

Introduction

L'accident de Fukushima Daiichi en 2011 a révélé les limites des réacteurs de génération II, fortement **dépendants** de **systèmes actifs** de refroidissement nécessitant une alimentation électrique continue. Après l'arrêt automatique de la fission, la **chaleur résiduelle** n'a pas pu être évacuée en raison de la perte simultanée du réseau et des diesels de secours, détruits par le tsunami. Cette défaillance a entraîné une montée rapide de la température et une fusion partielle du combustible. L'IRSN souligne que l'**incapacité à maîtriser** la chaleur résiduelle a été déterminant dans les dommages subis. L'accident a ainsi renforcé la perception de la **vulnérabilité** des systèmes actifs et mis en avant l'importance des **solutions passives** capables d'assurer le refroidissement **sans apport énergétique** (Fig 1) [1].

Comment les systèmes de refroidissement passifs permettent-ils de surmonter les limites révélées par l'accident de Fukushima ?

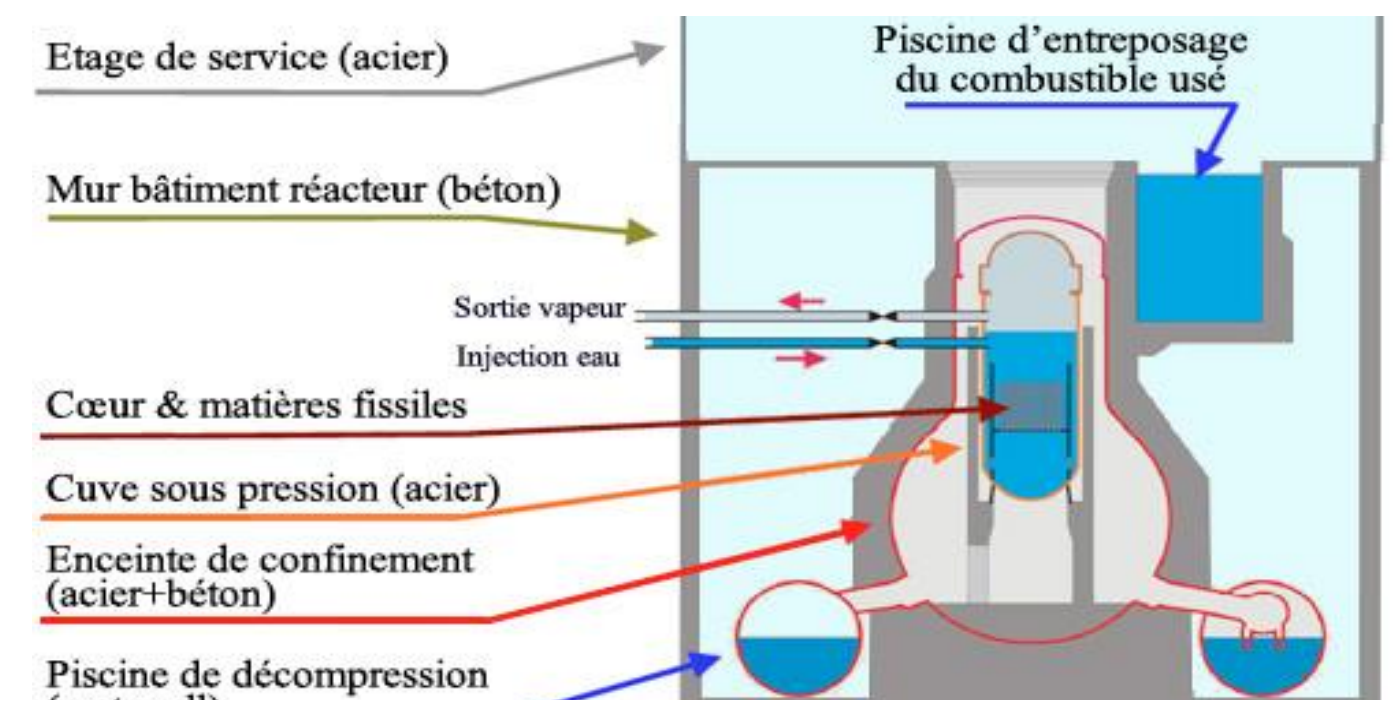


Figure 1 : Schéma d'un réacteur à eau bouillante de Fukushima Daiichi (IRSN, 2012).

I – Prise de conscience vers les systèmes de refroidissement passif

Face aux limites des systèmes de refroidissement actifs, dépendants de l'électricité et vulnérables en cas d'accident, l'industrie nucléaire a reconnu la nécessité de solutions plus autonomes. Cela a conduit au développement de dispositifs capables de fonctionner sans intervention humaine, d'où l'émergence des systèmes de refroidissement passifs (Fig 2) [2].

Ces systèmes de refroidissements passifs :

- **évacuent** la chaleur résiduelle du réacteur ou de ses composants associés ;
- fonctionnent **sans alimentation électrique** ni pompes mécaniques ;
- s'appuient sur des **phénomènes naturels** : gravité, convection, différence de pression, évaporation-condensation.

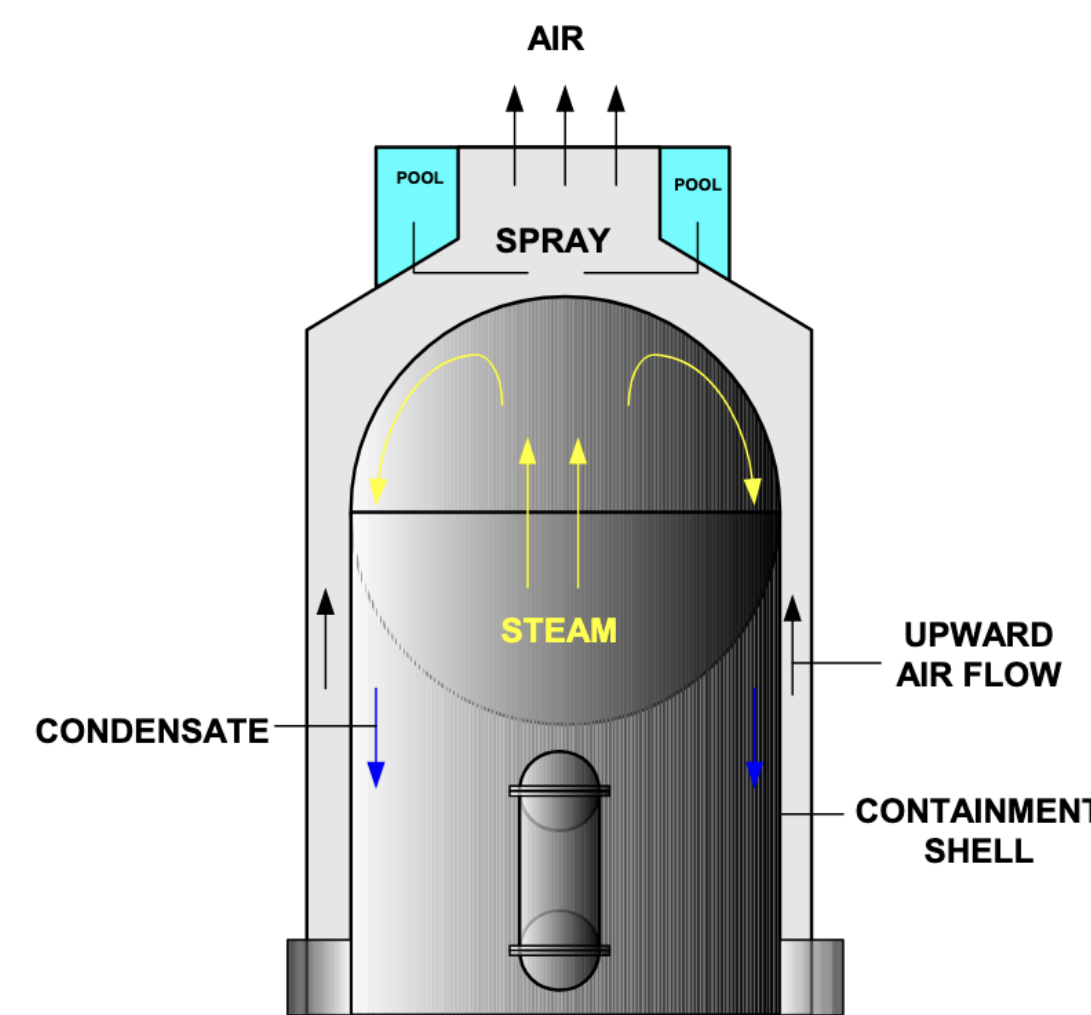


Figure 2 : Schéma d'un réacteur possédant un système de refroidissement passif (IAEA, 2009).

II – Le système refroidissement passif construit au Japon : Système passif d'évacuation de la chaleur résiduelle.

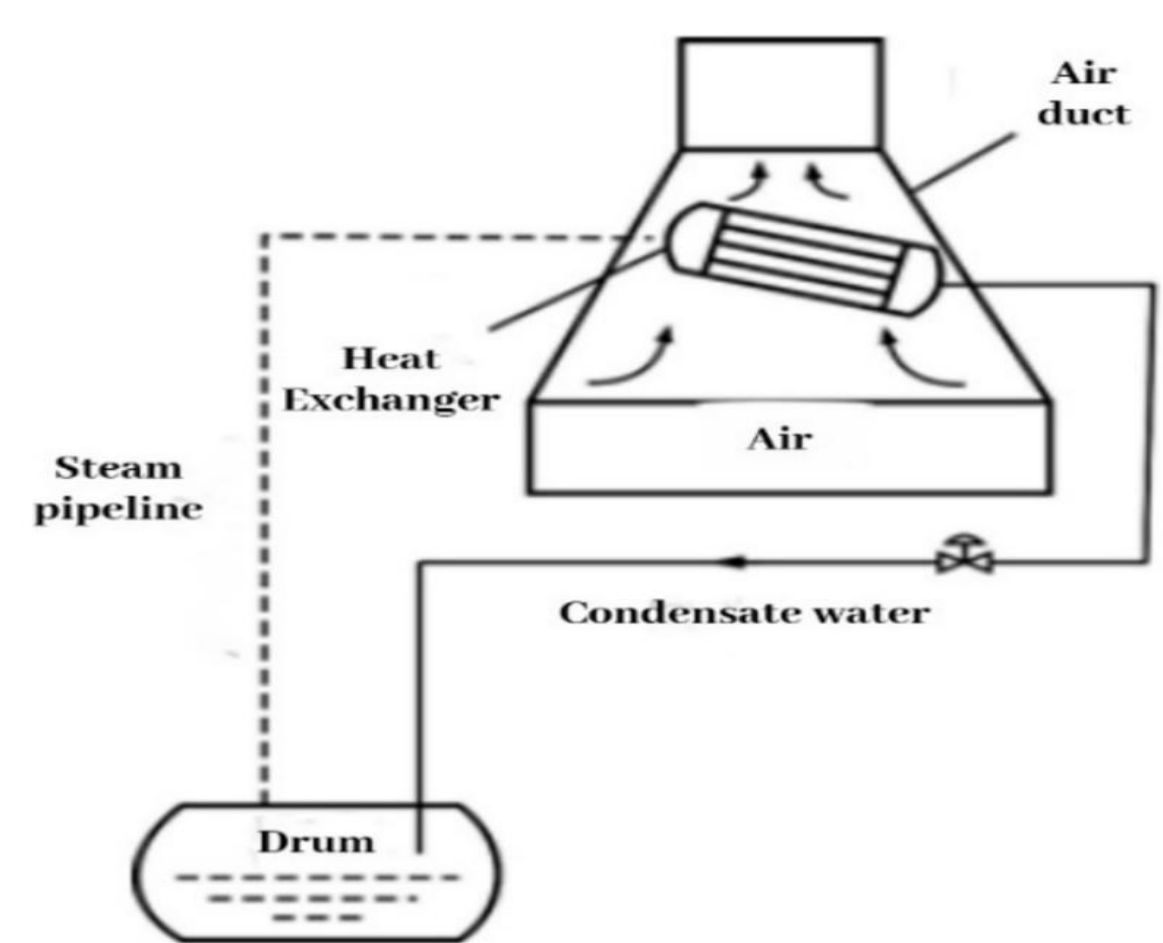


Figure 3 : Schéma d'un refroidissement par air du système PHRS (EJAM, 2015).

La Japon a décidé de construire un système de refroidissement passif appelé « **Système passif d'évacuation de la chaleur résiduelle** » (PRHRS) (Fig 3) [3].

C'est un système qui :

- est ciblé sur l'évacuation thermique post-arrêt ;
- utilise un circuit de refroidissement **autonome**, séparé du circuit primaire du réacteur, afin d'évacuer la chaleur résiduelle même en cas de défaillance du système principal ;
- repose sur la **convection naturelle** ;
- nécessite un échangeur externe, garantissant une efficacité stable sur le long terme.

IV – Focus sur les différents systèmes de refroidissements existants ...

Au-delà de cette solution, de nombreux pays dans le monde ont développé leurs propres systèmes de refroidissement passif afin de renforcer la sûreté de leur réacteur. Parmi ces dispositifs, deux systèmes présentés ci-dessous illustrent bien cette diversité technologique.

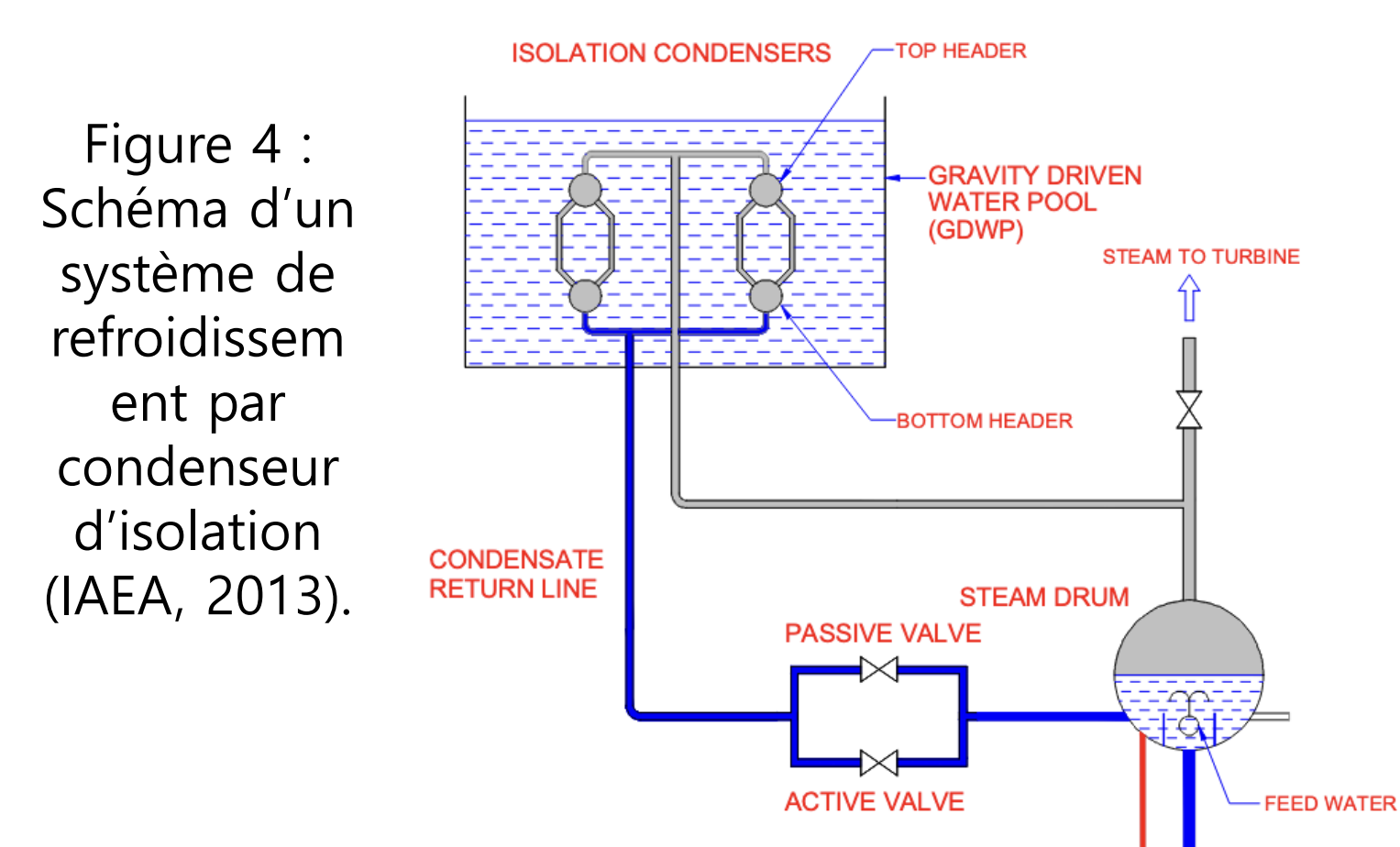


Figure 4 : Schéma d'un système de refroidissement par condenseur d'isolation (IAEA, 2013).

Système de refroidissement passif du condenseur d'isolation (Fig 4) [5]

Fonction : refroidit le réacteur après un arrêt d'urgence en condensant la vapeur.

Principe : la vapeur monte naturellement vers un condenseur situé en hauteur, se condense, et l'eau redescend par gravité dans le réacteur.

Caractéristiques :

- Fonctionne sans électricité ni pompes ;
- S'active automatiquement dès que la pression de vapeur dépasse un seuil.

Exemple : Utilisé dans certains réacteurs BWR

Système de refroidissement passif du confinement (Fig 5) [6]

Fonction : refroidit l'enceinte de confinement du réacteur après un accident.

Principe : La chaleur du confinement est transférée vers des échangeurs passifs via convection naturelle et condensation, puis rejetée vers l'extérieur.

Caractéristiques :

- Fonctionne sans électricité ni pompes ;
- Permet de maintenir la pression de confinement et de limiter la température à l'intérieur.

Exemple : Utilisé dans les réacteurs de type AP1000.

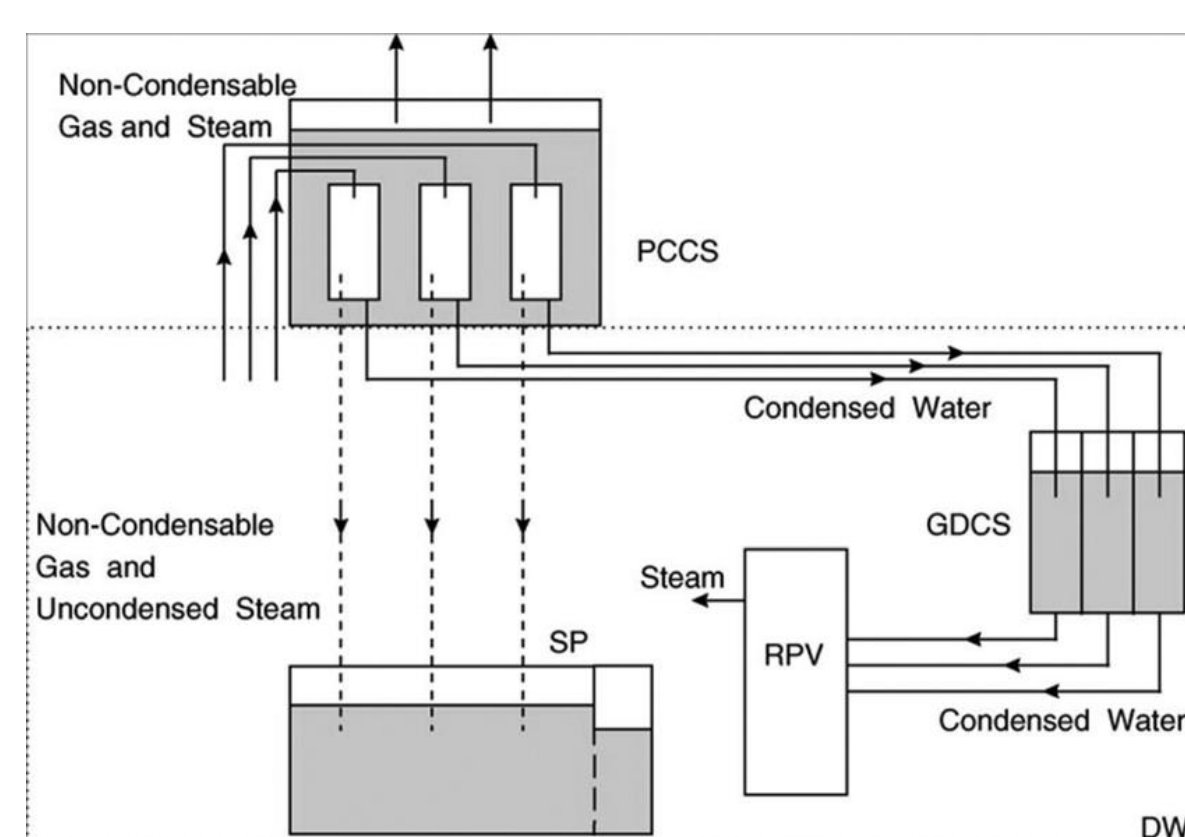


Figure 5 : Schéma d'un système de refroidissement par confinement (IAEA, 2019).

III – Comparatif entre les deux systèmes de refroidissement

Caractéristiques	Refroidissement actif avant l'accident (Fig 1)	Refroidissement passif après l'accident (Fig 3)
Principe	Utilise des pompes électriques pour circuler l'eau de refroidissement dans le cœur et le circuit primaire	Utilise la gravité, la convection naturelle et la vapeur pour circuler l'eau et évacuer la chaleur
Source d'énergie	Dépend de l'électricité	Fonctionne sans électricité ni générateur externe
Vulnérabilité	Très vulnérable en cas de panne électrique ou catastrophe naturelle	Continue de fonctionner même sans alimentation externe
Capacité de réponse	Injection rapide d'eau, contrôle actif du débit et de la pression	Injection automatique par gravité, circulation naturelle, contrôle passif limité mais fiable
Maintenance	Haute : nécessite surveillance, pompes, vannes motorisées	Plus simple : moins de pièces mobiles, moins de maintenance, activation automatique
Objectif principal	Refroidir le cœur en fonctionnement normal et en situation d'urgence	Elimination la chaleur résiduelle du cœur après l'arrêt du réacteur, même sans énergie externe

Tableau 1 : Tableau comparatif entre les deux systèmes de refroidissement au Japon [4].

V – ... avec des avantages et inconvénients.

Avantages

- **Indépendants de l'électricité et des pompes** : fonctionnent même lors d'une panne totale ;
- **Activation automatique** : s'enclenchent par des phénomènes physiques ;
- **Fiabilité accrue et maintenance simplifiée** : moins de pièces mécaniques, donc moins de risques de panne par usure ou défaillance mécanique ;
- **Sécurité en situation extrême** : capables de fonctionner dans des scénarios accidentels graves ;
- **Durée de fonctionnement prolongée** : conçu pour tenir entre 24 et 72 h.

Inconvénients

- **Capacité limitée** : dépendent du stockage d'eau ou de l'espace disponible pour l'évacuation de la chaleur ;
- **Sensibles aux conditions externes** : facteurs (état du condenseur, etc.) pouvant influencer son efficacité ;
- **Temps de réponse plus lent** : certains systèmes mettant plus de temps à transférer la chaleur qu'une pompe active ;
- **Complexité de conception** : dimensionnement précis nécessaire pour garantir la circulation naturelle et l'efficacité thermique ;
- **Limité aux scénarios prévus** : peuvent ne pas suffire en cas d'accident sévère ou combiné.

Conclusion

L'accident de Fukushima a révélé les limites des systèmes actifs de refroidissement, dépendant de l'électricité et vulnérables aux situations extrêmes. Il a conduit à la prise de conscience de la nécessité de dispositifs passifs, capables d'évacuer la chaleur résiduelle sans intervention humaine. Ces systèmes, comme ceux du condenseur d'isolation ou du confinement, offrent sécurité et fiabilité accrues. En France, les projets de SMR tels que Nuward intègrent ces technologies passives, illustrant l'évolution vers des réacteurs plus sûrs et autonomes [7].

Bibliographie

- [1] : IRSN. (2012). *Fukushima, un an après. Premières analyses de l'incident et de ses conséquences*.
- [2] : IAEA. (2009). *Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power plants*.
- [3] : EJAM. (2015). *The concept of Passive Cooling Systems for Inherently Safe BWRs*.
- [4] : IRSN. (2016). *Éléments de réflexion sur les systèmes de sûreté passifs des réacteurs nucléaires*.
- [5] : IAEA. (2013). *Passive Safety Systems in Advanced Water Cooled Reactor (AWCRs)*.
- [6] : IAEA. (2019). *Passive Safety Systems in Water Cooled Reactor : An Overview and Demonstration with Basic Principle Simulators*.
- [7] : ASN. (2023). *Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2023*.