combustible.
  - **Avantages** : Capable de fonctionner avec du combustible non enrichi, donc indépendance des infrastructures d'enrichissement.
  
- **Réacteurs à Neutrons Rapides (FNR)**
  - **Modérateur** : Aucun (utilise des neutrons rapides).
  - **Réfrigérant**: Sodium liquide, plomb ou gaz.
  - **Caractéristiques** : Capable de brûler du combustible nucléaire usé et du plutonium.
  - **Avantages** : Meilleure utilisation du combustible et réduction des déchets à longue durée de vie.
  
- **Réacteurs à Haute Température refroidis au Gaz (HTGR)**
  - **Modérateur** : Graphite.
  - **Réfrigérant** : Hélium ou dioxyde de carbone.
  - **Caractéristiques** : Fonctionne à des températures très élevées, peut produire de l'hydrogène.
  - **Avantages** : Haute efficacité thermique et sécurité passive améliorée.
  
- **Réacteurs à Sels Fondus (MSR)**

- **Modérateur** : Graphite (dans certaines conceptions).
- **Réfrigérant** : Sels fondus.
- **Caractéristiques** : Utilise du combustible liquide dissous dans un sel fondu.
- **Avantages** : Flexibilité de combustible, meilleure sécurité intrinsèque.

### 1 – 2 - 2. Type de Combustible

- **Uranium Enrichi**

- Utilisé principalement dans les PWR et BWR.
- Avantages : Haute densité énergétique.

- **Uranium Naturel**

- Utilisé dans les PHWR (CANDU).
- Avantages : Pas besoin d'enrichissement, coûts réduits.

- **Thorium**

- Potentiel pour les réacteurs MSR et certaines conceptions de réacteurs rapides.
- Avantages : Abondance, production de déchets à courte durée de vie.

- **Plutonium**

- Utilisé dans les réacteurs rapides pour le recyclage du combustible.
- Avantages : Réutilisation des déchets, fermetures du cycle du combustible.

- 

### 1 – 2 - 3. Type de Modérateur

- **Eau Légère**

- Couramment utilisé dans les PWR et BWR.
- Avantages : Efficacité de modulation, disponibilité.

- **Eau Lourde**

- Utilisé dans les PHWR.
- Avantages : Permet l'utilisation d'uranium naturel.

- **Graphite**

- Utilisé dans les réacteurs à haute température et certains MSR.
- Avantages : Stabilité à haute température, bon modérateur de neutrons.

### 1 – 2 - 4. Type de Réfrigérant

- **Eau**

- Utilisé dans les réacteurs à eau légère et lourde.
- Avantages : Bon transfert de chaleur, abondance.

- **Sodium**

- Utilisé dans les réacteurs rapides (SFR).
- Avantages : Bon transfert de chaleur, faible absorption de neutrons.

- **Gaz (Hélium, CO<sub>2</sub>)**

- Utilisé dans les HTGR.
- Avantages : Stabilité à haute température, inerte chimiquement

- **Sels Fondus**

- Utilisé dans les MSR.
- Avantages : Haute température d'opération, inertie chimique.

### 1 – 2 -5. Sécurité et Fiabilité

- **Sécurité Passive** : Capacité du réacteur à se refroidir naturellement sans intervention active.

- **Redondance des Systèmes de Sécurité** : Multiples systèmes de sécurité pour prévenir les accidents.
- **Résilience aux Accidents** : Capacité à supporter des conditions extrêmes sans défaillance.

### 1 – 2 – 6 -Efficacité et Durabilité

- **Efficacité Thermique** : Capacité à convertir l'énergie thermique en énergie électrique.
- **Utilisation du Combustible** : Quantité de combustible utilisée et gestion des déchets.
- **Impact Environnemental** : Production de déchets radioactifs, empreinte carbone.

Ces critères permettent de classer les réacteurs nucléaires selon leur technologie, leur performance et leur impact, facilitant ainsi le choix pour des applications spécifiques et le développement futur des technologies

## 1 – 3 -Par type de combustible:

Le classement des réacteurs nucléaires par types de combustibles repose sur plusieurs critères, dont la nature du combustible utilisé, la disponibilité des ressources, l'efficacité du combustible, la gestion des déchets et l'impact environnemental. Voici les principaux types de combustibles utilisés dans les réacteurs nucléaires et les critères de classement associés :

### 1 – 3 -1- Uranium Naturel

- **Réacteur Utilisateur** : Réacteurs à Eau Lourde sous Pression (PHWR/CANDU).
- **Avantages** :  
Ne nécessite pas d'enrichissement, réduisant ainsi les coûts de traitement

initial.

Large disponibilité géologique.

- **Inconvénients** :  
Faible densité énergétique comparée à l'uranium enrichi.  
Production de plus grandes quantités de déchets par unité d'énergie produite.  
Gestion des Déchets : Modérée, nécessitant un retraitement pour récupérer l'uranium et les produits de fission.

### 1 – 3 - 2. Uranium Enrichi

- **Réacteurs Utilisateurs** : Réacteurs à Eau Pressurisée (PWR), Réacteurs à Eau Bouillante (BWR), Réacteurs à Haute Température refroidis au Gaz (HTGR).
- **Avantages** :  
Haute densité énergétique.  
Permet des conceptions de réacteurs plus compactes et efficaces.
- **Inconvénients** :  
Processus d'enrichissement coûteux et complexe.  
Risques de prolifération nucléaire associés à l'enrichissement.  
Gestion des Déchets : Production de déchets radioactifs nécessitant un stockage à long terme.

### 1 – 3 - 3. Uranium Appauvri

- **Réacteurs Utilisateurs** : Réacteurs à Neutrons Rapides (FNR).
- **Avantages** :

Utilisation du stock d'uranium appauvri, considéré comme un déchet par l'industrie de l'enrichissement.

Contribue à la réduction des stocks de déchets nucléaires.

- **Inconvénients :**  
Nécessite des réacteurs spéciaux (rapides) pour être efficace.  
Technologie complexe et coûteuse.
- **Gestion des Déchets :** Production de déchets hautement radioactifs nécessitant un stockage à long terme.

#### 1 – 3 - 4. Plutonium

- **Réacteurs Utilisateurs :** Réacteurs à Neutrons Rapides (FNR), Réacteurs MOX (Mixed Oxide Fuel).
- **Avantages :**  
Permet la réutilisation des déchets nucléaires pour produire de l'énergie.  
Haute densité énergétique.
- **Inconvénients :**  
Problèmes de prolifération nucléaire.  
Complexité et coût du retraitement et de la fabrication du combustible.  
Gestion des Déchets : Production de déchets nécessitant un stockage à long terme.

#### 1 – 3 - 5. Thorium

- **Réacteurs Utilisateurs :** Réacteurs à Sels Fondus (MSR), Réacteurs à Haute Température refroidis au Gaz (HTGR).
- **Avantages :**  
Abondance géologique supérieure à celle de l'uranium.  
Production de déchets à vie plus courte et moins de production de plutonium.
- **Inconvénients :**  
Technologie encore en développement.  
Nécessite une source de neutrons externe pour amorcer la réaction (souvent de l'uranium ou du plutonium).
- **Gestion des Déchets :** Production de déchets nécessitant un stockage, mais généralement moins problématique que ceux des combustibles à base d'uranium.

### Critères de Classement

#### 1. Disponibilité des Ressources

- Uranium Naturel : Facilement disponible et ne nécessite pas d'enrichissement.
- Uranium Enrichi : Nécessite des infrastructures d'enrichissement sophistiquées.
- Thorium : Plus abondant que l'uranium, mais nécessite des réacteurs spéciaux.
- Plutonium : Disponible via le retraitement des combustibles usés.

#### 2. Densité Énergétique

- Uranium Enrichi et Plutonium : Haute densité énergétique.
- Uranium Naturel : Faible densité énergétique.
- Thorium : Potentiellement haute densité énergétique, mais nécessite une technologie avancée.

#### 3. Efficacité du Combustible

- Réacteurs Rapides (FNR) : Utilisent efficacement l'uranium et le plutonium, générant moins de déchets.

- Réacteurs à Eau Légère (PWR/BWR) : Bonne efficacité avec de l'uranium enrichi.
- Réacteurs à Eau Lourde (PHWR/CANDU) : Utilisent de l'uranium naturel avec une efficacité modérée.

#### 4. Gestion des Déchets

- Uranium Naturel et Enrichi : Production de déchets nécessitant un stockage à long terme.
- Plutonium : Permet le recyclage, mais avec des risques de prolifération.
- Thorium : Génère des déchets moins problématiques.

#### 5. Prolifération Nucléaire

- Uranium Enrichi et Plutonium : Risques élevés de prolifération.
- Uranium Naturel et Thorium : Risques de prolifération moindres, mais nécessitent des technologies spécifiques.

#### 6. Impact Environnemental

- Thorium : Avantages environnementaux potentiels avec moins de déchets à longue durée de vie.
- Uranium et Plutonium : Nécessitent des solutions de gestion des déchets sophistiquées et sûres.

Ces critères permettent de comparer les différents types de combustibles nucléaires et de choisir le type de réacteur le plus adapté aux besoins énergétiques et aux considérations environnementales et de sécurité.

### 1 – 4 - Par type de modérateur:

Le classement des réacteurs nucléaires par types de modérateurs repose sur les critères suivants : l'efficacité de modération, la compatibilité avec le type de réfrigérant, l'impact sur la sécurité, la flexibilité d'utilisation du combustible, et les considérations environnementales. Voici les principaux types de modérateurs utilisés dans les réacteurs nucléaires, ainsi que les critères de classement associés :

#### 1 – 4 -1. Eau Légère (H<sub>2</sub>O)

- Réacteurs Utilisateurs : Réacteurs à Eau Pressurisée (PWR), Réacteurs à Eau Bouillante (BWR).
- *Avantages* :
  - Efficace pour ralentir les neutrons, ce qui permet d'utiliser de l'uranium enrichi.
  - Abondante et peu coûteuse.
  - Facilite la conception compacte des réacteurs.
- Inconvénients :
  - Nécessite des systèmes sous pression pour rester liquide à haute température (surtout dans les PWR).
  - Production de grandes quantités de vapeur radioactive dans les BWR.
- Sécurité : Systèmes de sécurité actifs et passifs nécessaires pour gérer la pression élevée et les risques de fuite de réfrigérant.

#### 1 4 - 2. Eau Lourde (D<sub>2</sub>O)

- **Réacteurs Utilisateurs** : Réacteurs à Eau Lourde sous Pression (PHWR, CANDU).
- **Avantages** :
  - Excellente capacité de modération, permettant l'utilisation d'uranium naturel.

- Moins de risques de prolifération en raison de l'utilisation d'uranium non enrichi.
- **Inconvénients :**
  - Coût élevé de la production et du traitement de l'eau lourde.
  - Nécessite des systèmes complexes pour gérer et recycler l'eau lourde.
  - Sécurité : Bonnes caractéristiques de sécurité passive, mais des systèmes actifs sont nécessaires pour le contrôle et la maintenance de l'eau lourde.

### 1 - 4 - 3. Graphite

- **Réacteurs Utilisateurs :** Réacteurs Graphite-Gaz (GCR), Réacteurs à Haute Température refroidis au Gaz (HTGR), Réacteurs à Sels Fondus (MSR).
- **Avantages :**
  - Haute efficacité de modération, permettant l'utilisation de différents types de combustibles, y compris le thorium.
  - Stabilité à haute température, ce qui est bénéfique pour les réacteurs à haute température comme les HTGR.
- **Inconvénients :**
  - Susceptible de s'enflammer à haute température en présence d'oxygène.
  - Dégradation du graphite sous irradiation prolongée, nécessitant des remplacements périodiques.
  - Bonnes caractéristiques de sécurité passive, mais des mesures supplémentaires sont nécessaires pour prévenir l'oxydation du graphite.

### 1 – 4 - 4 -. Béryllium et Composés de Béryllium

- **Réacteurs Utilisateurs :** Réacteurs expérimentaux et certaines conceptions avancées.
- **Avantages :**
  - Excellente capacité de modération et faible absorption de neutrons.
  - Potentiel pour des réacteurs compacts et efficaces.
- **Inconvénients :**
  - Toxicité élevée du béryllium, nécessitant des précautions strictes lors de la manipulation et de l'utilisation.
  - Coût élevé et complexité de la production de composés de béryllium.
- **Sécurité :** Nécessite des mesures de sécurité strictes pour gérer la toxicité et les risques d'exposition.

### 1 – 4 -5 - Critères de Classement

#### 1. Efficacité de Modération

- Capacité du modérateur à ralentir les neutrons rapidement et efficacement pour maintenir la réaction en chaîne.
- Graphite et Eau Lourde : Très efficaces.
- Eau Légère : Efficace, mais moins que le graphite et l'eau lourde.

#### 2. Compatibilité avec le Type de Réfrigérant

- La compatibilité entre le modérateur et le réfrigérant affecte la conception et l'efficacité du réacteur.
- Eau Légère : Utilisée conjointement comme réfrigérant dans PWR et BWR.
- Graphite : Utilisé avec des réfrigérants gazeux (HTGR) ou des sels fondus (MSR).
- Eau Lourde : Utilisée indépendamment comme réfrigérant dans PHWR.

#### 3. Impact sur la Sécurité

- Eau Légère : Nécessite des systèmes de sécurité pour gérer la pression et les fuites potentielles.

- Eau Lourde : Offre une meilleure sécurité passive, mais des systèmes actifs sont nécessaires pour la gestion.
- Graphite : Bonnes caractéristiques de sécurité passive, mais risque d'oxydation.

#### 4. Flexibilité d'Utilisation du Combustible

**Capacité du réacteur à utiliser différents types de combustibles, influencée par le modérateur.**

- Eau Lourde : Permet l'utilisation d'uranium naturel, réduisant les coûts de combustible.
- Graphite : Permet l'utilisation de thorium et autres combustibles alternatifs.
- Eau Légère : Principalement compatible avec l'uranium enrichi.

#### 5. Considérations Environnementales

- Production et Recyclage : Impact environnemental de la production et du recyclage du modérateur.
- Déchets : Influence du modérateur sur la quantité et la gestion des déchets nucléaires.
- Eau Lourde et Graphite : Production et recyclage complexes mais avec des bénéfices à long terme en termes de flexibilité de combustible et de sécurité.

#### Exemples de Réacteurs

- ✓ **PWR (Réacteur à Eau Pressurisée)**  
Modérateur : Eau légère.  
Réfrigérant : Eau légère.  
Combustible : Uranium enrichi.
- ✓ **BWR (Réacteur à Eau Bouillante)**  
Modérateur : Eau légère.  
Réfrigérant : Eau légère.  
Combustible : Uranium enrichi.
- ✓ **PHWR (Réacteur à Eau Lourde sous Pression, CANDU)**  
Modérateur : Eau lourde.  
Réfrigérant : Eau lourde.  
Combustible : Uranium naturel.
- ✓ **HTGR (Réacteur à Haute Température refroidi au Gaz)**  
Modérateur : Graphite.  
Réfrigérant : Hélium.  
Combustible : Uranium enrichi ou thorium.
- ✓ **MSR (Réacteur à Sels Fondus)**  
Modérateur : Graphite (dans certaines conceptions).  
Réfrigérant : Sels fondus.  
Combustible : Uranium ou thorium dissous dans des sels fondus.

Ces critères permettent de classer les réacteurs nucléaires en fonction du type de modérateur, en tenant compte des aspects technologiques, de sécurité, de gestion du combustible, et des impacts environnementaux.

### 1 – 5 -Par type de fluide caloporteur:

Le classement des réacteurs nucléaires par types de fluide caloporteur repose sur divers critères qui influencent la conception, la sécurité, l'efficacité et l'impact environnemental des réacteurs. Voici les principaux types de fluides caloporteurs utilisés dans les réacteurs nucléaires et les critères de classement associés :

#### 1 – 5 - 1. Eau Légère (H<sub>2</sub>O)

- Réacteurs Utilisateurs :
  - Réacteurs à Eau Pressurisée (PWR),

- Réacteurs à Eau Bouillante (BWR).
- **Avantages :**
  - Grande capacité de transfert de chaleur.
  - Abondance et faible coût.
  - Double fonction de modérateur et de réfrigérant dans les PWR et BWR.
- **Inconvénients :**
  - Nécessite une haute pression pour rester liquide à haute température (PWR).
  - Génère de la vapeur radioactive (BWR).
- **Sécurité :** Nécessite des systèmes de sécurité avancés pour gérer la pression et éviter les fuites de vapeur radioactive.

#### 1 – 5 - 2. Eau Lourde (D2O)

- **Réacteurs Utilisateurs :** Réacteurs à Eau Lourde sous Pression (PHWR/CANDU).
- **Avantages :**
  - Excellente capacité de transfert de chaleur.
  - Permet l'utilisation de combustible à base d'uranium naturel grâce à sa faible absorption de neutrons.
- **Inconvénients :**
  - Coût élevé de production et de traitement de l'eau lourde.
- **Sécurité :**
  - Bonne sécurité passive, mais nécessite des systèmes actifs pour la gestion et le recyclage de l'eau lourde.

#### 1 – 5 - 3- Gaz (Hélium, Dioxyde de Carbone)

- **Réacteurs Utilisateurs :** Réacteurs à Haute Température refroidis au Gaz (HTGR), Réacteurs Graphite-Gaz (GCR).
- **Avantages :**
  - Hélium est chimiquement inerte et n'absorbe pas les neutrons.
  - Excellente capacité de transfert de chaleur à haute température.
  - Permet des températures de fonctionnement plus élevées, augmentant l'efficacité thermodynamique.
- **Inconvénients :**
  - Hélium est coûteux et nécessite des systèmes de confinement sophistiqués.
  - Le dioxyde de carbone est moins efficace comme caloporteur que l'hélium.
- **Sécurité :** Bonnes caractéristiques de sécurité passive, mais des défis de gestion du confinement du gaz.

#### 1 – 5 - 4. Métaux Liquides (Sodium, Plomb, Alliages de Plomb)

- **Réacteurs Utilisateurs :** Réacteurs à Neutrons Rapides refroidis au Sodium (SFR), Réacteurs refroidis au Plomb (LFR).
- **Avantages :**
  - Excellente capacité de transfert de chaleur.
  - Faible absorption de neutrons, permettant un meilleur rendement neutronique.
  - Fonctionnement à basse pression, réduisant les risques de rupture de confinement.
- **Inconvénients :**

- Sodium réagit violemment avec l'eau et l'air, nécessitant des précautions supplémentaires.
- Plomb est lourd et peut causer des problèmes de corrosion à haute température.
- **Sécurité** : Haute sécurité passive grâce à la faible pression de fonctionnement, mais des mesures de sécurité actives sont nécessaires pour gérer les réactions chimiques potentielles.

### 1 – 5 - 5. Sels Fondus

- **Réacteurs Utilisateurs** : Réacteurs à Sels Fondus (MSR).
- **Avantages** :
  - Haute capacité de transfert de chaleur.
  - Fonctionnement à basse pression, réduisant les risques de rupture de confinement.
  - Flexibilité dans le type de combustible utilisé (uranium, thorium).
- **Inconvénients** :
  - Complexité chimique et matérielle du système de sels fondus.
  - Corrosion des matériaux du réacteur à haute température.
- **Sécurité** : Bonne sécurité passive grâce à la basse pression de fonctionnement, mais nécessite des systèmes de gestion chimique sophistiqués.

### 1 – 5 – 6 - Critères de Classement

#### 1. Capacité de Transfert de Chaleur

- Eau (Légère et Lourde) : Très bonne capacité de transfert de chaleur.
- Métaux Liquides : Excellente capacité de transfert de chaleur, particulièrement le sodium.
- Gaz (Hélium) : Bonne capacité à haute température.
- Sels Fondus : Très bonne capacité de transfert de chaleur.

#### 2. Pression de Fonctionnement

- Eau Légère (PWR) : Haute pression.
- Eau Lourde (PHWR) : Modérée à haute pression.
- Gaz et Métaux Liquides : Basse pression.
- Sels Fondus : Basse pression.

#### 3. Sécurité

- Eau Légère (BWR) : Complexité accrue due à la génération de vapeur.
- Eau Lourde : Bonne sécurité passive, mais avec des systèmes de gestion complexes.
- Gaz (Hélium) : Très bonne sécurité passive.
- Métaux Liquides : Haute sécurité passive, mais avec des risques chimiques spécifiques.
- Sels Fondus : Excellente sécurité passive.

#### 4. Complexité Technologique et Coût

- Eau Lourde : Coût élevé de production et de gestion.
- Gaz (Hélium) : Coûteux en termes de confinement et de gestion.
- Métaux Liquides : Coût et complexité associés à la gestion des réactions chimiques.
- Sels Fondus : Complexité chimique et matérielle élevée.

#### 5. Efficacité Thermodynamique

- Gaz (Hélium) : Haute efficacité grâce à des températures de fonctionnement élevées.
- Sels Fondus : Haute efficacité à basse pression.

- Métaux Liquides : Très bonne efficacité à basse pression.
- Eau Légère et Lourde : Bonne efficacité, mais limitée par la température et la pression.

#### 6. Compatibilité avec le Type de Modérateur

- Eau Légère : Utilisée à la fois comme modérateur et réfrigérant.
- Eau Lourde : Utilisée à la fois comme modérateur et réfrigérant.
- Gaz (Hélium) : Utilisé avec le graphite comme modérateur.
- Métaux Liquides : Utilisés sans modérateur ou avec des réflecteurs de neutrons.
- Sels Fondus : Peut être utilisé avec ou sans modérateur (graphite dans certaines conceptions).

#### Exemples de Réacteurs

- ✓ **PWR (Réacteur à Eau Pressurisée)**
  - Fluide Caloporteur : Eau légère.
  - Modérateur : Eau légère.
  - Combustible : Uranium enrichi.
- ✓ **BWR (Réacteur à Eau Bouillante)**
  - Fluide Caloporteur : Eau légère.
  - Modérateur : Eau légère.
  - Combustible : Uranium enrichi.
- ✓ **PHWR (Réacteur à Eau Lourde sous Pression, CANDU)**
  - Fluide Caloporteur : Eau lourde.
  - Modérateur : Eau lourde.
  - Combustible : Uranium naturel.
- ✓ **HTGR (Réacteur à Haute Température refroidi au Gaz)**
  - Fluide Caloporteur : Hélium.
  - Modérateur : Graphite.
  - Combustible : Uranium enrichi ou thorium.
- ✓ **SFR (Réacteur à Neutrons Rapides refroidi au Sodium)**
  - Fluide Caloporteur : Sodium.
  - Modérateur : Aucun (réacteur rapide).
  - Combustible : Uranium, plutonium.
- ✓ **MSR (Réacteur à Sels Fondus)**
  - Fluide Caloporteur : Sels fondus.
  - Modérateur : Graphite (dans certaines conceptions).
  - Combustible : Uranium ou thorium dissous dans des sels fondus.

Ces critères permettent de comparer et de classer les réacteurs nucléaires en fonction du type de fluide caloporteur, en prenant en compte les aspects technologiques, de sécurité, d'efficacité et d'impact environnemental.

## 1 – 6 - Par application:

Le classement des réacteurs nucléaires par types d'application repose sur leurs usages spécifiques, qu'ils soient pour la production d'électricité, la recherche, la propulsion navale, la production de chaleur industrielle, ou d'autres applications spécialisées. **Voici les principaux types d'applications et les critères de classement associés :**

## 6 - 1 Production d'Électricité

- **Réacteurs Utilisateurs** : Réacteurs à Eau Pressurisée (PWR), Réacteurs à Eau Bouillante (BWR), Réacteurs à Eau Lourde sous Pression (PHWR/CANDU), Réacteurs à Neutrons Rapides (FNR).
- **Critères** :
  - Efficacité énergétique : Capacité du réacteur à convertir l'énergie nucléaire en électricité.
  - Capacité de production : Taille et puissance du réacteur.
  - Disponibilité et fiabilité : Taux de fonctionnement et maintenance.
  - Coûts : Coût de construction, d'exploitation et de démantèlement.
  - Sécurité et impact environnemental : Mesures de sécurité et gestion des déchets.

## 6 - 2. Recherche et Production d'Isotopes

- **Réacteurs Utilisateurs** : Réacteurs de Recherche (TRIGA, OPAL, BR2), Réacteurs de Production d'Isotopes.
- **Critères** :
  - Flexibilité d'opération : Capacité à réaliser différentes expériences.
  - Production d'isotopes : Efficacité dans la production d'isotopes médicaux et industriels.
  - Sécurité et contrôle : Mesures de sécurité spécifiques pour protéger les chercheurs et le public.
  - Accès et collaboration : Disponibilité pour les institutions de recherche et partenariats internationaux.

## 6 -3. Propulsion Navale

- **Réacteurs Utilisateurs** : Réacteurs à Eau Pressurisée Navale (NPR), Réacteurs à Eau Lourde Navale.
- **Critères** :
  - Compacité et robustesse : Taille réduite et résistance aux conditions marines.
  - Autonomie : Durée entre les rechargements de combustible.
  - Sécurité : Capacités de confinement et de sécurité en cas d'incident.
  - Maintenance et fiabilité : Facilité d'entretien et taux de pannes minimisé.

## 6 - 4. Production de Chaleur Industrielle

- **Réacteurs Utilisateurs** : Réacteurs à Haute Température (HTGR), Réacteurs à Sels Fondus (MSR).
- **Critères** :
  - Température de sortie : Capacité à produire de la chaleur à haute température pour des processus industriels.
  - Fiabilité : Capacité à fournir une chaleur constante et fiable.
  - Sécurité : Mesures pour éviter les accidents industriels.
  - Coûts : Coût de construction et d'exploitation pour des applications industrielles.

## 6 - 5. Désalinisation

- **Réacteurs Utilisateurs** : Réacteurs à Eau Pressurisée (PWR), Réacteurs à Haute Température (HTGR).
- **Critères** :

- Efficacité : Capacité à produire de grandes quantités d'eau douce à partir d'eau de mer.
- Coûts : Coût de construction et d'exploitation des installations de désalinisation.
- Impact environnemental : Gestion des déchets salins et consommation d'énergie.
- Sécurité : Protection contre les accidents et les fuites potentielles de radiations.

## 6 - 6. Réacteurs Mobiles ou de Petite Taille

- **Réacteurs Utilisateurs** : Réacteurs Modulaires de Petite Taille (SMR), Réacteurs de Bord (sous-marins, brise-glaces).
- **Critères** :
  - Portabilité et installation : Facilité de transport et d'installation rapide.
  - Autonomie et durée de vie : Durée entre les recharges de combustible et maintenance.
  - Sécurité : Confinement sécurisé et résistance aux chocs.
  - Flexibilité : Capacité à opérer dans des environnements variés et à répondre à des besoins énergétiques changeants.
- **Exemples de Réacteurs**
  - **Réacteur à Eau Pressurisée (PWR)**
    - ✓ **Application** : Production d'électricité.
    - ✓ **Caractéristiques** : Haute fiabilité, bonne sécurité, utilisé dans de nombreuses centrales à travers le monde.
  - **Réacteur de Recherche TRIGA**
    - ✓ **Application** : Recherche et production d'isotopes.
    - ✓ **Caractéristiques** : Flexible pour les expériences, sûr, utilisé dans les universités et les laboratoires
  - **Réacteur à Eau Pressurisée Navale (NPR)**
    - ✓ **Application** : Propulsion navale (sous-marins, porte-avions).
    - ✓ **Caractéristiques** : Compact, robuste, longue autonomie.
  - **Réacteur à Haute Température (HTGR)**
    - ✓ **Application** : Production de chaleur industrielle et désalinisation.
    - ✓ **Caractéristiques** : Haute température de sortie, efficacité élevée, sécurité passive.
  - **Réacteur Modulaire de Petite Taille (SMR)**
    - ✓ **Application** : Réacteurs mobiles ou de petite taille pour des sites isolés ou des applications spécifiques.
    - ✓ **Caractéristiques** : Portabilité, flexibilité, coûts réduits de construction et d'exploitation

Ces critères permettent de comparer et de classer les réacteurs nucléaires en fonction de leur type d'application, en prenant en compte les aspects technologiques, économiques, de sécurité et d'efficacité.

En plus de ces critères techniques, les réacteurs nucléaires peuvent également être classés selon des critères de sûreté, de performance économique ou d'impact environnemental.

Il est important de noter que cette classification n'est pas exhaustive et qu'il existe de nombreuses nuances entre les différentes catégories. De plus, la technologie des réacteurs nucléaires est en constante évolution, ce qui signifie que de nouvelles filières et de nouveaux concepts sont en cours de développement.

## 2 – CLASSEMENT PAR GÉNÉRATION

### 2-1 - Types de réacteurs de première génération ,

La première génération de réacteurs nucléaires, développée dans les années 1940 et 1950, comprend plusieurs types de réacteurs caractérisés par des technologies initiales et souvent prototypes. Voici une description de leurs caractéristiques et de leur constitution :

#### 2 -1-1. Réacteurs Graphite-Gaz (GCR)

- **Combustible** : Uranium naturel sous forme de métal ou d'oxyde.
- **Modérateur** : Graphite, utilisé pour ralentir les neutrons.
- **Caloporteur** : Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) gazeux.
- **Caractéristiques** : Utilisés principalement en Grande-Bretagne (réacteurs Magnox). Les réacteurs GCR sont parmi les premiers types de réacteurs civils pour la production d'électricité.

#### 2 -1 - 2. Réacteurs à Eau Lourde (CANDU)

- **Combustible** : Uranium naturel ou légèrement enrichi.
- **Modérateur** : Eau lourde (D<sub>2</sub>O).
- **Caloporteur** : Eau lourde (D<sub>2</sub>O).
- **Caractéristiques** : Utilisés principalement au Canada. Les réacteurs CANDU peuvent être rechargés en combustible sans être arrêtés.

#### 2 -1 - 3. Réacteurs à Eau sous Pression (PWR) et Réacteurs à Eau Bouillante (BWR)

- **Combustible** : Uranium enrichi.
- **Modérateur** : Eau légère (H<sub>2</sub>O).
- **Caloporteur** : Eau légère (H<sub>2</sub>O).
- **Caractéristiques** : Les PWR utilisent de l'eau sous pression pour éviter l'ébullition dans le cœur du réacteur, tandis que les BWR permettent l'ébullition de l'eau dans le cœur pour générer de la vapeur. Ces réacteurs sont à la base des réacteurs de deuxième génération, mais leurs premières versions font partie de la première génération.

#### 2 -4. Réacteurs à Eau Lourde Modérés par Graphite (LWGR)

- **Combustible** : Uranium naturel ou légèrement enrichi.
- **Modérateur** : Graphite.
- **Caloporteur** : Eau légère.
- **Caractéristiques** : Utilisés principalement en Union Soviétique (réacteurs RBMK). Connus pour leur conception unique et leur capacité à produire du plutonium.

## 2 -5. Réacteurs de Recherche

- **Combustible** : Varié, incluant uranium hautement enrichi.
- **Modérateur** : Eau légère, graphite ou béryllium.
- **Caloporteur** : Eau légère ou autres fluides.
- **Caractéristiques** : Conçus principalement pour la recherche scientifique et la production de radio-isotopes.

## Défis et Caractéristiques Communes

- **Sécurité** : Les réacteurs de première génération manquaient souvent de certaines des mesures de sécurité passives et actives développées plus tard.
- **Technologie de Construction** : Ils utilisaient des matériaux et des technologies de construction qui étaient innovants pour l'époque, mais souvent rudimentaires par rapport aux standards modernes.
- **Production de Plutonium** : Certains réacteurs étaient également utilisés pour la production de plutonium à des fins militaires, notamment les réacteurs de recherche et certains types de GCR.

Ces réacteurs ont été essentiels pour le développement initial de l'énergie nucléaire civile et militaire, posant les bases pour les générations suivantes de réacteurs nucléaires.

## 2 - 2 - Caractéristiques des filières de la seconde génération de réacteurs nucléaires

Les réacteurs nucléaires de deuxième génération se distinguent par plusieurs caractéristiques principales :

### 2 - 2- 1. Amélioration de la sûreté:

- Conception plus robuste pour résister aux accidents majeurs
- Systèmes de confinement plus perfectionnés pour empêcher la fuite de radioactivité
- Mise en place de mesures de sûreté supplémentaires pour protéger contre les actes de malveillance

### 2 – 2 - 2. Augmentation de la performance:

- Utilisation d'uranium plus enrichi pour une meilleure efficacité de la fission
- Amélioration du transfert de chaleur pour une production d'énergie plus importante
- Augmentation de la durée de vie des réacteurs

### 2 \_ 2 -3. Réduction de l'impact environnemental:

- Mise en place de systèmes de traitement des effluents plus performants pour réduire la quantité de déchets radioactifs

- Optimisation de la consommation de combustible pour minimiser l'extraction de ressources naturelles
- Recherche sur des technologies de retraitement du combustible pour valoriser les matières recyclables

**Les deux filières principales de réacteurs de deuxième génération sont:**

#### **2 – 2 – 4-. Réacteurs à eau pressurisée (REP):**

- **Modérateur:** Eau
- **Refroidissement:** Eau sous pression
- **Avantages:** Technologie mature et éprouvée, sûreté élevée, bonne performance
- **Inconvénients:** Conception complexe, risque de fuites de vapeur d'eau
- **Exemples:** Centrale nucléaire de Chinon, Centrale nucléaire de Cattenom

#### **2- 2- 5. Réacteurs à eau bouillante (REB):**

- **Modérateur:** Eau
- **Refroidissement:** Eau bouillante
- **Avantages:** Conception simple et compacte, bonne réactivité aux variations de charge
- **Inconvénients:** Moins sûreté que les REP, risque de corrosion, production de déchets radioactifs plus importante
- **Exemples:** Centrale nucléaire de Chooz, Centrale nucléaire de Fukushima Daiichi

**En plus de ces deux filières principales, il existe quelques autres types de réacteurs de deuxième génération qui sont moins répandus, tels que:**

- **Réacteurs à graphite gaz (UNGG):** Graphite comme modérateur, gaz (généralement CO<sub>2</sub>) comme refroidisseur (utilisés en France dans les années 1960 et 1970, mais plus construits aujourd'hui)
- **Réacteurs à eau lourde:** Eau lourde (D<sub>2</sub>O) comme modérateur et refroidisseur (utilisés dans quelques pays comme le Canada et l'Argentine)

**Il est important de noter que la classification des réacteurs nucléaires en générations n'est pas toujours rigoureuse.** Certains réacteurs peuvent présenter des caractéristiques de plusieurs générations.

## **2 -3 - Caractéristiques des filières de la troisième génération de réacteurs nucléaires**

Les réacteurs nucléaires de troisième génération (**Génération III**) représentent une évolution majeure par rapport aux réacteurs de deuxième génération (**Génération II**). Ils visent à répondre aux défis actuels et futurs de la production d'énergie nucléaire, en s'appuyant sur les progrès technologiques et les leçons tirées des réacteurs existants.

Les principales caractéristiques des filières de la troisième génération de réacteurs nucléaires sont les suivantes :

### **2 – 3 -- 1. Sûreté renforcée:**

- Conception robuste et inhéremment sûre, capable de résister à des accidents graves
- Systèmes de confinement perfectionnés avec plusieurs barrières de protection
- Inclusion de technologies passives pour la sûreté, ne nécessitant pas d'intervention humaine

#### 2 – 3 -2. Performance améliorée:

- Meilleure utilisation du combustible nucléaire, réduisant la quantité de déchets radioactifs
- Production d'énergie plus importante et plus flexible
- Durée de vie prolongée des réacteurs

#### 2 - 3- 3. Réduction de l'impact environnemental:

- Diminution des émissions de gaz à effet de serre
- Optimisation de la gestion des déchets radioactifs
- Conception plus respectueuse de l'environnement

#### Les principaux types de réacteurs de troisième génération comprennent:

- **Réacteurs à eau pressurisée évolués (EPR):** Version améliorée des REP de Génération II, avec une sûreté accrue et une performance optimisée. (Exemple : EPR de Flamanville)
- **Réacteurs à eau supercritique (RESC):** Fonctionnent à des conditions de pression et de température plus élevées que les REP classiques, pour une meilleure efficacité thermodynamique.
- **Réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na):** Utilisent du sodium liquide comme refroidissant, permettant une meilleure utilisation du combustible et la transmutation des actinides mineurs.
- **Réacteurs à sels fondus (RSF):** Le cœur du réacteur est constitué d'un mélange de sels fondus, offrant une grande flexibilité de conception et une sûreté accrue.

**Il est important de noter que la filière de Génération III est encore en développement.** Certains réacteurs de Génération III+ ont déjà été construits et mis en service, tandis que d'a

## 2 - 4- Caractéristiques des filières de la quatrième génération de réacteurs

Les réacteurs nucléaires de quatrième génération (**Génération IV**) représentent une vision ambitieuse pour l'avenir de l'énergie nucléaire. Ils visent à répondre aux défis les plus importants de la société, tels que la sécurité énergétique, la durabilité et la lutte contre le changement climatique, tout en offrant des avantages économiques significatifs.

Les filières de la Génération IV se distinguent par plusieurs caractéristiques révolutionnaires :

#### 2 – 4- 1. Sûreté accrue:

- Conception inhéremment sûre, minimisant les risques d'accidents graves
- Systèmes de confinement robustes et auto-protégés
- Technologies avancées de détection et de prévention des incidents

#### 2 – 4 - 2. Performance optimisée:

- Utilisation plus efficace du combustible nucléaire, réduisant la quantité de déchets radioactifs
- Production d'énergie plus importante et plus flexible
- Capacité de production d'hydrogène propre

#### 2 – 4 -3. Réduction de l'impact environnemental:

- Emissions de gaz à effet de serre quasi nulles
- Gestion minimale des déchets radioactifs
- Conception respectueuse de l'environnement et des ressources naturelles

#### Les six concepts principaux de réacteurs de Génération IV comprennent:

- **Réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na):** Fonctionnent à des températures élevées et utilisent du sodium liquide comme refroidissant, permettant une meilleure efficacité de la fission et la transmutation des actinides mineurs.
- **Réacteurs à très haute température (VHTR):** Utilisent des réacteurs à base d'hélium à très haute température pour produire de la chaleur pouvant être utilisée pour diverses applications, telles que la production d'hydrogène, le dessalement et la production d'acier.
- **Réacteurs à sels fondus (RSF):** Le cœur du réacteur est constitué d'un mélange de sels fondus, offrant une grande flexibilité de conception, une sûreté accrue et la possibilité de destruction des déchets radioactifs.
- **Réacteurs à eau supercritique (SCWR):** Fonctionnent à des conditions de pression et de température plus élevées que les réacteurs à eau classiques, pour une meilleure efficacité thermodynamique et une réduction de la consommation d'eau.
- **Réacteurs à neutrons rapides refroidis au gaz (RNR-Gaz):** Utilisent un gaz, tel que l'hélium ou le CO<sub>2</sub>, comme refroidissant pour les neutrons rapides, offrant une conception plus simple et plus économique que les RNR-Na.
- **Réacteurs hybrides à accélérateur (ADS):** Combinent un réacteur nucléaire avec un accélérateur de particules pour transmuter les déchets radioactifs en éléments stables, réduisant ainsi la quantité de déchets à stocker.

**Il est important de souligner que la technologie de la Génération IV est encore en cours de développement.** Des recherches et des tests approfondis sont nécessaires avant que ces réact

### 3 - FILIERES TECHNOLOGIQUES

Les filières des réacteurs nucléaires sont des catégories basées sur la conception et le mode de fonctionnement des réacteurs nucléaires. Chaque filière utilise différentes technologies et combustibles, ayant des applications spécifiques et des avantages distincts. Voici les principales filières des réacteurs nucléaires :

#### 3 – 1 - Réacteurs à Eau Pressurisée (PWR)

- **Combustible:** Uranium enrichi (3-5% U-235).
- **Modérateur et Réfrigérant:** Eau ordinaire sous pression.

- **Caractéristiques:** Le réacteur à eau pressurisée est la filière la plus répandue dans le monde. L'eau sous haute pression empêche l'ébullition dans le cœur du réacteur, permettant de maintenir une température élevée et efficace pour la production de vapeur et d'électricité.
  - ✓ **Exemples:** Réacteurs des centrales nucléaires en France comme ceux de la série REP (réacteur à eau pressurisée)

### 3 – 2 - Réacteurs à Eau Bouillante (BWR)

- **Combustible:** Uranium enrichi.
- **Modérateur et Réfrigérant:** Eau ordinaire.
- **Caractéristiques:** Dans un réacteur à eau bouillante, l'eau bout directement dans le cœur du réacteur, produisant de la vapeur qui entraîne les turbines. Ce type de réacteur est plus simple en conception que le PWR.
  - ✓ Exemples: Plusieurs réacteurs aux États-Unis et au Japon.

### 3 – 3 - Réacteurs à Eau Lourde sous Pression (PHWR)

- **Combustible:** Uranium naturel.
- **Modérateur:** Eau lourde (D<sub>2</sub>O).
- **Réfrigérant:** Eau lourde sous pression.
- **Caractéristiques:** Les réacteurs à eau lourde, comme les réacteurs CANDU, permettent l'utilisation d'uranium naturel grâce à l'efficacité du modérateur d'eau lourde, réduisant ainsi les coûts de combustible.
  - ✓ **Exemples:** Réacteurs CANDU au Canada.

### 3 – 4 - Réacteurs Graphite-Gaz (GCR et AGR)

- **Combustible:** Uranium naturel (GCR) ou uranium enrichi (AGR).
- **Modérateur:** Graphite.
- **Réfrigérant:** Gaz (CO<sub>2</sub>).
- **Caractéristiques:** Ces réacteurs utilisent du graphite comme modérateur et du dioxyde de carbone comme réfrigérant. Les AGR (Advanced Gas-cooled Reactors) sont une version améliorée des GCR (Gas-cooled Reactors).
  - ✓ **Exemples:** Réacteurs AGR au Royaume-Uni.

### 3 – 5 - Réacteurs à Neutrons Rapides (FBR)

- **Combustible:** Uranium et plutonium.
- **Modérateur:** Aucun (utilise des neutrons rapides).
- **Réfrigérant:** Sodium liquide.
- **Caractéristiques:** Les réacteurs à neutrons rapides n'utilisent pas de modérateur pour ralentir les neutrons. Ils peuvent utiliser et produire du plutonium, permettant un cycle de combustible fermé et une meilleure utilisation des ressources en uranium.
  - ✓ Exemples: Réacteurs expérimentaux comme Phénix et Superphénix en France.

### 3 – 6 - Réacteurs de Recherche et autres Types

- **Réacteurs de Recherche:** Utilisés principalement pour la recherche scientifique, la production de radioisotopes, et les tests de matériaux. Ils

peuvent varier en conception, utilisant différents types de combustibles et modérateurs.

- **Réacteurs de Propulsion Nucléaire:** Utilisés dans les sous-marins et les porte-avions nucléaires, généralement basés sur des variantes des réacteurs à eau pressurisée.

#### **Autres Filières Innovantes**

- **Réacteurs à Sel Fondu (MSR):** Utilisent du sel fondu comme réfrigérant et combustible liquide. Potentiellement plus sûrs et plus efficaces pour la génération d'énergie nucléaire.
- **Réacteurs à Haute Température Refroidis au Gaz (HTGR):** Utilisent de l'hélium comme réfrigérant et du graphite comme modérateur, opérant à des températures très élevées pour une efficacité accrue.

Ces différentes filières montrent la diversité des approches technologiques dans le domaine de l'énergie nucléaire, chacune ayant ses propres avantages et défis spécifiques (IAEA) (Wikipédia, l'encyclopédie libre) (Wikipedia).

## **4 – descriptions des différentes filières**

### **4 – 1- Réacteurs à eaux pressurisées (PWR- REP)**

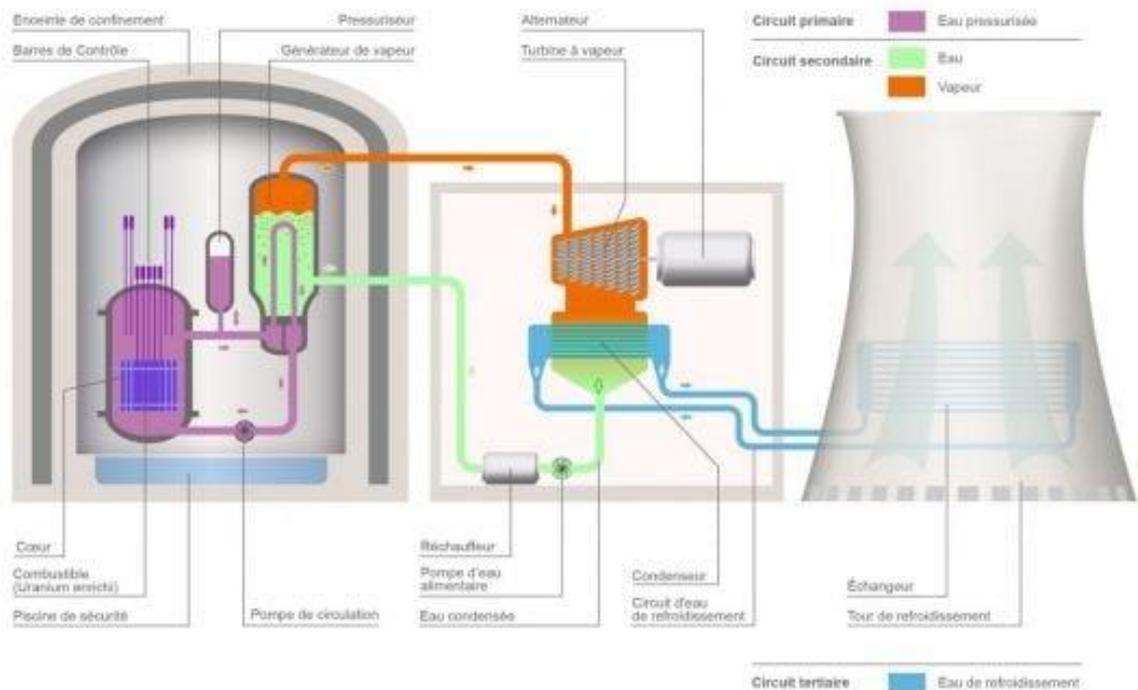
Le **réacteur à eau pressurisée** (acronyme REP), ou PWR pour **pressurized water reactor** en anglais, est la filière de **réacteurs nucléaires** la plus répandue dans le monde : en janvier 2021, les deux tiers des 444 réacteurs nucléaires de puissance en fonctionnement dans le monde sont de technologie REP,

#### **4 - 1 – 1 -Structure et Composants**

- **Cœur du réacteur** : Contient le combustible nucléaire, généralement des assemblages de barres de combustible d'uranium enrichi (3-5% U-235).
- **Modérateur** : Eau ordinaire qui ralentit les neutrons pour maintenir la réaction en chaîne.
- **Réfrigérant** : Eau sous haute pression, qui empêche l'ébullition dans le cœur du réacteur malgré les hautes températures.
- **Générateurs de vapeur** : L'eau du circuit primaire transfère sa chaleur à l'eau du circuit secondaire dans les générateurs de vapeur, produisant de la vapeur qui entraîne les turbines.
- **Enceinte de confinement** : Structure renforcée entourant le réacteur pour contenir la radioactivité en cas d'incident.

#### **4 – 1 -2 - Fonctionnement**

## Principe des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP)



**Circuit primaire** : L'eau sous pression circule dans le cœur du réacteur où elle absorbe la chaleur générée par la fission nucléaire. La haute pression (environ 155 bar) empêche l'eau de bouillir.

**Circuit secondaire** : La chaleur du circuit primaire est transférée à un circuit secondaire via les générateurs de vapeur. L'eau du circuit secondaire se transforme en vapeur, entraînant les turbines qui produisent de l'électricité.

**Circuit tertiaire** : Utilisé pour condenser la vapeur du circuit secondaire et la transformer à nouveau en eau, complétant ainsi le cycle de refroidissement.

### 4 – 1 – 3 - Avantages des PWR

- **Sécurité** : Les PWR sont conçus avec plusieurs niveaux de sécurité et de redondance. La haute pression du circuit primaire limite le risque d'ébullition et d'accumulation de vapeur dans le cœur.
- **Propreté** : Le circuit primaire est isolé et radioactif, tandis que le circuit secondaire est non radioactif, réduisant les risques de contamination radioactive.
- **Robustesse** : La conception permet une exploitation stable et fiable, avec une grande capacité de production d'énergie.

### 4 – 1 – 4 - Défis et Inconvénients

- **Coût** : Les PWR sont complexes et coûteux à construire et à entretenir.
- **Gestion des déchets** : Comme tout réacteur nucléaire, les PWR produisent des déchets radioactifs nécessitant une gestion sûre à long terme.
- **Risques potentiels** : Malgré les mesures de sécurité, les accidents, bien que rares, peuvent avoir des conséquences graves.

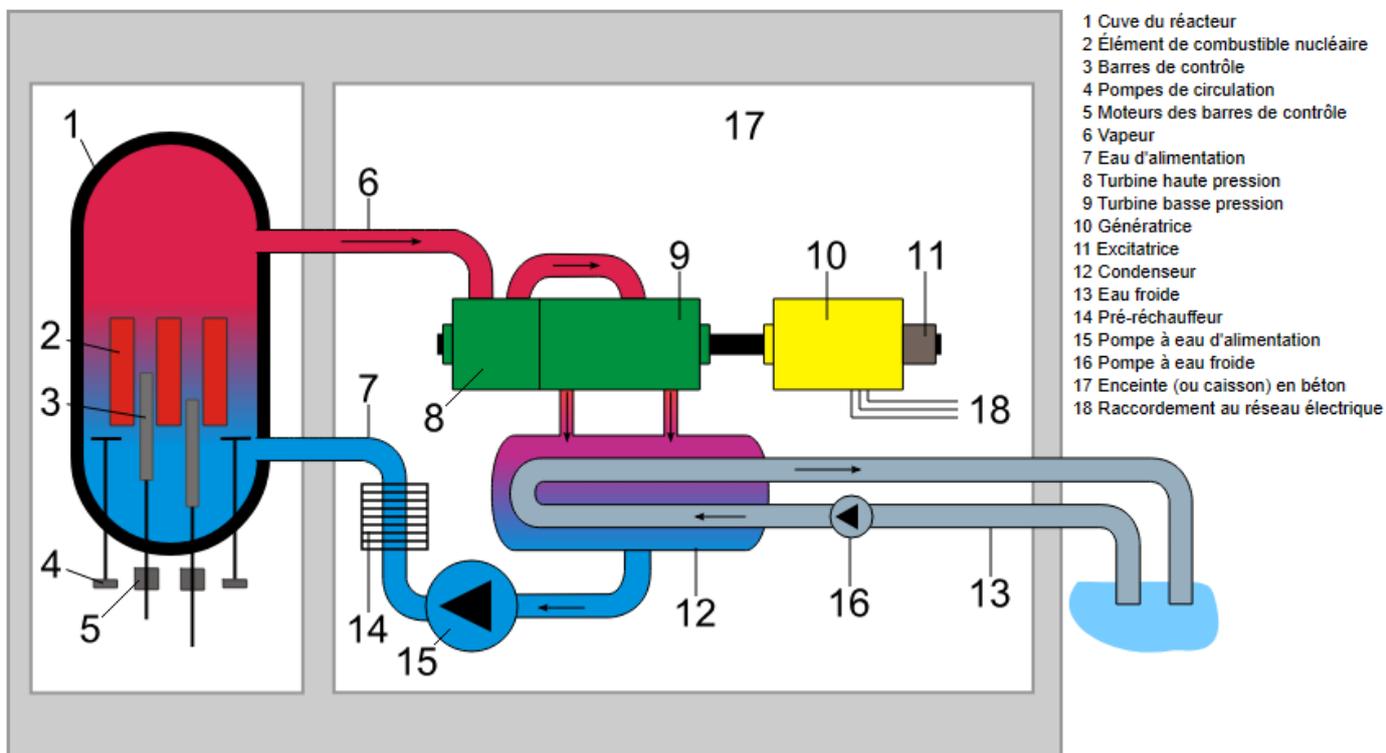
### 4 – 1 – 5 - Exemples et Applications

Les PWR sont largement utilisés dans le monde entier, avec des exemples notables en France (où ils constituent la majorité du parc nucléaire), aux États-Unis, en Chine et dans de nombreux autres pays. Des réacteurs célèbres incluent ceux des centrales de la série **REP** en France, les réacteurs de type Westinghouse et ceux de la série **VVER** en Russie.

## 4 – 2 - Réacteurs à Eau Bouillante (BWR)

Le Réacteur à Eau Bouillante (BWR, de l'anglais Boiling Water Reactor) est un type de réacteur nucléaire utilisé pour la production d'électricité. Il fonctionne en utilisant de l'eau comme modérateur et comme réfrigérant. Voici une description de son fonctionnement et de ses caractéristiques principales :

### 4 – 2 – 1 - Fonctionnement d'un Réacteur à Eau Bouillante (BWR)



- **Modération et Réfrigération :**
  - L'eau circule à travers le cœur du réacteur où se trouvent les barres de combustible contenant de l'uranium enrichi.
  - L'eau modère (ralentit) les neutrons rapides émis par les réactions de fission, augmentant ainsi la probabilité qu'ils provoquent d'autres fissions.
- **Ébullition et Production de Vapeur :**
  - À l'intérieur du cœur du réacteur, la fission nucléaire produit une grande quantité de chaleur.
  - Cette chaleur fait bouillir l'eau qui se transforme en vapeur directement à l'intérieur du réacteur.
- **Turbine et Générateur :**

- La vapeur produite est dirigée vers une turbine, entraînant celle-ci et convertissant l'énergie thermique en énergie mécanique.
- La turbine est connectée à un générateur qui transforme cette énergie mécanique en électricité.
- **Condensation :**
  - Après avoir traversé la turbine, la vapeur est condensée en eau dans un condenseur à l'aide d'un circuit de refroidissement externe.
  - L'eau condensée est ensuite renvoyée dans le réacteur pour être de nouveau chauffée et vaporisée.

#### 4 - 2 – 2 -Caractéristiques des BWR

- **Efficacité :** Les BWR sont connus pour leur efficacité opérationnelle et leur capacité à produire une grande quantité d'électricité.
- **Conception :** Comparé à un Réacteur à Eau Pressurisée (PWR), le BWR a une conception plus simple car il n'a pas besoin de générateurs de vapeur séparés.
- **Sécurité :** Les BWR sont conçus avec plusieurs systèmes de sécurité pour contrôler et refroidir le réacteur en cas d'urgence.
- **Cout d'Infrastructure :** En raison de leur conception plus simple, les coûts d'infrastructure initiale peuvent être inférieurs à ceux des PWR.
- **Défis :** La gestion de l'eau bouillante directement dans le réacteur pose des défis techniques, notamment en ce qui concerne le contrôle des produits de fission et la gestion de la corrosion.

#### 4 – 2 – 3 -Exemples d'utilisation

- Les BWR sont largement utilisés dans plusieurs pays pour la production d'électricité. Par exemple, au Japon et aux États-Unis, de nombreux réacteurs nucléaires en fonctionnement sont des BWR.
- L'un des réacteurs BWR les plus connus est celui de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi au Japon.

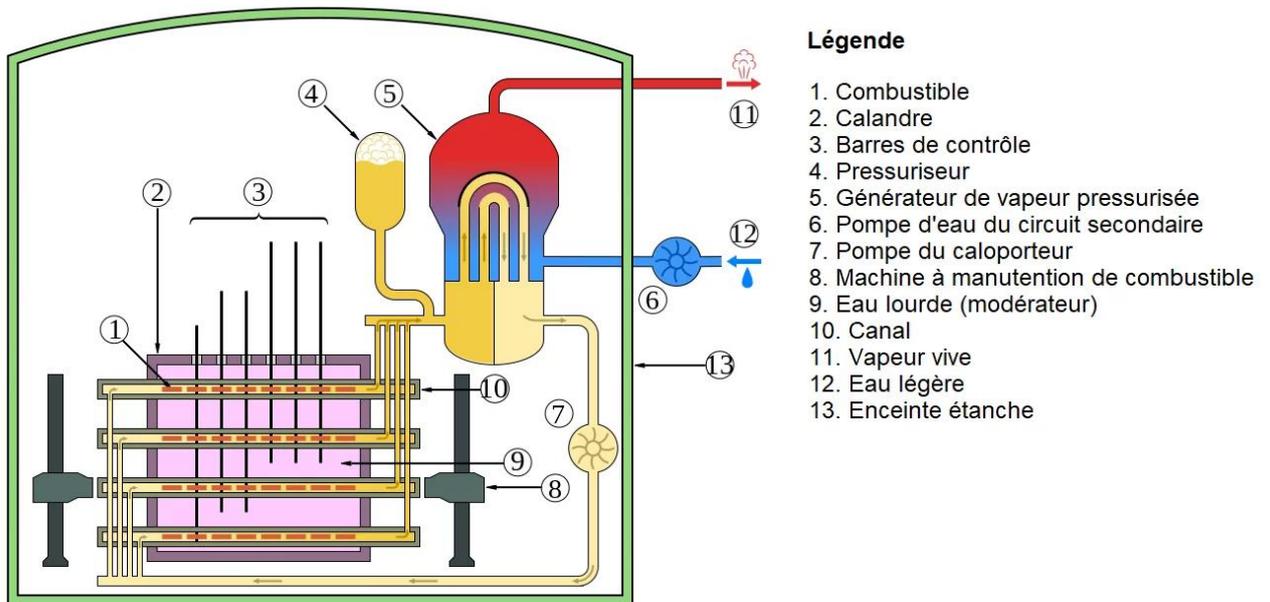
#### Conclusion

Le Réacteur à Eau Bouillante est un composant clé de l'industrie nucléaire mondiale, contribuant de manière significative à la production d'électricité tout en posant des défis techniques et de sécurité qui nécessitent une gestion rigoureuse.

#### 4 – 3 – Réacteurs à eaux lourde sous pression (PHWR)

Le Réacteur à Eau Lourde sous Pression (PHWR, de l'anglais Pressurized Heavy Water Reactor) est un type de réacteur nucléaire qui utilise de l'eau lourde (oxyde de deutérium, D<sub>2</sub>O) comme modérateur et liquide de refroidissement. Voici une description détaillée de son fonctionnement, de ses caractéristiques et de ses utilisations :

##### 4 – 3 – 1 Fonctionnement d'un Réacteur à Eau Lourde sous Pression (PHWR)



- **Modération et Réfrigération :**  
L'eau lourde (D<sub>2</sub>O) est utilisée à la fois comme modérateur et comme réfrigérant. Le deutérium dans l'eau lourde est un meilleur modérateur que l'hydrogène dans l'eau ordinaire (H<sub>2</sub>O), ce qui permet une meilleure efficacité de la réaction en chaîne de fission.
- **Circuit de Réfrigérant :**  
L'eau lourde circule dans un circuit primaire sous haute pression, passant à travers le cœur du réacteur où se trouvent les barres de combustible. La haute pression empêche l'eau lourde de bouillir à haute température.
- **Production de Chaleur et de Vapeur :**  
La fission nucléaire produit de la chaleur, qui est absorbée par l'eau lourde. Cette chaleur est ensuite transférée à un générateur de vapeur, où elle convertit de l'eau légère (H<sub>2</sub>O) en vapeur dans un circuit secondaire séparé.
- **Turbine et Générateur :**  
La vapeur produite dans le circuit secondaire est dirigée vers une turbine, où elle est convertie en énergie mécanique. Cette énergie mécanique fait tourner un générateur pour produire de l'électricité.
- **Condensation :**  
Après avoir traversé la turbine, la vapeur est condensée en eau dans un condenseur et renvoyée dans le générateur de vapeur pour être réchauffée.

#### 4 – 3 – 2 -Caractéristiques des PHWR

- **Utilisation de Combustible Naturel :**  
Les PHWR peuvent utiliser de l'uranium naturel (non enrichi) comme combustible en raison de l'efficacité supérieure de l'eau lourde en tant que modérateur. Cela réduit les coûts associés à l'enrichissement de l'uranium.
- **Recharge en Ligne :**

Un avantage important des PHWR est leur capacité à être rechargés en combustible sans arrêter le réacteur. Cela permet une exploitation continue et plus flexible.

- **Efficacité en Ressources :**

L'utilisation de l'eau lourde permet une meilleure utilisation des ressources nucléaires, et les réacteurs PHWR sont souvent considérés comme ayant un cycle du combustible plus efficace.

- **Complexité et Coûts :**

La production et la gestion de l'eau lourde sont plus coûteuses que celles de l'eau légère, augmentant les coûts d'infrastructure et d'exploitation des PHWR.

#### 4 -3 - 3 - Exemples et Utilisations

- **Canada (Réacteurs CANDU) :**

Les PHWR sont principalement associés au Canada, où la technologie CANDU (CANada Deuterium Uranium) est la plus avancée. Les réacteurs CANDU sont utilisés non seulement au Canada mais aussi exportés dans d'autres pays.

- **Inde :**

L'Inde utilise également des réacteurs PHWR et a développé sa propre version de ces réacteurs pour produire de l'électricité.

#### Conclusion

Les **Réacteurs à Eau Lourde sous Pression** sont une technologie éprouvée et fiable pour la production d'électricité nucléaire. Leur capacité à utiliser de l'uranium naturel et à être rechargés en ligne les rend particulièrement intéressants pour certains pays. Cependant, les coûts associés à la gestion de l'eau lourde et la complexité de leur conception nécessitent une expertise technique et des infrastructures appropriées.

#### 4 – 4 -- Réacteurs Graphite-Gaz (GCR et AGR)

Les Réacteurs Graphite-Gaz (GCR, de l'anglais Gas-Cooled Reactor) sont un type de réacteur nucléaire utilisant du gaz comme réfrigérant et du graphite comme modérateur. Ce type de réacteur a joué un rôle important dans le développement de l'énergie nucléaire, notamment en France et au Royaume-Uni. Voici une description détaillée de leur fonctionnement, de leurs caractéristiques et de leurs utilisations :

##### 4 – 4 – 1 - Fonctionnement d'un Réacteur Graphite-Gaz (GCR)

- **Modération et Réfrigération :**

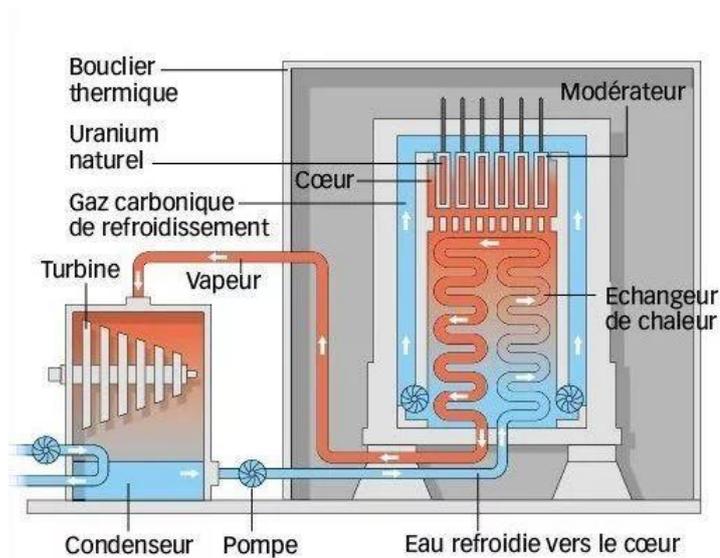
Le graphite est utilisé comme modérateur pour ralentir les neutrons rapides produits par la fission, augmentant ainsi l'efficacité de la réaction en chaîne.

Un gaz, généralement du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ou de l'hélium, est utilisé comme réfrigérant pour extraire la chaleur générée par la fission dans le combustible.

- **Modération et Réfrigération :**

Le graphite est utilisé comme modérateur pour ralentir les neutrons rapides produits par la fission, augmentant ainsi l'efficacité de la réaction en chaîne.

Un gaz, généralement du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ou de l'hélium, est utilisé comme réfrigérant pour extraire la chaleur générée par la fission dans le combustible



- **Modération et Réfrigération :**

Le graphite est utilisé comme modérateur pour ralentir les neutrons rapides produits par la fission, augmentant ainsi l'efficacité de la réaction en chaîne.

Un gaz, généralement du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) ou de l'hélium, est utilisé comme réfrigérant pour extraire la chaleur générée par la fission dans le combustible.

- **Circulation du Réfrigérant :**

Le gaz réfrigérant circule à travers le cœur du réacteur, passant autour des barres de combustible en graphite.

Le gaz chauffé par la réaction de fission transporte la chaleur hors du cœur du réacteur vers un échangeur de chaleur.

- **Échange de Chaleur :**

Dans l'échangeur de chaleur, la chaleur du gaz est transférée à un circuit secondaire contenant de l'eau, qui se transforme en vapeur.

- **Turbine et Générateur :**

La vapeur produite dans le circuit secondaire est utilisée pour entraîner une turbine, convertissant l'énergie thermique en énergie mécanique.

La turbine est connectée à un générateur qui transforme cette énergie mécanique en électricité.

**Condensation et Recirculation :**

Après avoir passé la turbine, la vapeur est condensée en eau et renvoyée dans l'échangeur de chaleur pour être chauffée à nouveau.

#### 4 – 4 – 2 - Caractéristiques des GCR

- **Utilisation de Combustible Naturel :**

Les premiers GCR utilisaient de l'uranium naturel, ce qui permettait de réduire les coûts liés à l'enrichissement de l'uranium.

- **Modérateur en Graphite :**

L'utilisation du graphite comme modérateur permet une bonne modération des neutrons et améliore l'efficacité du réacteur.

- **Réfrigérant Gazeux :**

Le gaz, tel que le CO<sub>2</sub> ou l'hélium, permet un transfert de chaleur efficace et n'absorbe pas les neutrons, minimisant les pertes de réactivité.

- **Sécurité :**

Les GCR sont conçus avec des systèmes de sécurité passifs et actifs pour garantir la sûreté du réacteur en cas d'incident.

#### 4 – 4- 3 Exemples et Utilisations

- **Royaume-Uni :**

Le Royaume-Uni a été un pionnier dans le développement des réacteurs GCR, avec les réacteurs Magnox et AGR (Advanced Gas-cooled Reactor).

Les réacteurs Magnox utilisaient de l'uranium non enrichi et du CO<sub>2</sub> comme réfrigérant.

Les AGR, qui sont une version avancée des GCR, utilisent de l'uranium légèrement enrichi et du CO<sub>2</sub> comme réfrigérant, offrant une meilleure efficacité et des performances améliorées.

- **France :**

La France a également développé et exploité des réacteurs GCR dans les années 1960 et 1970 avant de passer à la technologie des Réacteurs à Eau Pressurisée (PWR).

#### **Conclusion**

Les Réacteurs Graphite-Gaz représentent une technologie historique importante dans le développement de l'énergie nucléaire. Leur utilisation de l'uranium naturel et du graphite comme modérateur les rend uniques par rapport à d'autres types de réacteurs. Bien que leur utilisation soit moins répandue aujourd'hui en raison de l'émergence de technologies plus modernes et efficaces, ils ont contribué de manière significative aux progrès de l'énergie nucléaire et restent une partie importante de l'histoire du développement nucléaire. –

## 4 – 5 – Réacteurs à neutrons rapides ( FBR)

Les **réacteurs à neutrons rapides R NR (Fast Breeder Reactors, FBR)** sont un type de réacteur nucléaire qui utilise des neutrons rapides pour maintenir la réaction en chaîne. Contrairement aux réacteurs à neutrons thermiques, qui utilisent des modérateurs pour ralentir les neutrons, les FBR exploitent la haute énergie des neutrons rapides. Voici quelques caractéristiques et avantages des FBR :

### 4 – 5 – 1 - Caractéristiques des RNR

#### **Utilisation de Combustible :**

- **Combustible Fertile et Fissile :** Les FBR utilisent un mélange de matériaux fertiles (comme l'uranium-238) et de matériaux fissiles (comme le plutonium-239). Le plutonium-239 peut être produit dans le réacteur à partir de l'uranium-238 via la capture neutronique.
- **Efficacité de Combustible :** Les FBR sont capables de produire plus de combustible fissile qu'ils n'en consomment, d'où le terme "breeder" (éleveur).

#### **Refroidissement :**

- Métaux Liquides : Les FBR utilisent souvent des métaux liquides comme le sodium ou le plomb pour le refroidissement, car ces substances ne ralentissent pas les neutrons et ont de bonnes propriétés thermiques.
- Sécurité et Conception : L'utilisation de métaux liquides permet des conceptions de réacteurs à haute température et haute efficacité, mais nécessite aussi des mesures de sécurité rigoureuses à cause des propriétés chimiques et radioactives de ces substances.

#### **Cycle du Combustible :**

- Cycle Fermé : Les FBR sont bien adaptés pour un cycle du combustible fermé, où le combustible épuisé est retraité et réutilisé, réduisant ainsi les déchets radioactifs à long terme.

#### **Avantages des FBR**

- Ressources d'Uranium :
- Meilleure Utilisation de l'Uranium : Les FBR peuvent utiliser presque tout l'uranium-238, qui constitue la majorité de l'uranium naturel, ce qui permet une utilisation plus efficace des ressources mondiales en uranium.

#### **Réduction des Déchets :**

- Moins de Déchets à Vie Longue : En recyclant le plutonium et d'autres actinides, les FBR réduisent la quantité de déchets radioactifs à vie longue.

#### **Prolifération de Combustible :**

- Production de Plutonium : Bien que les FBR produisent du plutonium, le cycle fermé du combustible et les technologies avancées de sûreté peuvent limiter les risques de prolifération nucléaire.

#### **Défis et Inconvénients**

- Complexité Technique :
- Ingénierie Complexe : La conception et l'exploitation des FBR sont techniquement complexes et nécessitent des matériaux et des technologies avancées, ce qui peut augmenter les coûts de développement et d'exploitation.
- Problèmes de Sécurité :
- Risque de Métaux Liquides : Les refroidisseurs à métaux liquides, comme le sodium, peuvent être chimiquement réactifs (par exemple, le sodium réagit violemment avec l'eau et l'air), ce qui impose des défis supplémentaires en matière de sécurité.

#### **Exemples de Réacteurs FBR**

- Superphénix (France) : Un réacteur de démonstration de 1200 MWe, qui a fonctionné de 1986 à 1998.
- BN-600 et BN-800 (Russie) : Réacteurs en fonctionnement en Russie, avec le BN-800 étant l'un des réacteurs FBR les plus avancés actuellement en service.

#### **Conclusion**

Les réacteurs à neutrons rapides représentent une technologie avancée avec le potentiel de rendre l'énergie nucléaire plus durable et moins génératrice de déchets. Cependant, leur complexité technique et les défis en matière de sécurité et de prolifération

nécessitent des efforts continus en recherche et développement pour surmonter ces obstacles et réaliser leur plein potentiel.

## 4 – 6 – Réacteurs à sel Fondus

Les réacteurs à sels fondus (**Molten Salt Reactors, MSR**) sont une classe de réacteurs nucléaires qui utilisent des sels fondus comme fluide caloporteur et parfois comme combustible. Cette technologie présente plusieurs avantages en termes de sécurité, d'efficacité et de gestion des déchets nucléaires.

### 4 – 6 – 1 - Caractéristiques des Réacteurs à Sels Fondus

#### Combustible et Fluide Caloporteur :

- **Sels Fondus** : Les sels fondus, souvent des fluorures ou chlorures de métaux tels que le fluorure de lithium et le fluorure de béryllium, servent à la fois de fluide caloporteur et parfois de combustible.
- **Combustible Dissous** : Le combustible fissile (comme l'uranium, le thorium ou le plutonium) peut être dissous directement dans le sel fondu.

#### Cycle du Combustible :

- **Cycle du Thorium** : Les MSR sont particulièrement adaptés au cycle du thorium, où le thorium-232 est converti en uranium-233, un isotope fissile.
- **Flexibilité** : Les MSR peuvent fonctionner avec différents types de combustibles, y compris le thorium, l'uranium et les déchets nucléaires retraités.

#### Refroidissement :

- **Refroidissement par Sels Fondus** : Les sels fondus ont une excellente capacité thermique et peuvent fonctionner à des températures élevées (environ 500-1000°C) tout en restant à basse pression.

#### Sécurité Passive :

- **Conception Intrinsèquement Sûre** : Les MSR bénéficient de plusieurs caractéristiques de sécurité passive, telles que la vidange par gravité du combustible en cas de surchauffe dans un réservoir de sûreté.
- **Absence de Risque de Fusion du Noyau** : Comme le combustible est déjà à l'état liquide, il n'y a pas de risque de fusion du cœur tel qu'on le trouve dans les réacteurs à combustible solide.

#### Avantages des Réacteurs à Sels Fondus

- **Efficacité et Températures Élevées** :
- **Haute Efficacité Thermique** : Les températures de fonctionnement élevées améliorent l'efficacité thermodynamique, permettant une meilleure conversion de la chaleur en électricité.
- **Applications Industrielles** : Les températures élevées sont également utiles pour des applications industrielles, telles que la production d'hydrogène et la désalinisation.

#### Sécurité Améliorée :

- **Stabilité Chimique et Thermique** : Les sels fondus sont chimiquement stables et ont une grande capacité thermique, ce qui contribue à la stabilité du réacteur.
- **Réactivité Négative** : En cas de hausse de la température, la densité du combustible diminue, réduisant ainsi la réactivité et ralentissant la réaction en chaîne.

#### **Gestion des Déchets :**

- **Réduction des Déchets** : Les MSR peuvent brûler les actinides mineurs et d'autres déchets nucléaires, réduisant ainsi la quantité et la radioactivité des déchets à long terme.
- **Cycle Fermé** : La possibilité de retraitement en ligne du combustible permet de recycler efficacement les matières fissiles.

#### **Défis et Inconvénients**

##### **Corrosion et Matériaux :**

- **Corrosion des Matériaux** : Les sels fondus peuvent être corrosifs pour les matériaux de construction du réacteur, nécessitant le développement de matériaux résistants à la corrosion.
- **Développement Technologique** : Le développement de matériaux adaptés et de technologies de retraitement reste un défi.

##### **Complexité Technique :**

- **Ingénierie et Maintenance** : La conception et la maintenance des MSR sont techniquement complexes, en raison de la nature des sels fondus et des hautes températures de fonctionnement.

#### **Exemples et Développements Actuels**

- **MSRE (Molten-Salt Reactor Experiment)** : Un réacteur expérimental à sels fondus qui a fonctionné à Oak Ridge National Laboratory aux États-Unis dans les années 1960.
- **ThorCon** : Une entreprise développant des réacteurs à sels fondus utilisant du thorium.
- **Transatomic Power** : Une startup qui a proposé des concepts de réacteurs à sels fondus utilisant des combustibles recyclés et enrichis.

#### **Conclusion**

Les réacteurs à sels fondus offrent une technologie prometteuse pour l'avenir de l'énergie nucléaire, avec des avantages significatifs en termes de sécurité, d'efficacité et de gestion des déchets. Cependant, ils nécessitent encore des avancées technologiques et des investissements en recherche et développement pour surmonter les défis techniques et économiques associés à leur mise en œuvre.

## **5 – les réacteurs du futur**

Les réacteurs nucléaires du futur : **une promesse d'énergie plus propre et durable ?**

L'énergie nucléaire est souvent présentée comme une solution essentielle pour lutter contre le changement climatique, en produisant une électricité décarbonée et abondante. Face aux défis de l'épuisement des ressources en uranium et des déchets

radioactifs, la recherche se tourne vers des réacteurs nucléaires de nouvelle génération, prometteurs en termes de performance, de sûreté et de durabilité.

Quels sont les types de réacteurs nucléaires du futur ?

Plusieurs concepts de réacteurs de 4<sup>e</sup> génération sont en cours de développement, parmi lesquels :

- Les réacteurs à neutrons rapides (RNR): ils fonctionnent avec un combustible plus efficace, permettant de mieux valoriser l'uranium et de réduire la quantité de déchets radioactifs.
- Les réacteurs à sels fondus: le sel fondu remplace l'eau comme liquide de refroidissement, offrant une meilleure sécurité et la possibilité de fonctionner à des températures plus élevées.
- Les réacteurs à très haute température (RTHT): ils produiraient de la chaleur à très haute température, utilisable pour des applications industrielles comme la production d'hydrogène.
- Les réacteurs modulaires immergés: de petits réacteurs immergés dans des piscines de sel fondu, plus modulables et transportables.

Quels sont les avantages et les défis de ces réacteurs ?

**Avantages potentiels:**

- Meilleure efficacité énergétique: production d'électricité plus importante à partir d'une même quantité d'uranium.
- Réduction des déchets radioactifs: incinération de transuraniens et production de déchets moins radioactifs à vie plus courte.
- Sûreté accrue: conceptions innovantes visant à minimiser les risques d'accidents.
- Flexibilité et adaptabilité: certains concepts modulaires et adaptables à différents besoins.

**Défis à relever:**

- Développement technologique: les prototypes nécessitent des investissements importants en recherche et développement.
- Coûts de construction: incertitude sur les coûts de construction et de maintenance des nouvelles technologies.
- Acceptation du public: surmonter les réticences liées aux risques et aux déchets nucléaires.
- Cadre réglementaire: adaptation des réglementations aux nouvelles technologies.

**Quel avenir pour les réacteurs nucléaires du futur ?**

Les réacteurs nucléaires de **4<sup>e</sup> génération** (GEN 4) ont le potentiel de contribuer à une production d'énergie plus durable et décarbonée. Cependant, leur développement et leur déploiement à grande échelle nécessitent des efforts importants en matière de recherche, d'innovation et d'investissement.

La décision de leur mise en œuvre dépendra de plusieurs facteurs, tels que l'évolution des coûts, l'acceptation du public, les progrès technologiques et les politiques énergétiques des différents pays.

En France, **le plan France 2030** vise à relancer la filière nucléaire en investissant dans la recherche et le développement de ces nouveaux réacteurs. L'objectif est de construire un prototype d'ici 2035 et de déployer des réacteurs de 4e génération à partir de **2040**.

### **5 – 1 – Présentation du réacteur à Gaz Rapide ( GFR)**

Le réacteur à gaz rapide (GFR, pour Gas-cooled Fast Reactor) est une technologie de réacteur nucléaire avancée qui fait partie des concepts de réacteurs de quatrième génération. Ce type de réacteur utilise du gaz comme fluide caloporteur (souvent de l'hélium) et fonctionne avec un spectre neutronique rapide (**RNR**), ce qui signifie que les neutrons produits par la fission ne sont pas modérés (ralentis).

#### **Caractéristiques principales du GFR :**

##### **1 - Refroidissement au gaz :**

- Utilise généralement de l'hélium comme fluide caloporteur en raison de ses propriétés inertes, de sa haute conductivité thermique et de sa faible densité.
- Permet des températures de fonctionnement élevées, souvent supérieures à 800 °C, ce qui améliore l'efficacité thermodynamique et ouvre la possibilité d'applications industrielles comme la production d'hydrogène.

##### **2 - Spectre neutronique rapide :**

- Utilise des neutrons rapides, ce qui permet une utilisation plus efficace du combustible nucléaire.
- Capable de brûler un large éventail de combustibles, y compris des combustibles MOX (mélange d'oxydes) et des déchets nucléaires, contribuant ainsi à la réduction des déchets radioactifs de longue durée de vie.

##### **3 - Sécurité intrinsèque :**

- Conception inclut des systèmes de sécurité passifs qui ne nécessitent pas d'intervention humaine ou de systèmes actifs pour fonctionner en cas d'urgence.
- Les caractéristiques du fluide caloporteur (gaz) permettent une meilleure gestion des accidents de perte de réfrigérant.

##### **4 - Cycle du combustible :**

- Favorise le recyclage du combustible et la fermeture du cycle du combustible, ce qui améliore la durabilité et la gestion des ressources.
- Peut potentiellement utiliser le thorium en plus de l'uranium et du plutonium.

##### **5 -Avantages :**

- Efficacité énergétique : Les hautes températures de fonctionnement améliorent l'efficacité thermique.

- Flexibilité du combustible : Capable de consommer divers types de combustibles nucléaires.
- **Réduction des déchets** : Potentiel pour réduire la quantité et la radiotoxicité des déchets nucléaires.
- Sécurité améliorée : Utilisation de systèmes de sécurité passifs et résistance aux accidents.

#### 6 - Défis :

- Développement technologique : La technologie est encore en phase de recherche et développement, avec des défis techniques à surmonter pour les matériaux et les systèmes de refroidissement.
- Coûts initiaux : Les coûts de développement et de construction peuvent être élevés en raison de la complexité et des exigences de sécurité accrues.
- Acceptation publique et régulation : Nécessite une acceptation sociale et un cadre réglementaire adapté pour sa mise en œuvre.

Le développement des réacteurs GFR est **encore en cours**, avec des projets pilotes et des recherches continues visant à surmonter les défis techniques et à démontrer la viabilité de cette technologie pour une utilisation commerciale future. Ces réacteurs représentent une voie prometteuse pour l'avenir de l'énergie nucléaire, offrant des solutions potentielles aux enjeux actuels de durabilité, d'efficacité énergétique et de gestion des déchets.

## 5 – 2 - Reacteur du futur – neutrons rapides -SFR

Le réacteur à neutrons rapides (**RNR-Na**) refroidi au sodium (**SFR**, pour Sodium-cooled Fast Reactor) est une technologie avancée de réacteur nucléaire faisant partie des concepts de la **quatrième génération**. Les réacteurs SFR utilisent du sodium liquide comme fluide caloporteur et exploitent un spectre neutronique rapide, ce qui présente plusieurs avantages en termes d'efficacité du combustible et de gestion des déchets nucléaires.

### Caractéristiques principales du SFR :

#### 1 - Refroidissement au sodium :

- Utilise du sodium liquide comme fluide caloporteur en raison de sa haute conductivité thermique et de sa capacité à fonctionner à des températures élevées sans pressurisation significative.
- Permet des températures de fonctionnement élevées, typiquement autour de 550 à 600 °C, ce qui améliore l'efficacité thermodynamique.

#### 2- Spectre neutronique rapide :

- Fonctionne avec des neutrons rapides, ce qui permet de mieux utiliser le combustible nucléaire et de brûler des actinides mineurs et d'autres déchets nucléaires à longue durée de vie.
- Capable d'utiliser des combustibles variés, y compris des combustibles MOX (mélange d'oxydes) et des combustibles métalliques.

#### 3 - Cycle du combustible fermé :

- Favorise le recyclage du combustible nucléaire, ce qui permet de réduire la quantité de déchets à haute activité et de récupérer des matières fissiles précieuses.
- Possibilité de régénérer du combustible fissile (plutonium) à partir de l'uranium appauvri ou du thorium.

#### 4 - Sécurité intrinsèque :

- Conception inclut des systèmes de sécurité passifs, comme la capacité de refroidissement naturel par convection en cas de perte de puissance.
- Le sodium a une capacité calorifique élevée et une bonne conductivité thermique, ce qui aide à évacuer la chaleur résiduelle efficacement.

#### 5 - Avantages :

- Efficacité du combustible : Utilisation plus complète du combustible nucléaire, réduisant les besoins en uranium naturel.
- Réduction des déchets : Capacité à transmuter et à réduire les déchets nucléaires à longue durée de vie.
- Sécurité passive : Conception de sécurité qui permet une réponse automatique en cas de défaillance des systèmes actifs.
- Cycle du combustible : Fermeture du cycle du combustible, ce qui diminue la nécessité de nouvelles mines d'uranium et réduit les déchets.

#### 6 - Défis :

- Réactivité chimique du sodium : Le sodium réagit fortement avec l'eau et l'air, ce qui nécessite des précautions supplémentaires en termes de conception et de maintenance pour éviter les accidents.
- Technologie et coûts : Développement de matériaux résistants à la corrosion par le sodium et aux températures élevées, ainsi que les coûts initiaux de développement et de construction.
- Acceptation publique et régulation : Besoin de régulations strictes et d'une acceptation publique en raison des risques associés au sodium et des questions de gestion des déchets.

#### 7 - Projets et développements :

Plusieurs pays travaillent sur le développement des réacteurs SFR, dont la France avec le projet **ASTRID** (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration), les États-Unis avec des projets tels que le réacteur **PRISM** de GE Hitachi, et la Russie avec ses réacteurs **BN-600** et **BN-800** en fonctionnement. Ces projets visent à démontrer la faisabilité technique et économique de cette technologie pour une utilisation commerciale future.

Les réacteurs SFR représentent une voie prometteuse pour l'avenir de l'énergie nucléaire, offrant des solutions pour améliorer l'efficacité du combustible, réduire les déchets et augmenter la sécurité des centrales nucléaires.

## 5 – 3 – Réacteur du futur LFR

Le réacteur rapide refroidi au plomb (**HNH -Pb**)(**LFR**, pour **Lead-cooled Fast Reactor**) est une technologie avancée de réacteur nucléaire de quatrième génération. Ce type de réacteur utilise du plomb ou un alliage de plomb et de bismuth comme fluide caloporteur et fonctionne avec un spectre neutronique rapide, offrant plusieurs avantages en termes de sécurité, de durabilité et de gestion des déchets nucléaires.

### **Caractéristiques principales du LFR :**

#### **1 - Refroidissement au plomb :**

- Utilise du plomb liquide ou un alliage plomb-bismuth comme fluide caloporteur, en raison de leur stabilité chimique, de leur haute densité et de leur capacité à fonctionner à des températures élevées sans nécessiter de pressurisation significative.
- Permet des températures de fonctionnement élevées, souvent entre 450 et 800 °C, ce qui améliore l'efficacité thermodynamique et ouvre la possibilité d'applications industrielles comme la production d'hydrogène.

#### **2 - Spectre neutronique rapide :**

- Fonctionne avec des neutrons rapides, ce qui permet une utilisation plus efficace du combustible nucléaire et la possibilité de brûler des actinides mineurs et d'autres déchets nucléaires à longue durée de vie.
- Peut utiliser divers types de combustibles, y compris les combustibles MOX (mélange d'oxydes), les combustibles métalliques et les déchets nucléaires retraités.

#### **3 - Cycle du combustible fermé :**

- Favorise le recyclage du combustible nucléaire, permettant de réduire la quantité de déchets à haute activité et de récupérer des matières fissiles précieuses.
- Capable de régénérer du combustible fissile (plutonium) à partir de l'uranium appauvri ou du thorium.

#### **4 - Sécurité intrinsèque :**

- Le plomb a une haute capacité calorifique et une bonne conductivité thermique, ce qui aide à évacuer la chaleur résiduelle efficacement.
- Le réacteur peut être conçu pour fonctionner avec des systèmes de sécurité passifs, réduisant la dépendance aux systèmes actifs et aux interventions humaines en cas d'urgence.

#### **5 - Avantages :**

- Sécurité améliorée : Le plomb liquide ne réagit pas violemment avec l'eau ou l'air, réduisant ainsi les risques d'accidents chimiques.
- Haute température de fonctionnement : Les températures élevées améliorent l'efficacité thermodynamique et offrent des possibilités pour des applications industrielles.
- Gestion des déchets : Capacité à brûler des déchets nucléaires et à réduire la radiotoxicité des déchets à longue durée de vie.

- Durabilité du combustible : Utilisation plus complète du combustible nucléaire, réduisant les besoins en uranium naturel et permettant la régénération du combustible fissile.

#### 6 - Défis :

- Technologie des matériaux : Le plomb est corrosif pour certains matériaux à haute température, nécessitant des recherches sur des matériaux résistants à la corrosion.
- Densité et masse : Le plomb est très dense, ce qui peut poser des défis en termes de conception et de manipulation du réacteur.
- Coût et développement : Les coûts initiaux de développement et de construction peuvent être élevés en raison des défis technologiques et des exigences de sécurité.

#### 7 - Projets et développements :

Plusieurs pays et organisations travaillent sur le développement des réacteurs LFR, parmi lesquels :

- Russie : Avec le projet BREST (Bystry Reaktor so Svintsovym Teplonositelem), un prototype de réacteur rapide refroidi au plomb.
- Europe : Le projet ALFRED (Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator) vise à démontrer la faisabilité de cette technologie en Europe.
- États-Unis : Les initiatives comme le projet SSTAR (Small, Sealed, Transportable, Autonomous Reactor) explorent les possibilités de réacteurs LFR compacts et transportables.

Les réacteurs LFR représentent une option prometteuse pour l'avenir de l'énergie nucléaire, offrant des solutions pour améliorer la sécurité, l'efficacité du combustible et la gestion des déchets nucléaires, tout en explorant de nouvelles applications industrielles grâce à leurs capacités de fonctionnement à haute température.

### 5 – 4 -Réacteur à très haute température (VHTR)

Les réacteurs nucléaires à très haute température (**VHTR, pour Very High Temperature Reactors**) représentent une avancée significative dans la technologie des réacteurs de quatrième génération. Ces réacteurs se distinguent par leur capacité à fonctionner à des températures beaucoup plus élevées que les réacteurs nucléaires conventionnels, généralement au-dessus de 1000°C, contre environ 300°C pour les réacteurs à eau pressurisée actuels. Voici quelques points clés concernant les VHTR :

#### Caractéristiques des VHTR

**1-Température de fonctionnement élevée** : Les VHTR sont conçus pour atteindre des températures de l'ordre de 1000°C, ce qui permet une meilleure efficacité thermique et la possibilité d'utiliser la chaleur pour des applications industrielles en plus de la production d'électricité.

**2 - Combustible et modérateur** : Ils utilisent souvent du combustible à base de particules de carbure de silicium enrobées, connu sous le nom de TRISO (TRi-structural

ISOtropic), qui offre une excellente résistance aux hautes températures et aux radiations. Le modérateur utilisé est généralement le graphite.

**3- Le refroidissement** est assuré par un gaz, généralement de l'hélium, qui est chimiquement inerte et n'absorbe pas les neutrons, permettant ainsi un meilleur rendement neutronique.

#### **Avantages des VHTR**

- Efficacité thermique élevée : Grâce aux températures élevées, les VHTR peuvent atteindre des rendements thermiques de 50% ou plus, comparés aux 33-37% des réacteurs à eau pressurisée.
- Hydrogène et applications industrielles : La chaleur à haute température des VHTR peut être utilisée pour produire de l'hydrogène par thermolyse ou pour des procédés industriels nécessitant de la chaleur intense.
- Sécurité intrinsèque : Les VHTR bénéficient de caractéristiques de sûreté passive. Le TRISO offre une barrière physique contre la libération de produits de fission, même en cas de défaillance du système de refroidissement.

#### **Défis et développements**

- Matériaux : Le développement de matériaux capables de résister à des températures très élevées et à des environnements radiatifs est crucial.
- Économie : Les coûts de développement et de construction des VHTR peuvent être élevés en raison des matériaux avancés et des technologies nécessaires.
- Gestion des déchets : Bien que les VHTR produisent moins de déchets à long terme que les réacteurs conventionnels, la gestion des déchets reste un enjeu crucial.

#### **Projets et recherche en cours**

De nombreux projets de recherche et prototypes sont en cours dans le monde entier pour tester et améliorer la technologie des VHTR. Par exemple :

- HTTR (High-Temperature Engineering Test Reactor) au Japon : Un prototype opérationnel visant à démontrer les capacités de la technologie.
- Réacteurs de démonstration en Chine et aux États-Unis : Divers programmes de développement et de test sont en cours pour valider la faisabilité des VHTR à grande échelle.

#### **Conclusion**

Les réacteurs à très haute température représentent une voie prometteuse pour l'avenir de l'énergie nucléaire, offrant des avantages significatifs en termes d'efficacité et de polyvalence. Cependant, de nombreux défis technologiques et économiques doivent encore être relevés avant qu'ils ne puissent être déployés à grande échelle.

## **5 – 5 – Réacteur du Futur - SCWR**

**Les réacteurs nucléaires à refroidissement par eau supercritique (SCWR, pour SuperCritical Water Reactors)** sont une autre technologie prometteuse de la

quatrième génération de réacteurs nucléaires. Ils se distinguent par l'utilisation de l'eau à l'état supercritique comme fluide de refroidissement, ce qui permet d'atteindre des rendements thermiques plus élevés que ceux des réacteurs actuels. Voici un aperçu des caractéristiques, avantages, défis et développements liés aux SCWR :

## Caractéristiques des SCWR

**1 - Température et pression de fonctionnement :** Les SCWR fonctionnent à des températures de l'ordre de 510°C et à des pressions supérieures à 22,1 MPa (la pression critique de l'eau). À ces conditions, l'eau passe à l'état supercritique, ce qui signifie qu'il n'y a pas de distinction entre la phase liquide et la phase gazeuse.

**2 - Cycle de Rankine à haute efficacité :** Les SCWR utilisent un cycle thermodynamique semblable à celui des centrales thermiques classiques, mais avec un rendement amélioré grâce à l'utilisation de l'eau supercritique.

**3\_ Conception du cœur du réacteur :** Le cœur des SCWR est conçu pour optimiser le transfert de chaleur et la modération des neutrons. La conception peut varier entre des configurations à neutrons thermiques ou rapides.

## Avantages des SCWR

- Efficacité thermique accrue : Les SCWR peuvent atteindre des rendements thermiques de l'ordre de 45%, comparés aux 33-37% des réacteurs à eau pressurisée (PWR) et des réacteurs à eau bouillante (BWR).
- Simplification du système : L'élimination de la phase de changement d'état (ébullition/condensation) simplifie la conception et le fonctionnement des systèmes de refroidissement.
- Réduction des coûts : Les SCWR peuvent potentiellement réduire les coûts de construction et d'exploitation grâce à une conception plus simple et une efficacité accrue.

## Défis des SCWR

- Matériaux résistants aux conditions extrêmes : Les conditions de température et de pression élevées nécessitent le développement de nouveaux matériaux capables de résister à la corrosion et aux contraintes mécaniques prolongées.
- Gestion de la chaleur et de la sûreté : La gestion de la chaleur à de telles températures et pressions pose des défis significatifs pour assurer la sûreté du réacteur en cas d'incident.
- Développement technologique : De nombreux aspects techniques et de sécurité doivent être résolus avant que les SCWR puissent être déployés commercialement.

## Développements et projets en cours

Plusieurs programmes de recherche et de développement sont en cours pour explorer et tester la faisabilité des SCWR :

- Projet SCWR de la Génération IV International Forum (GIF) : Cette initiative internationale regroupe plusieurs pays travaillant ensemble pour développer les technologies de réacteurs de quatrième génération, y compris les SCWR.
- Développements au Canada et en Europe : Divers laboratoires et institutions travaillent sur des prototypes et des tests de matériaux pour les SCWR, notamment l'Atomic Energy of Canada Limited (AECL) et des consortiums européens.

### **Conclusion**

Les réacteurs à refroidissement par eau supercritique représentent une option attrayante pour l'avenir de l'énergie nucléaire en raison de leur efficacité accrue et de leur potentiel de réduction des coûts. Cependant, des défis significatifs en matière de matériaux et de sûreté doivent encore être relevés. Les efforts de recherche et de développement en cours sont cruciaux pour surmonter ces obstacles et permettre le déploiement de cette technologie prometteuse.

## **5 - 7 – Réacteur EPR-**

Le réacteur EPR (European Pressurized Reactor), également connu sous le nom de réacteur pressurisé européen, est un type avancé de réacteur nucléaire à eau pressurisée (PWR). Développé par Framatome (anciennement Areva NP) et Siemens, l'EPR est conçu pour offrir une sécurité accrue, une meilleure efficacité et une plus grande durabilité par rapport aux réacteurs nucléaires de générations précédentes.

### **5 – 7 – 1 - Conception et Caractéristiques**

#### **1 - Sécurité Renforcée :**

- **Système de Sécurité Redondant :** L'EPR intègre plusieurs systèmes de sécurité redondants et diversifiés pour prévenir et gérer les accidents. Cela inclut des systèmes de refroidissement de secours et des systèmes d'injection de sécurité.
- **Cœur du Réacteur :** Le cœur de l'EPR est conçu pour résister à des températures extrêmement élevées, avec des mécanismes pour empêcher la fusion du cœur en cas de défaillance des systèmes de refroidissement.
- **Double Enceinte de Confinement :** Le réacteur est équipé d'une double enceinte de confinement pour prévenir toute fuite de radioactivité en cas d'accident. La première enceinte contient le réacteur lui-même, tandis que la seconde agit comme une barrière supplémentaire.

#### **2 - Efficacité et Durabilité :**

- **Efficacité Améliorée :** L'EPR est conçu pour avoir un rendement thermique supérieur à celui des réacteurs de générations précédentes, produisant environ 1650 MW d'électricité, soit environ 36% de plus que les réacteurs de type PWR de génération II.
- **Utilisation du Combustible :** L'EPR utilise du combustible nucléaire de manière plus efficace, avec une meilleure combustion des pastilles de combustible, ce qui réduit la quantité de déchets nucléaires produits.

- **Durée de Vie :** La durée de vie opérationnelle de l'EPR est prévue pour être d'environ 60 ans, contre 40 ans pour de nombreux réacteurs plus anciens.

## **5 – 7 – 2 - Projets et Développements**

### **1 - Flamanville 3 (France) :**

- Le réacteur EPR de Flamanville, situé en Normandie, a rencontré plusieurs retards et dépassements de coûts depuis le début de sa construction en 2007. Initialement prévu pour être opérationnel en 2012, il devrait entrer en service d'ici 2024.
- Les retards ont été causés par divers problèmes techniques et réglementaires, ainsi que des défis liés à la construction et à la soudure des composants critiques.

### **2 - Olkiluoto 3 (Finlande) :**

- Le réacteur EPR d'Olkiluoto en Finlande a également connu des retards importants. Commencé en 2005, il était initialement prévu pour démarrer en 2009, mais n'a été connecté au réseau électrique qu'en 2022.
- Les problèmes rencontrés incluent des difficultés avec la gestion des sous-traitants et des problèmes techniques similaires à ceux de Flamanville.

### **3 - Taishan 1 et 2 (Chine) :**

- Contrairement aux projets en Europe, les deux réacteurs EPR de Taishan en Chine ont été construits avec moins de retards. Taishan 1 est devenu le premier EPR à entrer en exploitation commerciale en décembre 2018, suivi par Taishan 2 en septembre 2019.

Les réacteurs de Taishan démontrent que, sous certaines conditions, l'EPR peut être construit et mis en service de manière plus efficace.

## **5 – 7 – 3 -Défis et Critiques**

### **1 - Coût et Retards :**

Les dépassements de coûts et les retards de construction ont été une source majeure de critiques. Les budgets initiaux de plusieurs projets EPR ont été largement dépassés, mettant en question la viabilité économique de cette technologie.

### **2 -Complexité Technique :**

La complexité technique des EPR, bien que conçue pour améliorer la sécurité et l'efficacité, a posé des défis significatifs en termes de construction et de mise en service.

## **5– 7 – 4 -Perspectives d'Avenir**

### **1 Potentiel de Réduction des Coûts :**

- Avec l'expérience acquise sur les premiers projets, il est possible que les coûts de construction et les délais soient réduits pour les futurs réacteurs EPR.

### **2\_ Demande Croissante d'Énergie Propre :**

- En réponse à la demande croissante d'énergie décarbonée et aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, les EPR pourraient jouer un rôle clé dans le mix énergétique mondial.

### 3 - Améliorations Technologiques :

- Des améliorations continues et des leçons tirées des premiers réacteurs EPR pourraient rendre cette technologie plus attractive pour les nouveaux projets nucléaires.

**En conclusion**, le réacteur EPR représente une avancée significative dans la technologie des réacteurs nucléaires, malgré les défis rencontrés. Sa conception vise à répondre aux exigences croissantes en matière de sécurité, d'efficacité et de durabilité, en faisant potentiellement un acteur clé dans la transition énergétique mondiale.

## 5 – 8 - ITER

Le réacteur ITER (**I**nternational **T**hermonuclear **E**xperimental **R**eactor) est l'un des projets les plus ambitieux et les plus avancés dans le domaine de la recherche sur la fusion nucléaire. Situé à Cadarache, en France, ITER vise à démontrer la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion, une source potentiellement illimitée et propre d'énergie.

### 5 – 8 - 1 Contexte et Objectifs

- **But de l'ITER** : Le principal objectif de l'ITER est de produire un plasma de fusion capable de générer plus d'énergie qu'il n'en consomme, un exploit encore jamais réalisé à grande échelle. Le projet vise à produire 500 MW de puissance de fusion avec une entrée de seulement 50 MW, obtenant ainsi un facteur de gain énergétique de 10.
- **Principe de la Fusion** : La fusion nucléaire consiste à combiner des noyaux d'hydrogène pour former un noyau plus lourd, libérant ainsi une grande quantité d'énergie. Cela contraste avec la fission nucléaire, utilisée dans les réacteurs nucléaires actuels, qui divise des noyaux lourds en noyaux plus légers.

### 5 – 8 – 2 - Technologie et Construction

- **Tokamak** : ITER utilise un dispositif appelé tokamak, une chambre en forme de tore (donut) où un plasma de deutérium et de tritium (isotopes de l'hydrogène) est confiné par de puissants champs magnétiques. Ce confinement permet d'atteindre les températures et pressions nécessaires pour la fusion.
- **Aimants Supraconducteurs** : Les champs magnétiques nécessaires sont générés par des aimants supraconducteurs, refroidis à des températures extrêmement basses (environ -269°C) pour minimiser les pertes d'énergie.
- **Construction et Collaboration** : La construction d'ITER est un effort international impliquant 35 pays, dont les membres de l'Union européenne, les États-Unis, la Russie, la Chine, l'Inde, le Japon et la Corée du Sud. Chaque pays contribue à la fois financièrement et par la fourniture de composants.

### 5– 8 - 3 - Défis et Avancées

- **Défis Techniques** : Le projet rencontre de nombreux défis, notamment la gestion des matériaux à haute température, la maintenance des composants dans un environnement radioactif, et la gestion du plasma instable.
- **Avancées Récentes** : Malgré les défis, ITER a fait des progrès significatifs. En 2020, la première pièce du tokamak, une chambre de 1 250 tonnes, a été mise en place. Les tests des systèmes de refroidissement et des aimants supraconducteurs ont également montré des résultats prometteurs.

### 5 – 8 -4 -Implications Futures

- **Impact Énergétique** : Si ITER réussit, il ouvrira la voie à des réacteurs de fusion commerciaux, offrant une source d'énergie propre et presque illimitée. Cela pourrait jouer un rôle crucial dans la transition énergétique mondiale, réduisant la dépendance aux combustibles fossiles et contribuant à la lutte contre le changement climatique.
- **Recherche et Développement** : Le succès d'ITER stimulera également la recherche dans des domaines connexes, tels que la science des matériaux, la cryogénie, et la physique des plasmas, avec des retombées potentielles dans d'autres industries.

**En conclusion**, ITER représente un effort monumental pour atteindre un objectif qui pourrait transformer notre approche de l'énergie. Bien que des défis importants restent à surmonter, les avancées réalisées jusqu'à présent montrent que ce projet ambitieux est sur la bonne voie pour prouver que la fusion nucléaire est une solution viable pour l'avenir énergétique de la planète.

## 6 – Développement de prototypes

### 6 – 1 - ALLEGRO

Le réacteur nucléaire expérimental ALLEGRO est un projet ambitieux visant à développer un réacteur de quatrième génération, spécifiquement un réacteur rapide au gaz (GFR - Gas-cooled Fast Reactor). Ce type de réacteur utilise du gaz (comme l'hélium) comme caloporteur pour refroidir le cœur du réacteur, ce qui présente plusieurs avantages en termes de sécurité et d'efficacité.

#### 6 – 1 – 1 - Objectifs du projet ALLEGRO

- **Développement de la technologie GFR**: ALLEGRO est conçu pour démontrer la faisabilité technique des réacteurs rapides refroidis au gaz. Ce type de réacteur peut potentiellement offrir une meilleure utilisation du combustible nucléaire et réduire les déchets radioactifs.
- **Sécurité améliorée**: En utilisant un gaz comme caloporteur, les réacteurs GFR sont moins susceptibles de subir des pertes de refroidissement critiques par rapport aux réacteurs utilisant de l'eau, améliorant ainsi la sécurité opérationnelle.

- **Efficacité du combustible:** Les réacteurs rapides peuvent utiliser des combustibles plus diversifiés et sont capables de recycler les combustibles usés, ce qui augmente la durabilité des ressources nucléaires.

#### 6 - 1 - 2 - Caractéristiques Techniques

- **Cœur du réacteur:** Le cœur est constitué de combustible enrichi capable de fonctionner à des températures très élevées, ce qui est rendu possible grâce à l'utilisation de l'hélium comme caloporteur.
- **Température de fonctionnement:** Les réacteurs GFR peuvent atteindre des températures très élevées, permettant une meilleure efficacité thermique et la possibilité de produire de l'hydrogène.
- **Cycle du combustible:** Le réacteur est conçu pour utiliser un cycle fermé du combustible, maximisant l'utilisation du plutonium et des actinides mineurs, réduisant ainsi les déchets de haute activité à long terme.

#### 6 - 1 - 3 - Développement et Partenariats

Le projet ALLEGRO est développé en collaboration par plusieurs pays européens, notamment la France, la Slovaquie, la Hongrie et la République Tchèque, sous l'égide du Forum International Génération IV (GIF).

#### 6 - 1 - 4 - Enjeux et Défis

- **Technologie de pointe:** La conception et la construction de réacteurs GFR nécessitent des avancées significatives dans les matériaux, notamment ceux capables de résister à des températures élevées et à des conditions de radiation intense.
- **Sécurité:** Bien que le refroidissement au gaz offre des avantages, il présente aussi des défis en termes de gestion des fuites et de la maintenance du réacteur.
- **Acceptation publique et réglementation:** Comme pour toute technologie nucléaire, l'acceptation par le public et la conformité aux réglementations strictes sont cruciales pour le succès du projet.

#### 6 - 1 - 5 - Perspectives

Le projet ALLEGRO représente une étape importante vers l'innovation et l'amélioration de la technologie nucléaire, visant à offrir des solutions plus sûres et plus efficaces pour la production d'énergie. Il est un exemple de collaboration internationale en matière de recherche et développement dans le domaine de l'énergie nucléaire.

**En conclusion,** ALLEGRO est un projet clé pour l'avenir de l'énergie nucléaire, cherchant à démontrer les avantages des réacteurs rapides refroidis au gaz et à contribuer à un avenir énergétique plus durable et sécurisé.

### 6 - 2 - Projet ASTRID

Le réacteur prototype ASTRID (**Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration**) est un **projet français** de réacteur à neutrons rapides

refroidi au sodium (SFR - Sodium-cooled Fast Reactor), développé par le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) en collaboration avec plusieurs partenaires industriels et internationaux. Ce projet s'inscrit dans le cadre des réacteurs de quatrième génération, visant à améliorer la sûreté, l'efficacité et la durabilité de l'énergie nucléaire.

#### 6 – 2 – 1 - Objectifs du projet ASTRID

- **Démonstration technologique:** ASTRID a été conçu pour démontrer la faisabilité technologique et industrielle des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium. Il vise à valider les concepts et les innovations nécessaires pour ce type de réacteur.
- **Sûreté améliorée:** Le réacteur incorpore des avancées significatives en matière de sûreté, avec des systèmes passifs de refroidissement et des concepts de cœur visant à réduire les risques d'accidents graves.
- **Gestion du combustible:** ASTRID est conçu pour utiliser des combustibles mixtes oxyde (MOX) et pour recycler les déchets nucléaires, réduisant ainsi la quantité de déchets de haute activité à long terme et maximisant l'utilisation des ressources en uranium.
- **Durabilité:** En utilisant un cycle fermé du combustible, ASTRID vise à rendre le cycle nucléaire plus durable en permettant la réutilisation du plutonium et des actinides mineurs, contribuant à une gestion plus efficace des ressources nucléaires.

#### 6 – 2 – 2 - Caractéristiques Techniques

- **Refroidissement au sodium:** Le sodium liquide est utilisé comme caloporteur en raison de ses excellentes propriétés thermiques et de sa capacité à fonctionner à des températures élevées sans pressurisation.
- **Puissance:** ASTRID était prévu pour avoir une puissance électrique de 600 MWe, faisant de lui un prototype de taille industrielle.
- **Cœur du réacteur:** Le cœur est conçu pour accueillir du combustible MOX et est optimisé pour la transmutation des actinides mineurs, contribuant ainsi à la réduction des déchets à longue durée de vie.
- **Systèmes de sûreté:** Intégration de systèmes de sûreté passifs et actifs, y compris des dispositifs pour le refroidissement d'urgence et des mécanismes de contrôle pour éviter la surchauffe.

#### 6 – 2 – 3 - Développement et Partenariats

Le projet ASTRID a impliqué une coopération entre le CEA, des entreprises françaises comme EDF et Areva (devenu Orano), ainsi que des partenaires internationaux. Il fait partie des efforts de la France pour rester à la pointe de la technologie nucléaire et répondre aux défis énergétiques futurs.

#### 6 – 2 - 4 -Enjeux et Défis

- **Complexité technologique:** La conception et la construction de réacteurs refroidis au sodium nécessitent des technologies avancées et une expertise particulière en raison des propriétés chimiques et physiques du sodium.
- **Coûts:** Les investissements nécessaires pour développer et construire un prototype de cette envergure sont significatifs, avec des incertitudes liées aux coûts de développement et de construction.
- **Sûreté et acceptation publique:** Comme pour tous les projets nucléaires, la sûreté est primordiale, et l'acceptation publique reste un défi, notamment en raison des incidents passés liés à l'utilisation du sodium.

#### 6 – 2 – 5 - Perspectives

Le projet ASTRID a été mis en pause en 2019 en raison de contraintes budgétaires et de réorientations stratégiques. Cependant, les recherches et les développements réalisés dans le cadre de ce projet continuent de contribuer à l'avancement des technologies de réacteurs rapides et à la réflexion sur l'avenir de l'énergie nucléaire.

**En conclusion**, bien que le projet ASTRID soit actuellement en pause, il représente un jalon important dans la recherche et le développement des réacteurs nucléaires de quatrième génération, avec des objectifs ambitieux en matière de sûreté, d'efficacité et de gestion durable des ressources nucléaires.

#### 6 – 3 – reacteur SMR NUWARD

Le réacteur nucléaire Small Modular Reactor (SMR) NUWARD est un projet développé par le groupe français EDF (Électricité de France), en collaboration avec plusieurs partenaires industriels et institutionnels. Le concept de NUWARD vise à offrir une solution de production d'énergie nucléaire plus flexible, sécurisée et adaptée aux besoins énergétiques actuels et futurs. Voici un aperçu de ses caractéristiques et avantages :

##### 6 – 3 – 1 - Caractéristiques du NUWARD

- **Modularité :** Comme tous les SMR, le NUWARD est conçu pour être fabriqué en usine et transporté sur site en modules. Cela permet une construction plus rapide et plus économique par rapport aux réacteurs traditionnels de grande taille.
- **Capacité :** Le NUWARD est conçu pour une capacité de production d'environ 340 MW, ce qui est suffisant pour fournir de l'électricité à une ville de taille moyenne. Ce format intermédiaire le rend adapté pour des applications industrielles ou pour renforcer des réseaux électriques régionaux.
- **Sécurité :** Le NUWARD intègre des avancées en matière de sûreté nucléaire, avec des systèmes de sécurité passifs qui fonctionnent sans intervention humaine en cas d'urgence. Ces systèmes améliorent la résilience et la sécurité globale du réacteur.
- **Flexibilité :** Le design modulaire permet une installation progressive, en ajoutant des modules supplémentaires selon les besoins énergétiques

croissants. Cela réduit également les coûts initiaux d'investissement par rapport à un réacteur de grande taille.

- **Déploiement rapide** : Grâce à la construction modulaire et aux pré-fabrications en usine, les délais de déploiement sont significativement réduits. Cela permet de répondre plus rapidement aux besoins énergétiques urgents ou en expansion.

### 6 – 3 - 2 - Avantages du NUWARD

- **Réduction des émissions de CO<sub>2</sub>** : En tant que source d'énergie nucléaire, le NUWARD produit de l'électricité sans émissions directes de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique.
- **Complémentarité avec les énergies renouvelables** : Les SMR comme le NUWARD peuvent fonctionner en complément des énergies renouvelables intermittentes (éolien, solaire), fournissant une source stable et fiable d'électricité pour équilibrer le réseau.
- **Sécurité d'approvisionnement** : La production d'énergie nucléaire locale réduit la dépendance aux importations d'énergies fossiles, augmentant ainsi la sécurité énergétique des pays utilisateurs.
- **Développement économique** : La construction et l'exploitation des SMR créent des emplois locaux et stimulent le développement économique, notamment dans les régions où ces réacteurs sont installés.
- **Technologie éprouvée** : Le NUWARD bénéficie de l'expertise et de l'expérience d'EDF et de ses partenaires dans le domaine nucléaire, assurant une technologie fiable et éprouvée.

### Conclusion

Le NUWARD représente une avancée significative dans le domaine de l'énergie nucléaire, combinant flexibilité, sécurité et efficacité. Sa conception modulaire et ses avantages en termes de coûts et de délais de construction en font une option attractive pour de nombreux pays cherchant à diversifier leurs sources d'énergie et à réduire leurs émissions

## 6 – 4 – réacteur nucléaire JIMMY

Le réacteur nucléaire Jimmy est un projet expérimental et éducatif conçu pour familiariser les étudiants et les amateurs de physique nucléaire avec les principes de base du fonctionnement d'un réacteur nucléaire. Ce type de réacteur miniature est souvent utilisé dans les universités et les instituts de recherche pour l'enseignement et la démonstration des concepts de fission nucléaire, de contrôle des réactions en chaîne et de sécurité nucléaire.

### 6 – 4 – 1 - Principales Caractéristiques du Réacteur Nucléaire Jimmy

- **Petite Échelle:** Le réacteur est de taille réduite par rapport aux réacteurs commerciaux, ce qui le rend idéal pour un environnement de laboratoire.
- **Faible Puissance:** Il est conçu pour fonctionner à des niveaux de puissance très bas, minimisant les risques et facilitant les démonstrations éducatives.
- **Sécurité Renforcée:** Il inclut des dispositifs de sécurité avancés pour prévenir tout incident, tels que des systèmes d'arrêt d'urgence et des mécanismes de refroidissement redondants.
- **Instrumentation Avancée:** Le réacteur est équipé de capteurs et d'instruments pour surveiller divers paramètres comme la température, le flux de neutrons et les niveaux de radiation, permettant une compréhension approfondie des processus nucléaires.
- **Utilisation Didactique:** Son principal objectif est éducatif, permettant aux étudiants d'apprendre par la pratique et d'observer directement les effets de différentes variables sur le fonctionnement du réacteur.

#### 6 – 4 – 2 - Applications et Utilité

- **Enseignement:** Utilisé dans les programmes de génie nucléaire, de physique, et de sciences de l'ingénieur pour enseigner les principes de base de la fission et du contrôle des réacteurs.
- **Recherche:** Servant de plateforme pour des projets de recherche sur des matériaux de combustible, des techniques de modération et des innovations en matière de sûreté nucléaire.
- **Démonstrations Publiques:** Parfois utilisé pour des démonstrations publiques ou des expositions scientifiques afin de sensibiliser le grand public aux aspects positifs et sécuritaires de l'énergie nucléaire.

#### 6 – 4 – 3 - Avantages et Limitations

##### Avantages:

- **Sécurité:** Conçu pour minimiser les risques, il est idéal pour un environnement éducatif.
- **Accessibilité:** Permet une approche pratique de l'apprentissage, ce qui est souvent plus efficace que la théorie seule.
- **Versatilité:** Peut être utilisé pour diverses expériences et démonstrations.

##### Limitations:

- **Échelle Réduite:** Ne permet pas de simuler tous les aspects des réacteurs commerciaux à grande échelle.
- **Coût:** Même si réduit par rapport aux réacteurs commerciaux, il représente tout de même un investissement significatif pour les institutions éducatives.

**En conclusion,** le réacteur nucléaire Jimmy joue un rôle crucial dans l'éducation et la recherche en physique nucléaire, offrant une plateforme sûre et accessible pour explorer les principes fondamentaux de l'énergie nucléaire.

#### ANNEXE : Bibliographie

- <https://www.info.gouv.fr/france-nation-verte>
- <https://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energie-nucleaire/reacteurs-nucleaires-futur.asp>
- <https://www.gen-4.org/>
- <https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/rapports/rapport-gestion-durable-matieres-nucleaires/Tome%204.pdf>
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9acteur\\_nucl%C3%A9aire](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9acteur_nucl%C3%A9aire)
- <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/jeunes-enseignants/pour-les-jeunes/lenergie-de-a-a-z/produire-de-lelectricite/les-differents-types-de-reacteurs-nucleaires>
-