



ARA-SGN/2013/019 /AD. PM./rev.3

REACTEURS EPR : RETOUR D'EXPERIENCE
D'OLKILUOTO A TAISHAN 1&2
Point au 1er février 2014

Introduction

Le présent document comporte trois parties et une conclusion.

- La première partie consiste en un rappel général sur les réacteurs à eau sous pression (REP), construits avant l'EPR.
- La deuxième présente les caractéristiques principales de l'EPR.

L'objet des deux premières parties est de montrer que l'EPR n'est pas issu d'un concept *ex nihilo*, mais que c'est un prototype bénéficiant de tout l'acquis des réacteurs à eau sous pression, dont l'expérience s'est étalée sur plusieurs décades.

- La troisième partie expose les premiers fruits du retour d'expérience sur les quatre EPR construits par AREVA, objet de la conférence précitée.

En conclusion nous reviendrons sur la problématique énergétique.

1^{ERE} PARTIE : DES PREMIERS REP A L'EPR.

Dans les REP il y a deux systèmes principaux destinés à transformer l'énergie produite dans le combustible nucléaire, en énergie électrique : le système de refroidissement du réacteur (dit aussi système primaire) qui transfère la chaleur du combustible nucléaire vers le générateur de vapeur (GV) où commence le deuxième système, qui envoie la vapeur produite vers le bâtiment turbine où son énergie est convertie en électricité. Pour permettre aux systèmes primaire et secondaire de remplir leurs fonctions il y a des systèmes support et des systèmes de sûreté et sauvegarde dédiés pour limiter les conséquences des accidents en dessous des valeurs réglementaires acceptables pour le public.

Le système primaire est constitué par la cuve du réacteur, les GV, les pompes primaires et les tuyauteries qui les connectent (Fig. 1). Ce que l'on appelle *boucle de refroidissement* consiste en une pompe primaire, un GV et les tuyauteries que les connectent à la cuve. Il existe différents modèles de REP, les principaux étant les modèles à trois boucles ou à

quatre boucles. Les réacteurs Westinghouse sont à deux, trois ou quatre boucles suivant la puissance. Les réacteurs issus de Combustion Engineering ainsi que ceux de Babcock & Wilcox sont à deux GV et quatre pompes.

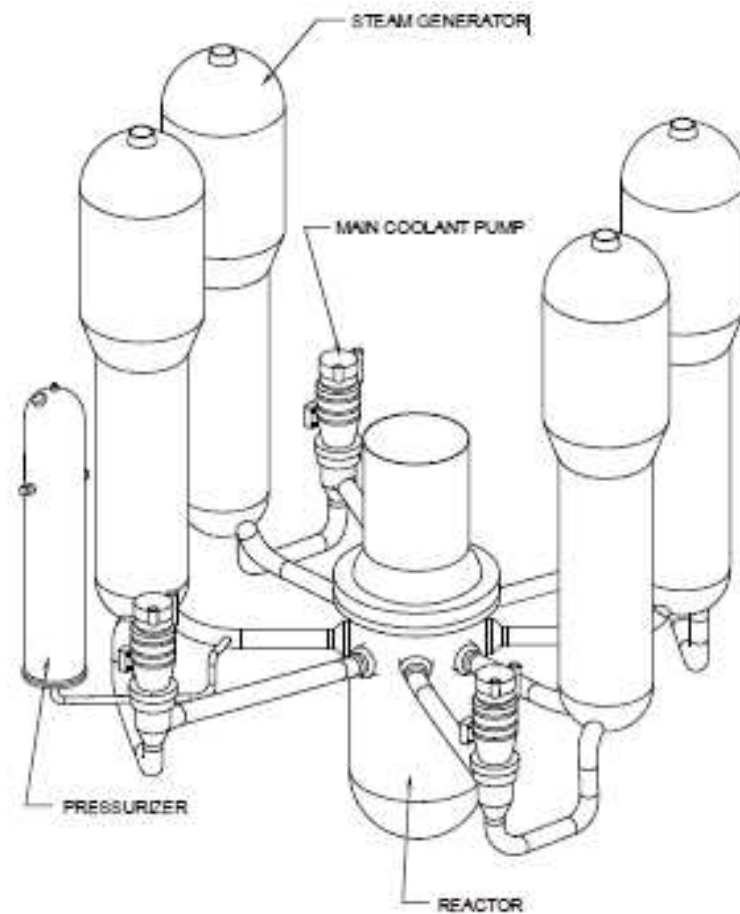


Figure 1 Réacteur quatre boucles : schéma simplifié (source NRC)

Les REP français construits avant l'EPR, ont été initiés sous licence Westinghouse puis très tôt francisés ; ils ont évolué en vingt ans de trois à quatre boucles et de 900 MWe à 1500 MWe. On compte ainsi : 34 réacteurs de 900 MWe, construits principalement dans les années soixante dix, 20 REP de 1300 MWe construits entre la fin des années soixante dix et la fin des années quatre-vingt, quatre REP de 1500 MWe, le palier dit N4, (Chooz B 1 et B2, Civaux 1 et 2), construits entre 1988 et 1999. L'évolution a porté non seulement sur la puissance mais aussi sur la sûreté et la standardisation. Un retour d'expérience sans égal s'y est ajouté, issu de ces 58 réacteurs en fonctionnement, dont ont bénéficié les premiers modèles.

2^{EME} PARTIE : L'EPR.

L'EPR, réacteur de génération III+, fut d'abord appelé « European Pressurized Reactor », puis « Evolutionary Power Reactor ». Il est le modèle de réacteur développé à l'origine conjointement en France et en Allemagne par les industriels que sont AREVA et SIEMENS,

mais aussi avec la collaboration des électriciens des deux pays, notamment EDF. Egalement, du côté des autorités de sûreté, la coopération franco-allemande a été instaurée, afin que l'EPR réponde aux exigences communes. Cette coopération s'est étendue aux organismes de recherche que sont le CEA et du côté allemand notamment le Centre de Karlsruhe.

Pourquoi « evolutionary » ? La raison est que l'EPR doit être de conception évolutive, c'est-à-dire issu des réacteurs les plus modernes français et allemands et bénéficiant de leur retour d'expérience, à savoir les N4 français et les KONVOI allemands. Des caractéristiques générales ont été fixées pour pouvoir aboutir à un certain niveau de standardisation. Ont été ainsi définies des conditions sismiques, de durée de vie, d'adaptation au réseau électrique, de disponibilité, de maintenance préventive, des limites de doses, etc... Ont été aussi considérées les agressions telles que l'incendie, l'explosion, et les événements externes : la chute d'avion, l'inondation, les actes de malveillance, etc... Ces conditions et agressions ont été adaptées aux EPR avec les dernières réglementations françaises.

Considérons quelques exemples de cette évolution (Figure 2).

En ce qui concerne le réacteur lui-même, un réflecteur lourd, en acier inoxydable, couvre la paroi intérieure de la cuve et en augmente ainsi la longévité. Sur le plan neutronique il permet une meilleure répartition de la puissance dans le cœur du réacteur, et augmente le rendement du combustible. Le gain est notable par rapport aux réacteurs précédents, (la réduction de la consommation d'uranium prévue est de l'ordre de 17 %, pour une même production d'électricité). Une amélioration importante de l'impact environnemental en découle également.

La cuve de l'EPR est aussi plus grande que celle des réacteurs précédents, le diamètre intérieur atteint près de 4,9 mètres. Elle peut contenir 241 assemblages au lieu de 205 pour les réacteurs N 4. Et la puissance passe de 1500 MWe à 1650 MWe.

Afin de réduire les risques de fusion du cœur en cas d'accident, l'EPR est doté de quatre systèmes de sauvegarde parallèles et implantés dans des locaux distincts (sur les centrales actuellement en exploitation leur nombre est de deux). Les alimentations électriques sont composées de quatre sources indépendantes et diversifiées quant à leur nature. Il s'agit d'abord de l'alimentation fournie par la centrale elle-même ; en cas de défaillance de celle-ci une ligne auxiliaire est utilisée pour alimenter les systèmes de sauvegarde ; si la ligne auxiliaire fait défaut, quatre groupes diesel viennent alimenter un groupe de sauvegarde chacun ; enfin deux groupes complémentaires de technologies différentes s'ajoutent au dispositif.

Un système de décharge du circuit primaire, intervenant en cas de perte totale du refroidissement secondaire est prévu afin d'éliminer un accident avec circuit primaire en haute pression

Des améliorations ont aussi été apportées lors du passage du palier N4 à l'EPR sur la cuve réacteur elle-même. Il s'agit d'abord de la réalisation de la virole supérieure porte tubulures en acier forgé monobloc. Elle inclut la bride de cuve et les attentes de soudage débouchant légèrement sur l'extérieur. Cette disposition a supprimé notamment la soudure sur la bride

de cuve. Les huit tubulures sont soudées en position posée sur la virole porte tubulures, la soudure de liaison se situant exclusivement sur la paroi des tubulures. Egalement le fond inférieur de cuve est simplifié par rapport au projet N4, par la suppression des traversées d'instrumentation, reportées en partie haute.

Rappelons aussi que les cuves sont fabriquées à partir de pièces forgées en acier manganèse-nickel-chrome (acier 16 MND 5), à partir de lingots creux coulés en aciérie dans une lingotière annulaire. De ce fait ils se solidifient simultanément à partir de leur face interne et de leur face externe, la solidification s'achève dans l'épaisseur de la paroi où se concentrent les impuretés, ce qui conduit à une face interne métallurgiquement très propre. Les viroles de cuve subissent ensuite un processus complexe comprenant, la découpe des extrémités du lingot pour éliminer les zones contenant des impuretés et les opérations de forgeage. La totalité de la surface intérieure des cuves est revêtue d'acier inoxydable, déposé par soudage en deux couches.

Parmi les autres évolutions, il faut noter que, dans le prolongement du N4, la troisième barrière de l'EPR consiste en deux confinements : le premier est une double enceinte, l'une en béton précontraint, calculée pour résister à une importante augmentation de la pression, l'autre en béton armé, la « coque avion », qui recouvre la première et la protège en cas de chute d'aéronef. Le deuxième confinement est une peau métallique en acier qui couvre la paroi intérieure précontrainte et complète l'étanchéité du réacteur.

Bien que les systèmes de sauvegarde du réacteur et les protections vis-à-vis des événements externes rendent la fusion du cœur hautement improbable, une des caractéristiques principales de l'EPR est qu'il est doté d'un dispositif de récupération du *corium* (dit aussi *core catcher*). En cas de fusion du cœur se forme un mélange d'éléments combustibles et de structures internes de la cuve fondus, dénommé le *corium*. Cette substance très chaude peut percer le fond de la cuve. Pour éviter toute pollution du sol, un récupérateur de *corium* a été prévu et est destiné à l'étalement et au refroidissement de celui-ci. Il est constitué d'un bac de briques réfractaires extrêmement résistantes à la chaleur et d'une structure massive refroidie en partie basse par des canaux pour empêcher l'ablation du radier. Il est situé dans un compartiment à côté du puits de cuve et comporte une large surface d'étalement nécessaire au refroidissement. Ce compartiment est séparé du puits de cuve par une porte fusible. La rétention temporaire du *corium* est assurée par la mise en place dans le puits de cuve d'un béton sacrificiel, dont l'ablation doit s'effectuer suffisamment lentement pour assurer l'accumulation de la plus grande partie du *corium* dans le puits de cuve avant la coulée. La rupture de la porte de séparation assure l'étalement rapide et homogène du *corium* sur le récupérateur où il est refroidi.

Signalons enfin, dans cette liste non exhaustive, la présence de recombineurs auto catalytiques passifs d'hydrogène pour éliminer les risques de détonation.

L'EPR est doté, à l'instar du N 4, d'un système numérique de contrôle commande, piloté par un moyen de conduite principal informatisé.

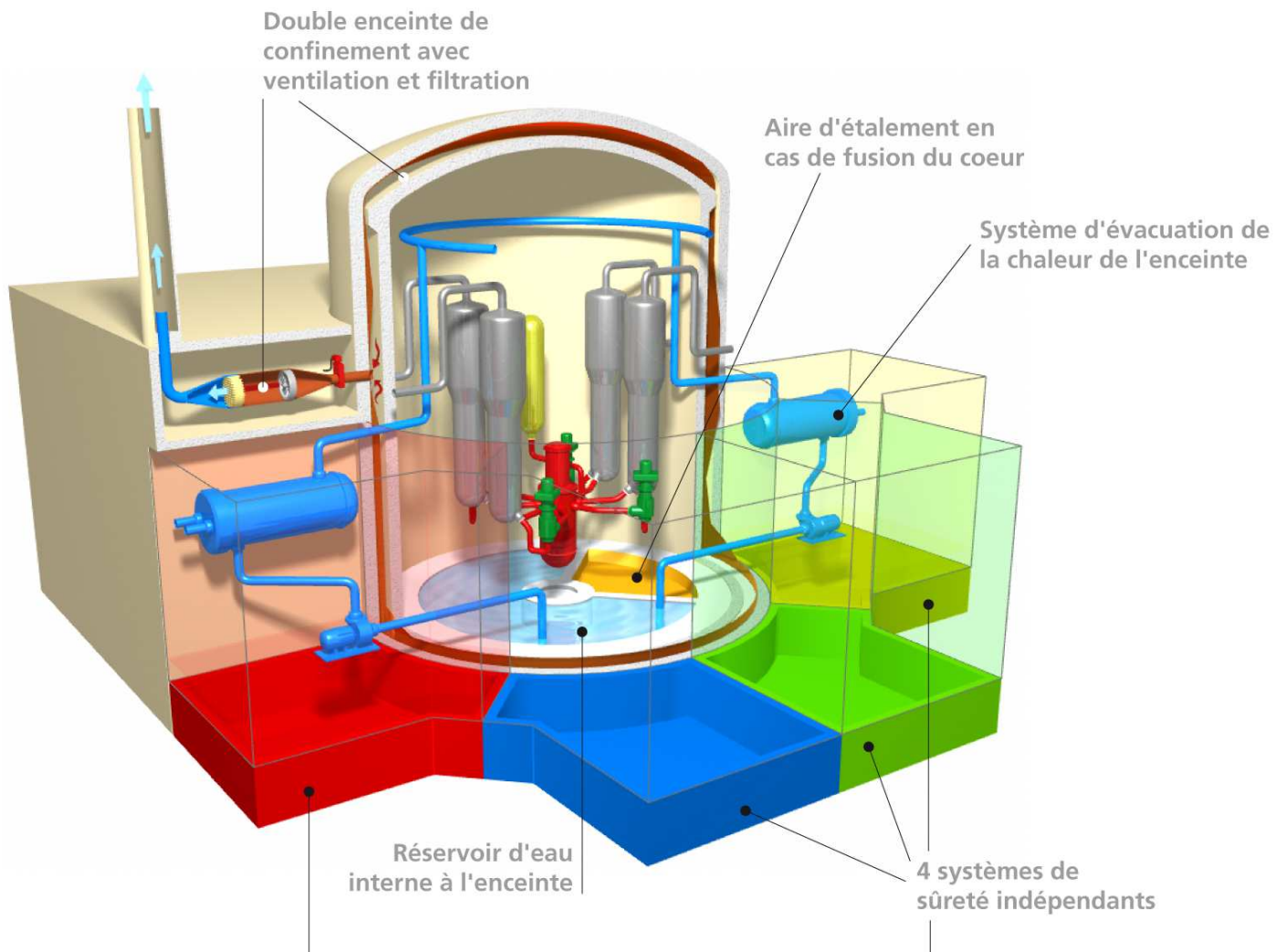


Figure 2. Ilot nucléaire

3^{EME} PARTIE : LE RETOUR D'EXPERIENCE AREVA D'OLKILUOTO A TAISHAN 1&2 (REX)

Nous ne pouvons, dans le cadre de ce document, reproduire la totalité de la très riche conférence précitée, mais nous retenons quelques idées majeures.

Citons d'abord l'étendue, la diversité et la valeur de ce REX, issu de quatre réacteurs EPR en cours de construction : le réacteur Olkiluoto 3 (OL3) en Finlande, le réacteur 3 de Flamanville (FL3), les réacteurs Taishan 1 et Taishan 2 en Chine (TSN 1&2). Leur avancement est résumé dans le tableau suivant.

Tableau 1 : avancement des quatre projets fin 2012.

Désignation	OL 3	FL 3	TSN 1&2
Puissance électrique	1600 MWe	1630 MWe	1660 MWe par unité
Premier béton	Octobre 2005	Décembre 2007	Octobre 2009 (unité 1)
Areva scope (fourniture)	Réacteur clé en mains	NSSS *	Ingénierie et équipement des deux Ilots nucléaires (construction et démarrage par le client avec As. Tque AREVA)
Situation fin 2012	Circuit primaire installé. Instrum. & et contr. : en cours.	systèmes de sûreté en cours d'installation.	Mise en place du dôme faite, cuve réacteur en cours
Avancement AREVA	82 %	80 %	70 % (TS 1)

*: nuclear steam supply system (la « chaudière » nucléaire)

Nota: L'îlot conventionnel (bâtiment turbine, alternateur, ...) est fourni par Siemens en Finlande et par Alstom à Flamanville et à Taishan.

Précisons ensuite son organisation.

Le REX, commun à EDF et AREVA, regroupe la conception, la construction et la mise en service des quatre réacteurs, ainsi que leur *licensing* avec trois autorités de sûreté différentes : l'ASN pour la France, le STUK pour la Finlande et la NNSA pour la Chine.

De plus deux opérations de certification avec les autorités de sûreté de deux autres pays importants sont à signaler : le Royaume Uni et les USA. La certification HSA (Royaume Uni) a eu lieu fin 2012, la certification NRC (Etats Unis) est attendue en 2014. Ainsi l'EPR français est le premier réacteur de troisième génération soumis à une évaluation multinationale auprès de cinq autorités de sûreté différentes. Il satisfait également aux objectifs WENRA (Western European Nuclear Regulators Association) et est prêt à intégrer les requêtes post-Fukushima.

Cette approche unique de contrôles et revues en profondeur réduit fortement les risques encourus par la construction de nouvelles centrales nucléaires.

Constitution d'une base de données REX.

Une vaste base de données commune AREVA et EDF a été constituée. Elle est issue de plus de 1600 retours d'expérience, recueillis sur les projets en cours de réalisation, auxquels s'ajoutent ceux des 58 réacteurs en opération en France. Rien qu'au cours de l'année 2011, un retour d'expérience par jour en moyenne a été recensé. Les bénéfices tirés concernent tous les domaines, la répartition des données de REX par corps de métier étant la suivante :

Direction et organisation de projet (21 %) ; Engineering (44 %) ; Achats (11 %) ; Construction (18 %) ; Autres (6 %).

Les projets plus récents en ont grandement bénéficié. Par exemple, en ce qui concerne les deux réacteurs de Taishan, la moitié des personnels de direction et engineering impliqués, avaient déjà travaillé sur les projets d'Olkiluoto et Flamanville 3, ainsi que 90 % de l'équipe en charge des achats.

Nous examinons successivement les fruits du REX relatif à l'engineering et la construction

Rex et standardisation des activités d'engineering.

Au niveau de l'engineering, les retours d'expérience ont permis de viser une standardisation des activités.

Ainsi, par exemple la durée nécessaire pour l'établissement des P&ID (première édition), données importantes pour les autres disciplines et les interfaces génie civil, est passée de 14 mois sur OL 3 à 9 mois sur Taishan, soit un gain de 36 %.

Celle des isométriques est passée de 10 mois à trois mois, soit un gain de 70 %. La rédaction des notes de fonctionnement, dossier important pour l'Instrumentation et contrôle, est passée de 30 mois à 20 mois, soit un gain de 33 %.

Le nombre d'heures d'engineering pour le NSSS a été réduit de 60 % entre Olkiluoto 3 et Taishan.

REX et construction des grands ensembles mécano forgés.

La durée de fabrication des générateurs de vapeur est passée de 5 à 3 ans, soit 40 % de gain. Des améliorations techniques de construction ont été de plus apportées, par exemple un cas typique est celui des orifices situés en partie inférieure des GV. Il s'agit de huit orifices*, dont les épaulements étaient rapportés sur la virole enveloppe du GV, ce qui entraînait des soudures et contrôles supplémentaires. L'amélioration a consisté à adopter une disposition monobloc forgée incluant la virole du GV et les « hand holes ».

*ces orifices dénommés « trous de poing » (hand holes) sont destinés à introduire une lance à eau sous haute pression pour évacuer les dépôts de boues.

REX sur les autres ensembles importants

Core catcher. Les discussions et l'approvisionnement de la couche réfractaire sur OL 3 ont duré 28 mois. Sur Flamanville et Taishan, 9 mois ont suffi. L'approvisionnement et la construction de la structure de refroidissement est passée de 26 mois en Finlande à 13 mois sur les autres projets.

Génie civil. La réalisation du radier a été simplifiée sur Taishan grâce à des techniques de contrôle de la température (usage de glace, couverture chauffante, tuyauteries intégrées) et

à permis un gain de temps important. Cette amélioration a été possible grâce aux partenaires chinois.

Autre fait notable : la durée comprise entre la coulée du premier béton et la mise en place du dôme réacteur est passée de 47 mois sur Olkiluoto 3 à 24 mois sur Taishan 1.

Le retour d'expérience se poursuit au fur et à mesure de l'avancement des chantiers.

CONCLUSION

Le retour d'expérience exposé et les gains apportés donnent un éclairage positif qu'il nous a paru utile de faire connaître à nos adhérents de l'ARA-SGN, pour contrebalancer la tonalité négative de certains médias, insistant essentiellement sur la « complexité » et les dépassements des coûts et délais de l'EPR.

Sur OL 3, premier réacteur de troisième génération, et premier réacteur français de puissance lancé en construction depuis des années, une perte dans la transmission des connaissances et l'expérience des équipes était survenue depuis l'achèvement de la dernière centrale de la filière N4 (Civaux).

De plus, l'autorité de sûreté a effectué des demandes de justifications particulièrement pointilleuses en voulant tout vérifier. Le STUK exige de tout savoir à l'avance, exerce une vérification à toutes les étapes. Ce fait confirme l'importance de la fonction *licensing* et de la relation avec les autorités de sûreté à toutes les étapes d'un projet, en particulier sur un projet nucléaire innovant.

Sur Flamanville 3 une combinaison de facteurs est également intervenue, dont la perte d'expérience. S'y sont ajoutés : l'allongement du délai de 8 mois sur le chemin critique du à « l'aléa consoles » support du pont polaire, l'impact de Fukushima, l'évolution de la réglementation des équipements à pression, les ajustements à effectuer sur le contrôle commande digital.

Il faut néanmoins relativiser la question du retard sur OL 3 et FL 3. Rappelons que la durée comprise entre le début de la construction de Civaux 2, réacteur N 4 le plus récent et sa première divergence, fut de 104 mois (04/1991 à 11/1999). La question de la complexité de l'EPR devrait être examinée de plus près, il serait intéressant de le comparer avec la concurrence, l'AP 1000 par exemple, bien que ce dernier soit moins puissant.

Déjà aujourd'hui, les projets nucléaires les plus récents tels que TAISHAN avancent plus vite, la coopération EDF AREVA CHINE et la réalisation de TSN 2 dans la foulée de TSN 1, ont été déterminants dans la réduction des délais et coûts. Les essais vont encore apporter des précieux retours et améliorations.

Si nous nous projetons dans l'avenir, après l'accident de Fukushima, les facteurs fondamentaux du marché mondial de l'énergie sont restés les mêmes. Accroissement important des besoins d'énergie électrique, paramètres géopolitiques (sécurité d'approvisionnement, pression politique sur les énergies fossiles), contraintes liées à l'environnement et nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Dans ce

contexte difficile, le développement d'énergies à bas taux de carbone, telles que l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables, joue un rôle clef dans la constitution future du mix énergétique.

A l'horizon 2050, c'est la génération IV qui permettra, avec les stocks d'uranium présents sur le territoire, d'assurer les besoins en électricité de la France pour une longue durée, tout en transmutant certains radionucléides.

ARA-SGN

Commission Energies et Environnement