
Advanced Nuclear Technologies

08/05/2018

TRACTEBEL
ENGIE



PUBLIC INTERNAL RESTRICTED CONFIDENTIAL

img004-01-journal-001



Advanced Nuclear Technologies

08 May 2018



Célestin Piette - celestin.piette@tractebel.engie.com



PUBLIC INTERNAL RESTRICTED CONFIDENTIAL

2017 ENR International Ranking Based on 2016 revenues



TRACTEBEL



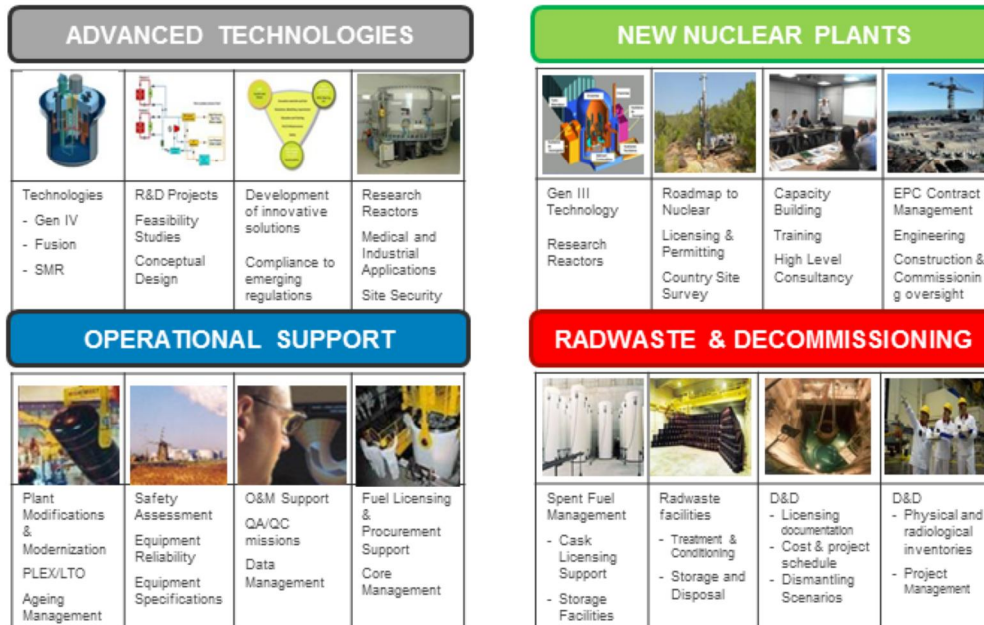
08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

3

Tractebel est un bureau d'ingénieur multidisciplinaire , acteur de la transition énergétique, actif dans les infrastructures, le renouvelable, le conventionnel et le nucléaire.

Services across the full lifecycle of nuclear facilities



TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Au niveau nucléaire, Tractebel est actif à tous les échelons du cycle de vie d'une centrale:

- Que ce soit en amont: étude de faisabilité, assistance au design, licensing and permitting, R&D;
- Lors de la phase d'exécution et d'opération: construction, supervision, support opérationnel (étude de Coeur, fuel procurement, maintenance...), les programmes de prolongation de vie (comme les LTO) et de ageing management;
- Et enfin le cycle aval avec: l'assistance au démantèlement et la gestion des déchets.

Caution

- All information is publicly available.
- Simplifications are deliberately made given the time and the scope of the presentation.
- This lecture reflects a state of the art of the domain.

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

10

Un mot avance de commencer:

1. Toutes les informations de cette présentation sont disponibles publiquement sur internet et sont référencées pour vous permettre d'approfondir certains concepts;
2. Etant donné le temps qui m'est imparti et le scope, des simplifications et raccourcis sont délibérément posés... Le but n'est pas de faire de vous des ingénieurs en nucléaire;
3. Cette présentation est le reflet de l'état de l'art actuel. C'est donc une présentation technique qui a pour but de vous équiper avec des éléments de réponses pour toutes les grandes questions de la technologie: Où ? Quand ? Quoi ? Comment ? Pourquoi ?

CONTENTS

- Who ?
- How ?
- What ?
- Which ?

○ Scope & Methodology

- A global context...
- Nuclear main features ?
- A sustainable nuclear reactor ?
- Let's conclude by discussing !

08/05/2018 Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette PUBLIC

La présentation se structure en trois parties:

1. La présentation des fondamentaux de la technologie.
Le but premier est de comprendre le fonctionnement ainsi que les tenants et aboutissants d'une centrale nucléaire.
2. Quelles sont les caractéristiques intrinsèques et propres à l'énergie nucléaire ?
Le message clef est: « L'énergie nucléaire est différente des autres sources d'énergie et des moyens spécifiques de gestion sont mis en place par le secteur. »
3. Dans un contexte d'évolution industrielle continue et parce que le nucléaire fera partie du mix énergétique de demain, quelles sont les nouvelles technologies actuellement en développement ?
Le but est ici de communiquer au lecteur, l'enthousiasme de l'auteur qui est actuellement partagé dans le secteur nucléaire et qui se traduit par une dynamique d'innovation historique.

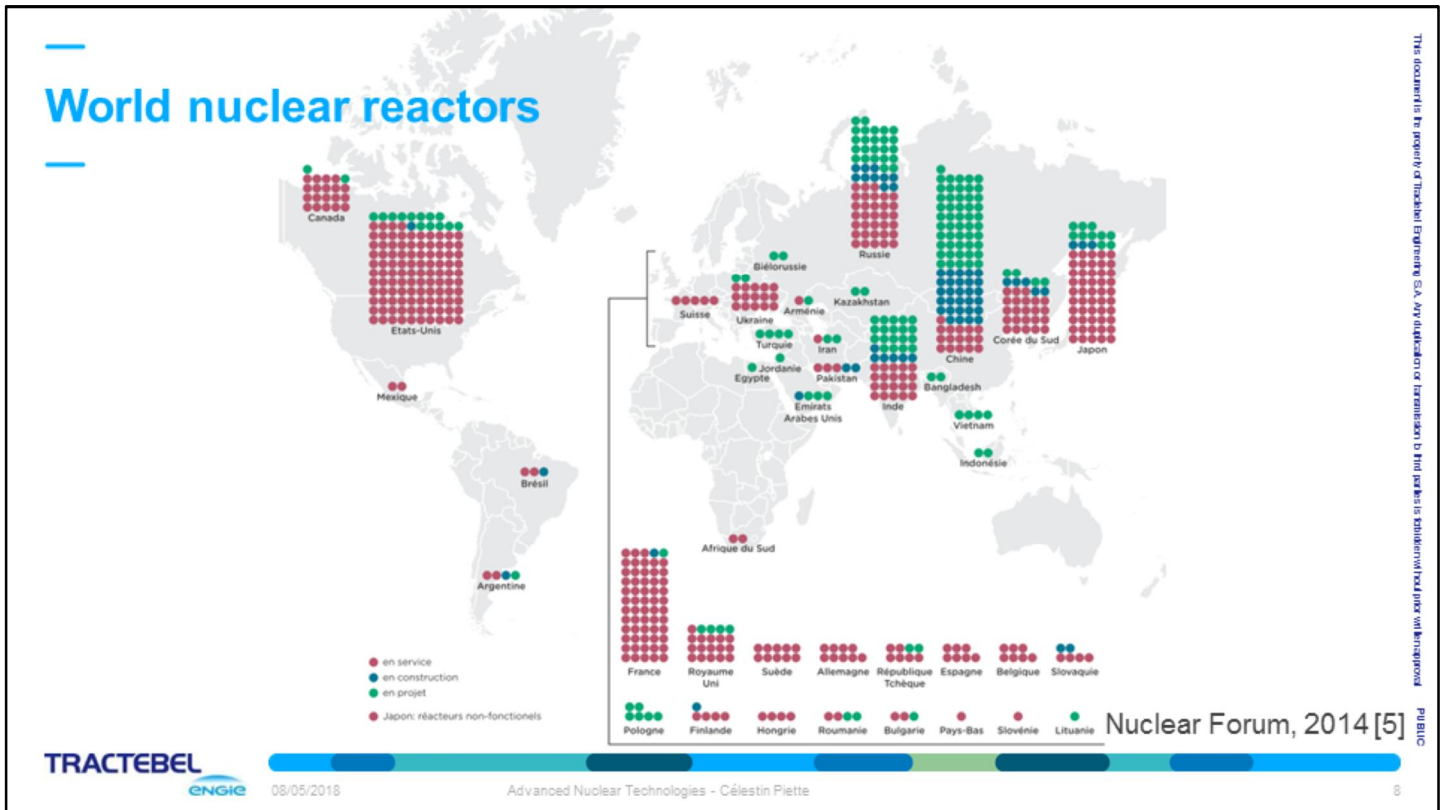
—
Quiz : How many nuclear reactors are there on Earth ?
—

> 100 ?

> 1.000 ?

> 10.000 ?

[39] IAEA, PRIS Answer: 450



La carte suivante présente en rouge les réacteurs existants et actuellement en opération. Les points bleu et vert représentant respectivement les réacteurs en construction et ceux à l'état de projet.

Deux constats ressortent:

1. L'essentiel des réacteurs existants se concentre parmi les grandes puissances économiques: Etats-unis et Canada, Europe et Russie. Comme nous le verrons plus loin, l'énergie nucléaire requiert de larges infrastructures qui demandent du temps, des investissements et des compétences.

Mais aussi les pays isolés géographiquement: Royaume-Uni, Japon et Corée du Sud. L'énergie nucléaire joue pour ces pays un important rôle de sécurité d'approvisionnement énergétique.

2. A l'inverse, le nouvel essor nucléaire se concentre dans les pays émergents tels que la Chine et l'Inde et la Russie dont les besoins en énergie sont sans cesse croissants.



La Belgique compte deux sites nucléaires servant à la production d'électricité: celui de Doel et celui de Tihange comprenant respectivement 4 et 3 réacteurs nucléaires. Ces 7 réacteurs produisent annuellement aux alentours de 50% de la consommation électrique belge. Outre ces réacteurs dits de puissance, la Belgique possède également différents réacteurs de recherche, dont le plus puissant, le BR2 assure 20 à 25% de la production des radio-isotopes mondiaux.

Un peu d'histoire:

1956 : SCK/CEN BR-1 (graphite-gaz à uranium naturel) après GB et France, la Belgique (bien que petit pays) devient le 3ème pays d'Europe de l'Ouest à rendre un cœur critique

Encore opérationnel (recherche et formation)

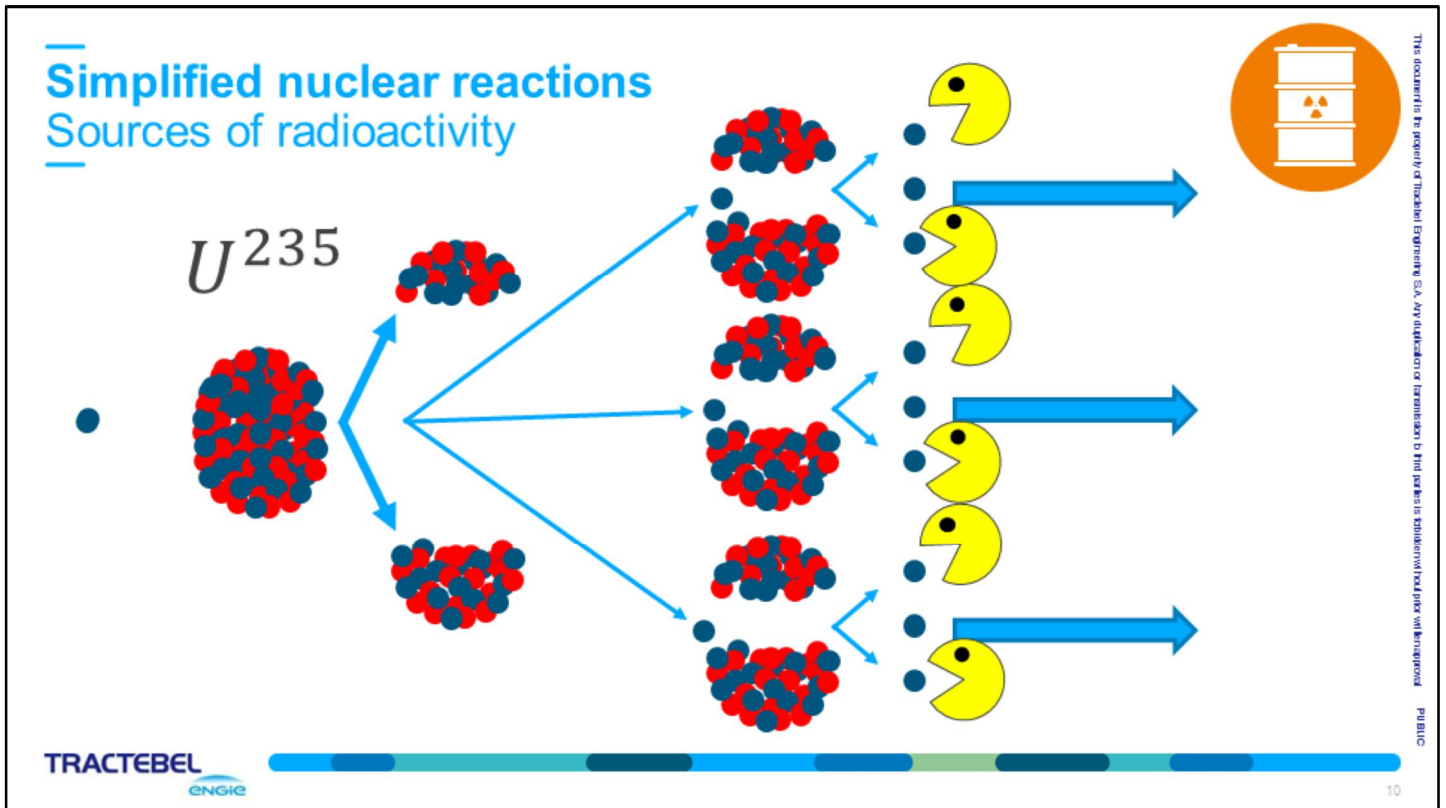
1961 : SCK/CEN BR-2 réacteur de recherche à haut flux

Encore opérationnel (recherche sur les matériaux)

1961 : SCK/CEN BR-3 premier PWR en Europe: la Belgique est pionnière dans le secteur depuis ses débuts.

Démantelé (développement des techniques de démantèlement en grandeur nature...)

Le message est que la Belgique: (1) a toujours été pionnière en Europe vis-à-vis de la technologie nucléaire et (2) que la Belgique a une expertise reconnue mondialement et est un hub technologique incontournable.



L'interaction d'un noyau fissible et d'un neutron peut entraîner une réaction de fission. Et trois concepts en découlent:

1. Une réaction de fission libère plus de neutron qu'il n'en consomme, ces mêmes neutrons vont eux-mêmes fissionner des noyaux environnants et ainsi de suite. La réaction est dite « en chaîne »: 3...9...27...81... Le cœur est alors dit « divergent »: cette propriété est en particulier utilisée pour la montée en puissance du réacteur lors du démarrage;
2. En fonctionnement, des stratégies sont mises en place pour maintenir le réacteur à puissance nominale: le bore, les grappes de contrôle... Permettent d'éliminer l'excès de neutrons qui n'est pas nécessaire à l'auto-entretien de la réaction;
3. Et enfin, l'immense chaleur que dégagent ces réactions est expliqué par la célèbre relation d'Einstein: le défaut de masse qui est observé entre la somme des produits de fission et le noyau original est converti en énergie. Ce qui se traduit par un important dégagement de chaleur.

A titre de comparaison, les centrales à charbon et au gaz fonctionnent, non pas sur base de réactions physiques, mais bien avec des réactions chimiques: l'oxydation de roche carbonée ou d'hydrocarbure qui produisent: chaleur, eau et CO₂.

Amount of fuel needed to produce 1 000 kWh



350 kg of coal



250 l gasoline



300 m³ natural gas



4 g of enriched uranium

TRACTEBEL

ENGIE

Septembre 2012

11

Et cette différence est assez fondamentale puisque les réactions nucléaires (réactions physiques) sont de l'ordre de 100.000x plus productrices d'énergie que les réactions de combustion/oxydation (réactions chimiques).

Ceci soulève la question de la durabilité des ressources fissiles. La démonstration chiffrée se trouve dans les slides du cours du Professeur Ernst.

This document is the property of Tractebel Engineering S.A. Any unauthorised transmission to third parties is strictly prohibited and will be prosecuted.

Operating principles

FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE

CIRCUIT PRIMAIRE CIRCUIT SECONDAIRE CIRCUIT TERTIAIRE

Forum nucléaire, 2016

TRACTEBEL
ENGIE 08/05/2018 Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

12

Une centrale nucléaire fonctionne via l'interaction de 3 circuits indépendants (physiquement séparés; càd compartimentés):

1. Le circuit primaire est composé de la cuve du réacteur qui abrite le combustible au sein duquel se produisent les réactions de fission. La chaleur libérée par ces réactions en chaîne contrôlées est alors transférée à un second circuit fermé: le circuit secondaire. Et ce, par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. La température en sortie de cœur est de **328°C** et la pression de **155 bar**.
2. Cet échangeur de chaleur, appelé le générateur de vapeur, produit la vapeur d'eau qui alimente la turbine qui entraîne l'alternateur qui, à son tour, produit l'électricité transférée sur le réseau électrique. En sortie de turbine, la vapeur est recondensée avant d'être ré-introduite dans le générateur de vapeur. La température de l'eau en sortie du générateur de vapeur est de **287°C** et la pression de **72 bar**.
3. C'est le circuit tertiaire qui évacue cette chaleur résiduelle du circuit secondaire par le biais d'un second échangeur de chaleur: le condensateur. L'eau de refroidissement est prélevée d'une source extérieure (fleuve ou mer). L'adjonction éventuelle d'une tour de refroidissement permet de limiter l'élévation de température avant renvoi de l'eau de refroidissement à sa source. L'eau est donc renvoyée propre, juste un peu plus chaude. La température de la source extérieure est de **5 à 20°C** (en fonction de la saison) et est à la pression de **1 bar** (pression atmosphérique).

What is radioactivity ?



Cloud chamber – Charles Thomson Rees Wilson – 1927 Physics Nobel Prize [7]

Un sujet transverse qui va revenir très régulièrement dans la présentation est celui de la radioactivité.

Et la première chose qu'il faut savoir, c'est que la radioactivité est quelque chose de parfaitement naturel avec lequel nous sommes confrontés tous les jours: le potassium 40 de nos muscles, le radon souvent présent dans les caves mal aérées, les rayonnements cosmiques qui nous viennent de notre étoile... La radioactivité est donc avant toute chose naturelle. Maintenant, et nous le verrons plus tard, l'énergie nucléaire est une source anthropique de matière radioactive (voir détail prochain chapitre). Ici, l'idée est de se concentrer sur les fondamentaux.

Un noyau radioactif est un noyau instable qui tend à retrouver un nouvel état stable par l'émission d'énergie sous forme de particules et de photons.

L'animation suivante l'illustre parfaitement en permettant la visualisation macroscopique de la radioactivité naturelle de l'uranium. L'énergie se retrouve sous forme d'énergie cinétique des particules émises, et l'énergie des photons. Après, la conversion en énergie utile peut prendre différentes formes, dont la plus commune est l'utilisation de l'énergie cinétique elle-même: faisceaux de neutrons pour le dopage du nickel (production de semi-conducteurs), radiothérapie (ex: gammathérapie),... Alors ici, dans le contexte qui nous intéresse, la radioactivité des isotopes produits est une source de chaleur. Prenons l'analogie suivante: imaginons-nous en voiture. Si à un moment donné on freine brusquement et si l'on était en mesure de toucher les plaquettes de frein, celles-ci seraient brûlantes. Il y a eu conversion d'énergie cinétique, en énergie thermique. Et dans le cadre des réacteurs nucléaires, c'est ce qui se passe: en interagissant avec leur environnement, les matières radioactives produites lors du fonctionnement normal de la centrale génèrent de la chaleur. (Rem: la principale source de chaleur provient des réactions de fission -> des ordres de grandeurs sont donnés au prochain chapitre).

En résumé et de manière simple et intuitive: dans le cas de la filière de production nucléaire d'électricité, un corps radioactif est source de **chaleur**.

CONTENTS

- Who ?
- How ?
- What ?
- Which ?

- Scope & Methodology
- A global context...
- **Nuclear main features ?**
- A sustainable nuclear reactor ?
- Let's conclude by discussing !

08/05/2018 Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette PUBLIC

Ce qui clôture donc la première partie sur les fondamentaux et les outils de compréhension de l'énergie nucléaire.

La seconde partie de la présentation s'axe sur deux choses: (1) quelles sont les caractéristiques intrinsèques du nucléaire ? En d'autre mot, pourquoi le nucléaire est-il différent des autres secteurs d'activité industriels (en particulier, des autres sources d'énergie) et (2) quelles sont les moyens de gestion spécialisés qui sont mis en place par le secteur ?

What fundamentally distinguish nuclear from other energy sources ?



Waste



Safety



Cost

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

15

This document is the property of Tractebel Engineering S.A. Any distribution or transmission to third parties is strictly prohibited without prior written authorization. PUBLIC

De manière simple, certains aspects requièrent une attention particulière lorsque l'on aborde la question de la production nucléaire d'électricité:

1. La gestion des déchets radioactifs,
2. La sûreté,
3. Les coûts de construction.

Il est à noter qu'une quatrième dimension existe: le débat sur l'acceptation sociale du nucléaire. La thématique ne sera pas abordée puisque subjective. Nous renvoyons le lecteur intéressé à la référence suivante [46].

La première thématique abordée est celle des **déchets nucléaires**. Un déchet nucléaire est une matière radioactive non valorisable. Si le déchet est:

1. Valorisable, il s'agit alors d'une ressource;
2. Non radioactif, c'est un déchet conventionnel, et il peut partir vers les filières classiques de gestion des déchets.

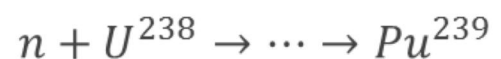
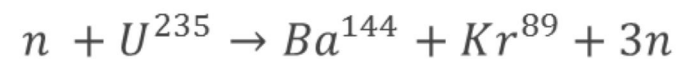
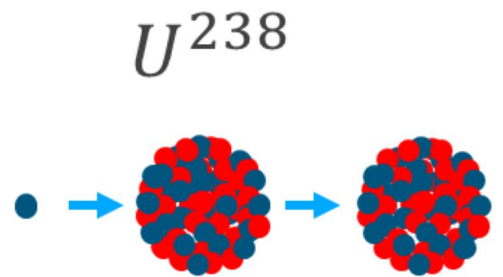
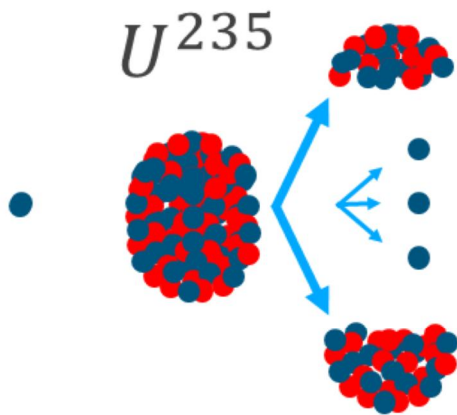
Maintenant, deux questions se posent:

- A. Comment sont produits les radio-isotopes ?
- B. Comment les manager ?

(Suite slide suivant)

Simplified nuclear reactions

Sources of radioactivity

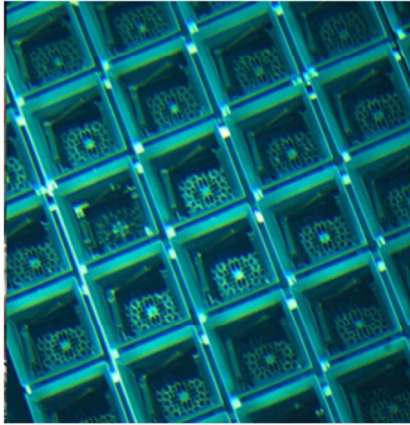


TRACTEBEL
ENGIE

16

- A. Des isotopes radioactifs sont générés lors du fonctionnement normal de la centrale. Deux réactions en sont à l'origine:
1. L'interaction d'un neutron avec un noyau fissile peut mener à une réaction de fission dont les produits sont plus légers que le noyau fissionné. Le temps de demi-vie (i.e. le temps nécessaire pour que la moitié des noyaux radioactifs se désintègrent) est inférieur à 30 ans. Ce sont des **déchets à vie courte**.
 2. A l'inverse, la capture d'un neutron par un noyau (ex: un noyau fertile) peut conduire à la conversion de celui-ci en un noyau plus lourd. Les actinides mineurs (ou transuraniens) sont caractérisés par un temps de demi-vie pouvant être de plusieurs milliers d'années voir centaines de milliers d'années. Ce sont les **déchets à vie longue**.

Intermediate storage



Wet storage, Tihange



Dry storage, Doel

Synatom [15]

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

17

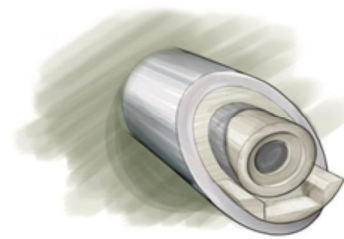
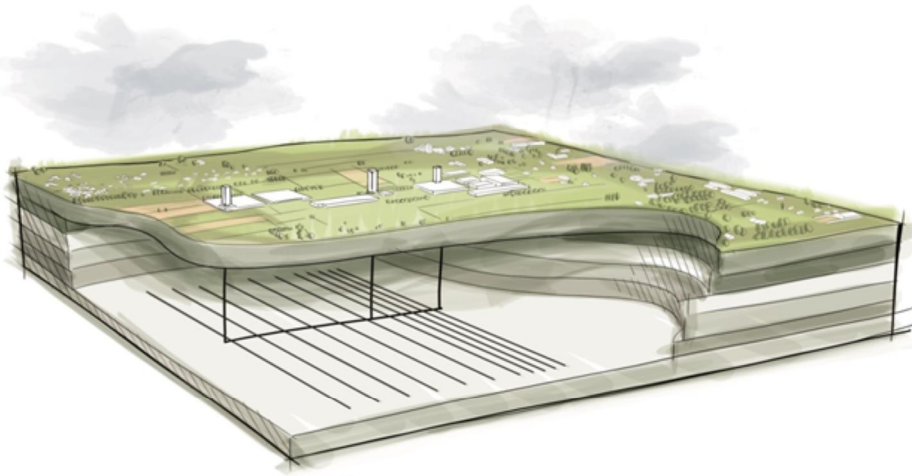
B. Vient alors la question de leur gestion ?

Après un séjour en réacteur (≈ 3 à 5ans en fonction des réacteurs), les assemblages combustibles sont déchargés et sont entreposés pendant 3 ans dans une piscine pour la première phase du refroidissement (*i.e.* décroissance radioactive des produits de fission à très courte vie). Après ce laps de temps, ils sont à nouveau déplacés pour un refroidissement à long terme, c'est le **stockage intermédiaire**:

1. A Tihange, ce stockage provisoire est à nouveau réalisé en piscine.
2. A Doel, le stockage se fait à sec dans des conteneurs dimensionnés à cet effet.

Le refroidissement opère naturellement, par conduction et convection (d'air ou d'eau).

Final geological disposal



ONDRAF [15]

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

18

Au terme du stockage intermédiaire, deux « routes existent » :

A. Le combustible usé est envoyé en usine de retraitement. Tel le tri sélectif des déchets ménagers dans les poubelles jaune, bleu et papier carton; l'ensemble du combustible usé est séparé en:

1. Produits de fission.
2. Uranium, qui est recyclé en nouveau combustible.
3. Actinides mineurs, donc les éléments lourds.

Une alternative existe où le plutonium est extrait en même temps que l'uranium afin d'être valorisé dans un combustible hybride, le MOX (pour Mixed Oxide). Le plutonium n'est donc ici plus un déchet puisqu'il est valorisé.

Les déchets restants, à haute activité et/ou à longue durée de vie, sont alors conditionnés: ils sont vitrifiés et puis emballés dans des couches successives d'acier et de béton. Le résultat est ce que l'on appelle un super conteneur.

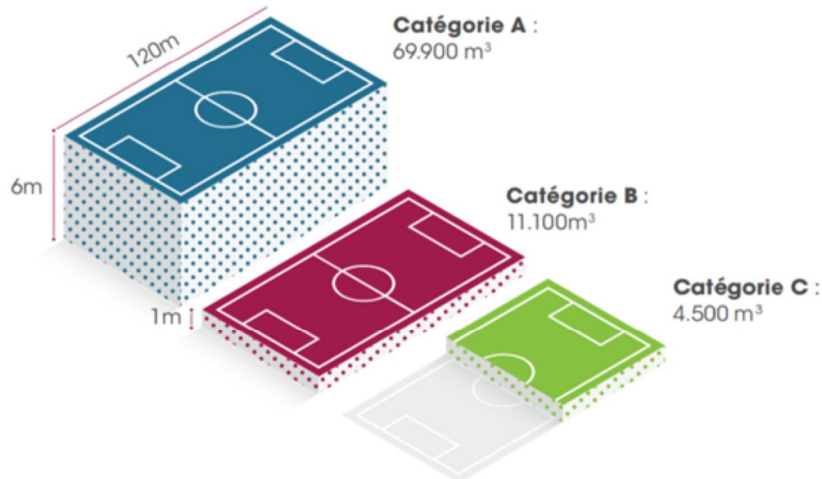
Ces conteneurs sont enfouis à plusieurs centaines de mètres sous terre, dans des galeries creusées à cet effet dans une couche géologique stable et très peu poreuse, par exemple l'argile. C'est l'enfouissement définitif des déchets (en: « final disposal »), qui est l'option internationalement retenue.

A l'international: des pays comme la Finlande, la France, les Pays-Bas... mettent déjà cette solution en application.

B. Une seconde option existe: le « once through » où le combustible est directement mis en stockage géologique. Il reste donc sous forme d'assemblage et n'est pas reprocessé.

En Belgique, l'ONDRAF et le SCK•CEN travaillent depuis plusieurs années sur cette solution en menant des expériences sur l'argile de Boom dans le laboratoire souterrain HADES.

Volume of Nuclear Waster per category



TRACTEBEL

ENGIE

25/04/2017

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

ONDRAF [15]

PUBLIC

Si la stratégie de l'enfouissement géologique offre une solution acceptable, c'est parce que le volume de déchet à traiter est limité et parfaitement gérable. En Belgique, la quantité de déchets à haute activité est de l'ordre de 50g par habitant par an. De ce fait, le volume total de déchet radioactif à enfouir qui serait produit sur 100 ans occupe un volume de la taille d'un terrain de foot sur 1,5m de haut (avant conditionnement) (source:

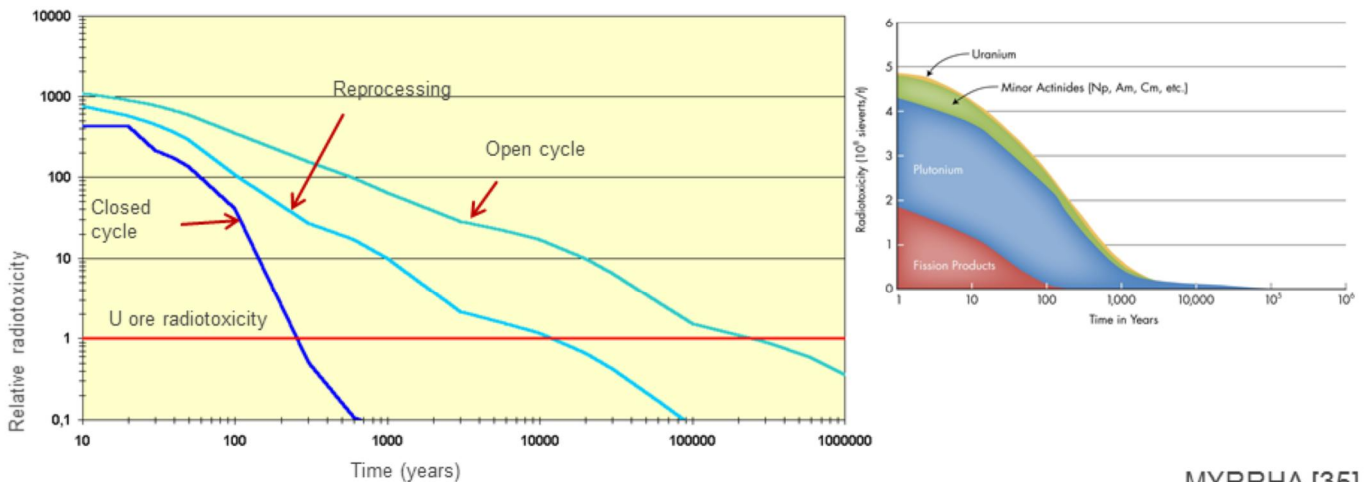
<https://www.forumnucleaire.be/campagne/dechets>).

Rem: seuls les déchets de catégorie B (longue durée de vie & faible activité) et les déchets de catégorie C (haute activité) sont sujets à l'enfouissement géologique. Les déchets de catégorie A (courte durée de vie et faible radioactivité) peuvent être stockés en surface.

Nuclear Waste



Lifetime of nuclear waste



TRACTEBEL



25/04/2017

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

MYRRHA [35]

PUBLIC

20

Dans une perspective long terme, car le nucléaire fera partie du mix énergétique de demain, la réflexion s'axe sur la réduction amont des volumes et des durées de vie des déchets à gérer.

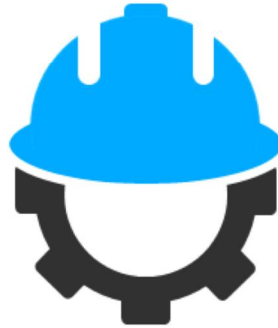
Comme nous l'avons vu, le « reprocessing » est l'une des stratégies possibles; le troisième chapitre abordera la question du cycle fermé.

Rem: le graphique de gauche exprime le niveau de radioactivité relatif à la radioactivité naturelle du minerai d'uranium tandis que le graphique de droite la décompose en ses principaux contributeurs et exprime la radioactivité en absolu.

What fundamentally distinguish nuclear from other energy sources ?



Waste



Safety



Cost

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

15

La seconde thématique abordée est celle de la sûreté nucléaire: en quoi une installation nucléaire est-elle différente d'une centrale au charbon ou d'une centrale au gaz ?

IAEA – SF-1 : Fundamental Safety Principles



Prevention of accidents

All practical efforts must be made to prevent and mitigate nuclear or radiation accidents.

- Main risk if any of 3 main safety functions is lost → preserve them
 1. **Control the reactivity** => no risk of excessive heat and confinement
 2. **Extract produced heat** => no risk of confinement loss
 3. **Confine the radioactive materials**

→ multiple barriers



=

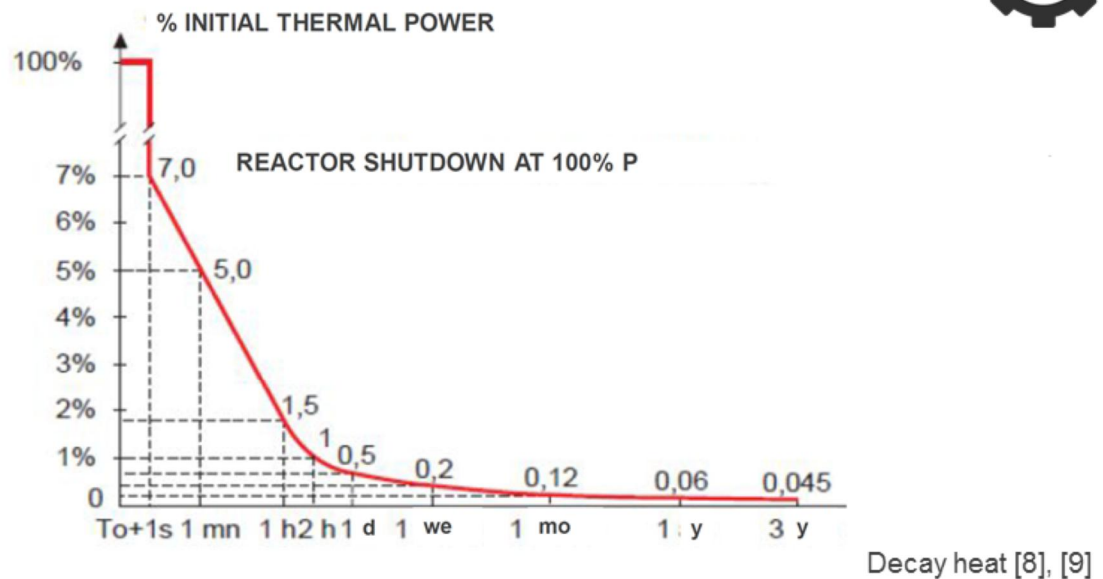


La gestion des accidents passe par: (1) la prévention, (2) l'anticipation & la détection et (3) la mitigation des conséquences.

Les trois fonctions des barrières de défenses sont: (1) le contrôle de la réactivité, (2) l'évacuation de la chaleur en toute circonstance et (3) le confinement des matières radioactives.

La stratégie mise en place consiste en la succession de barrières de défense: (1) la composition du combustible ainsi que sa gaine est la première barrière, (2) la cuve et les systèmes connectés est la seconde et enfin (3) la double enceinte de confinement qui protège également contre les évènements d'origine externe.

What happens after shutdown ?



TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Plette

23

Comme expliqué à la section précédente, des radio-isotopes sont générés lors du fonctionnement normal de la centrale.

Au temps t , peu importe le motif, si l'on arrête le réacteur, cet inventaire en radio-éléments est toujours présent dans le cœur du réacteur. En effet, l'arrêt de la réaction en chaîne ne signifie pas l'arrêt de production de chaleur au sein du réacteur: les produits de fission et d'activation présents continuent à subir des décroissances radioactives et émettent de ce fait de la chaleur. Chaleur qu'il faut continuer à évacuer, contrairement aux réacteurs chimiques où l'arrêt de la réaction signifie l'arrêt de la production de chaleur.

Un ordre de grandeur: après une heure de décroissance naturelle, la chaleur résiduelle dégagée est de l'ordre de 1 à 2% de la puissance nominale du réacteur ($\approx 30-60$ MWth pour une centrale de 1GWe).

Si cette chaleur n'est pas évacuée, le combustible monte alors progressivement en température; ce qui peut, au-delà d'un certain seuil, mener à la fusion (la fonte) du cœur du réacteur.

Une série de systèmes et de stratégies existent et sont mis en place pour prévenir ce genre de situation: le dénominateur commun restant l'évacuation des calories thermiques générées par l'inventaire radioactif du cœur du réacteur. (voir slide suivant).

Active and passive safety ?



Active system

Passive system

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

24

Pour comprendre comment cette caractéristique spécifique est adressée, prenons l'analogie suivante:

1. après avoir fini de cuisiner, l'alimentation en gaz n'est plus nécessaire. On prend alors la décision de couper manuellement son arrivée via la fermeture d'une vanne. En résumé, pour replacer le système dans un état sûr, on en a (1) non seulement pris la décision mais l'on a également (2) « dépensé de l'énergie » pour y arriver. C'est le principe de la **sûreté active**.

Ce principe, efficace, est largement mis en application dans les centrales actuelles où un ensemble de circuits redondants et diversifiés, composés de pompes et d'échangeurs de chaleur permettent l'évacuation de la chaleur résiduelle en toute circonstance.

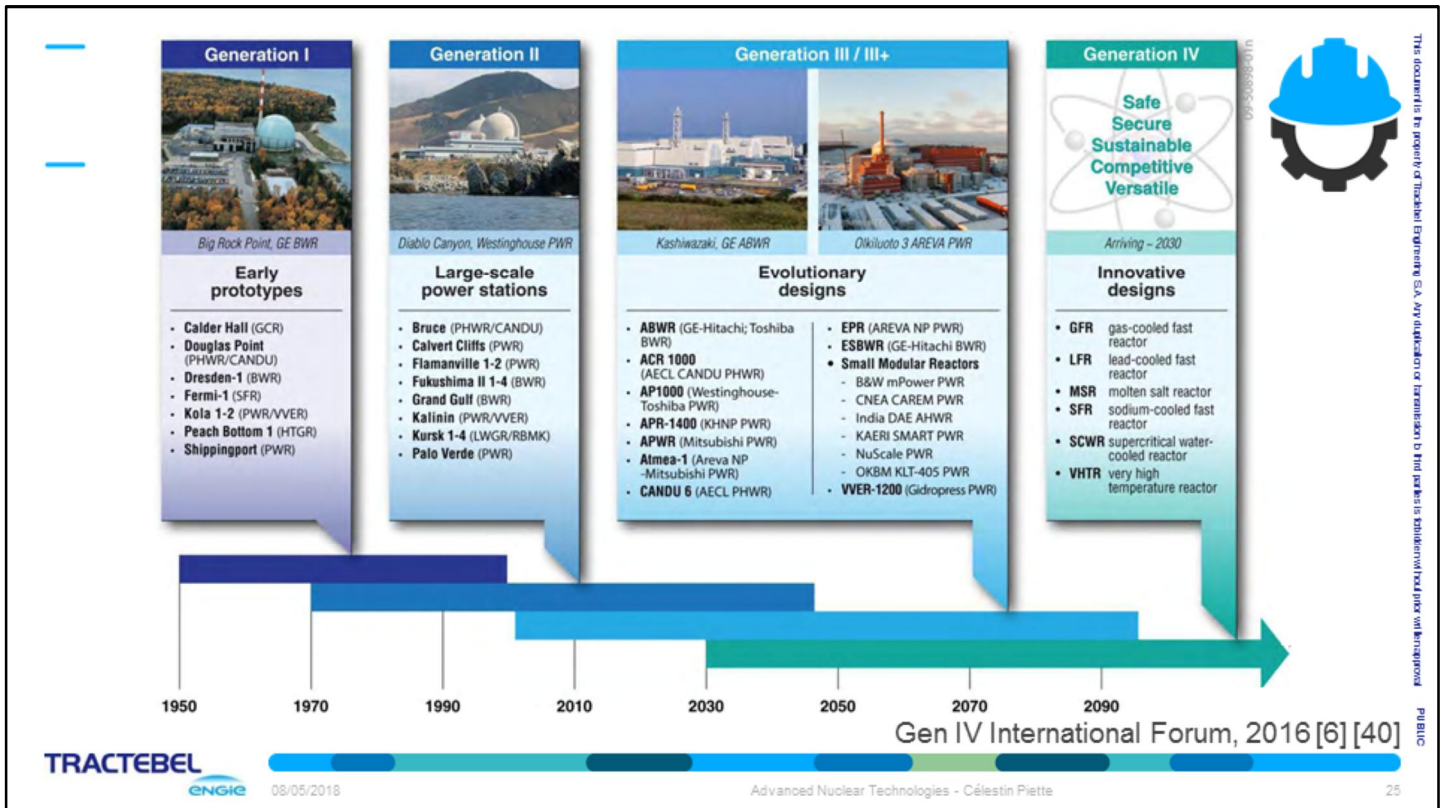
2. Maintenant, imaginons que pendant la cuisson, un courant d'air éteint la flamme de la gazinière. Si personne n'est dans la pièce, comment le système peut-il se mettre en sûreté ? Actuellement, un système de thermocouple permet, en l'absence de chaleur (*i.e.* extinction de la flamme) de couper automatiquement l'arrivée de gaz. Et ce, sans aucune intervention volontaire anthropique. Le système s'est remis **naturellement** dans un état sûr. On parle alors de **sûreté passive**.

Des applications de sûreté passive existent déjà dans les centrales actuellement en opération:

1. En fonctionnement, le principal mécanisme de sûreté passive est l'anti-réactivité du réacteur:
 - i. En cas d'augmentation de puissance/température, le système tend à s'auto-balancer et à diminuer naturellement la puissance (en partie dû à l'effet Doppler).
 - ii. En cas de perte de caloporteur, la réaction en chaîne tend à s'arrêter (voir 32 & 33 sur la modération).
2. Les accumulateurs sont des ballons d'eau borée maintenus sous pression et connectés au circuit primaire. Cette pression reste cependant inférieure à la pression du circuit primaire; si bien que, en cas de dépressurisation du circuit primaire l'inventaire du ballon est naturellement déchargé dans le circuit primaire.
3. Les recombinateurs sont des plaques de platine disposées à plusieurs endroits du bâtiment réacteur. Dans un scénario accidentel où le combustible atteint une température trop élevée, une réaction catalytique en l'eau et le zirconium (composant de la gaine de combustible) prend place, produisant de l'hydrogène en oxydant la gaine de zirconium. Passé une certaine concentration, les deux composés peuvent violemment réagir: c'est ce qui s'est produit lors de l'accident de Fukushima.

Les recombinateurs installés dans les centrales belges permettent de prévenir cette situation: l'hydrogène et l'oxygène dégagés, au contact du catalyseur de platine, se recombinent sous forme d'eau et ce, naturellement (spontanément). C'est le principe même de la pile à combustible.

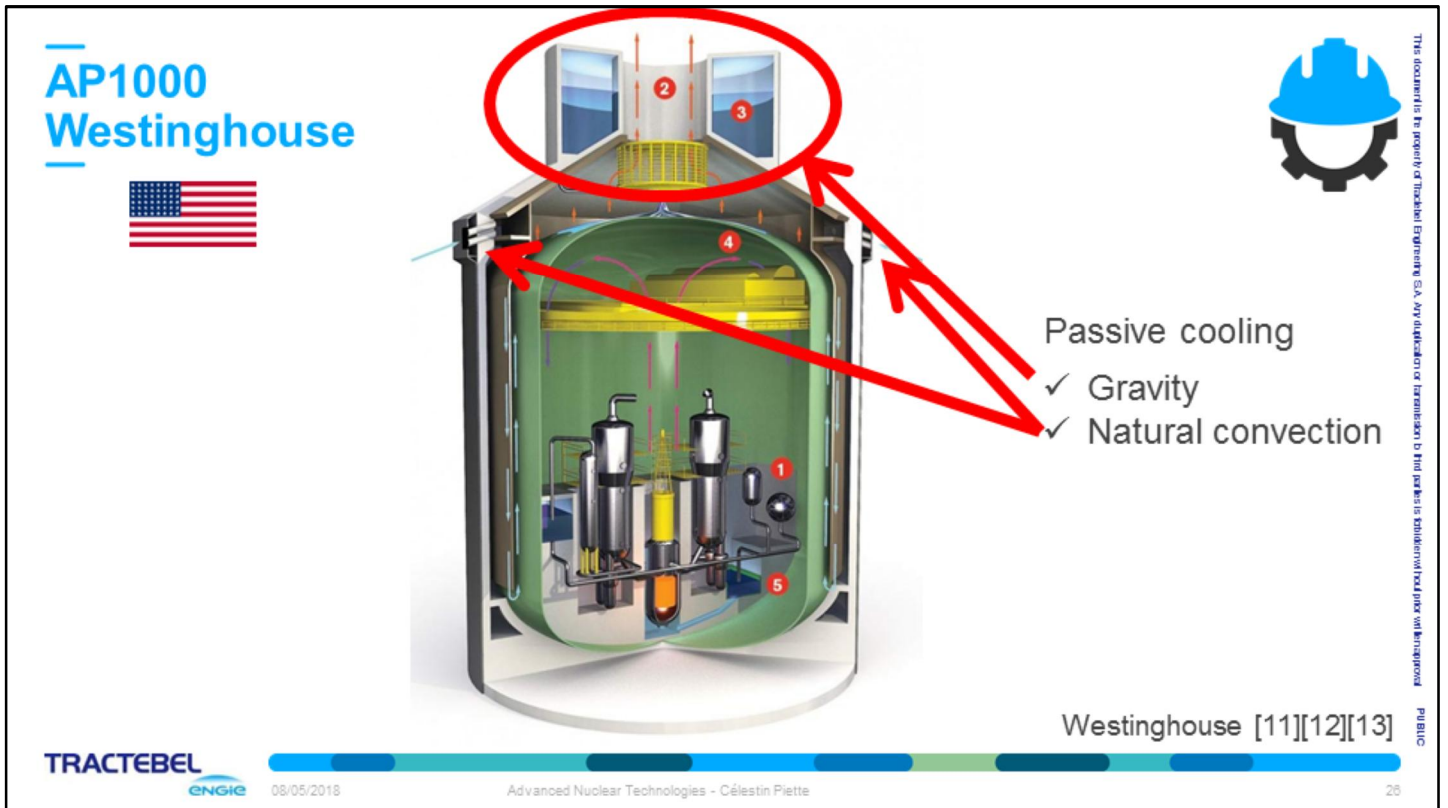
La redondance et la complémentarité des systèmes de secours est essentielle. Le mix systèmes actif/passif présente un grand intérêt.



La quasi-totalité des réacteurs actuellement en fonctionnement sont dit de génération II et ils accumulent plus de 17.000 ans d'expérience opérationnelle: autant de retour d'expérience que d'amélioration régulière des systèmes, des équipements, des procédures et des formations dispensées aux opérateurs.

Dans un contexte d'amélioration industrielle continue, les réacteurs de nouvelle génération, actuellement en construction (comme l'EPR Français et l'AP1000 Américain), implémentent ces évolutions, dès la conception, pour améliorer le design des générations précédentes. Et ce, basé sur l'expérience accumulée par l'opération des réacteurs existants.

Et notamment, pour le volet sûreté, plusieurs concepts de cette nouvelle génération accentuent la présence de système de sûreté passive en exploitant la physique des systèmes plutôt que les installations (slide suivant).



C'est le cas par exemple de l'AP1000 (pour Advanced Passive) de Westinghouse qui, en particulier, place cette dimension en avant.

Pour la beauté de la réflexion, plaçons nous dans un scénario accidentel où l'ensemble des alimentations électriques principales et de secours de la centrale seraient hors service; ce qui s'est par exemple produit à Fukushima où le tsunami a noyé l'ensemble des groupes diesels de secours.

La chaleur résiduelle n'est dans ces conditions plus évacuée par l'intermédiaire des générateurs de vapeur mais par un réservoir d'eau ouvert (en jaune sur l'image). La chaleur transférée à ce réservoir chauffe son contenu qui s'évapore progressivement. La vapeur produite remplit l'enceinte métallique qui monte en pression et en température.

La paroi de l'enceinte est arrosée par l'eau d'un réservoir placé sur le toit du réacteur qui s'écoule naturellement par gravité. L'évacuation de la chaleur est accentuée un flux d'air qui circule le long des parois par convection naturelle.

Pour reprendre l'analogie de la cuisine, que fait-on pour refroidir une marmite à pression ? On place celle-ci sous le robinet d'eau, ce qui refroidit et condense la vapeur qu'elle contient.

En résumé, il est prévu par conception, que la chaleur résiduelle puisse s'évacuer naturellement (passivement) sans nécessiter d'intervention extérieure ou de source d'énergie. Et ce, pour un délai de 72h. Ces fonctions de refroidissement peuvent être indéfiniment prolongées si les inventaires en eaux sont remplis (voir vidéos référencées pour plus de détails).

What fundamentally distinguish nuclear from other energy sources ?



Waste



Safety



Cost

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

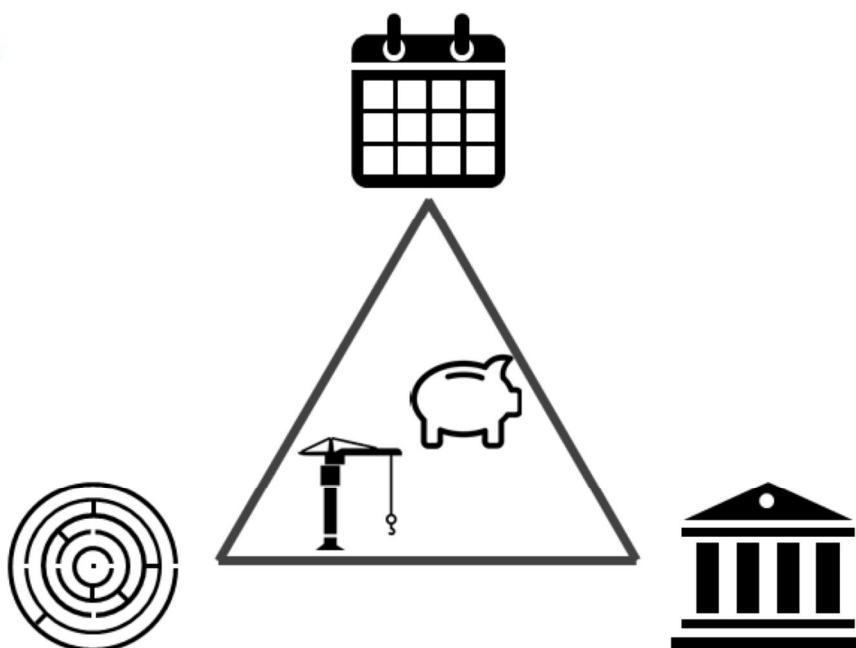
15

Document confidentiel
PUBLIC

Vient maintenant la troisième thématique: la dimension **économique** des grands projets nucléaires. En effet, comme pour les barrages hydroélectriques, les constructions nucléaires sont caractérisées par d'importants coûts de construction (*i.e.* d'investissement); en absolu (*i.e.* montant total) et en relatif (*i.e.* rapporté à l'unité de puissance installée). Ces coûts de constructions étant:

1. Amortis sur l'importante durée de vie de vie du projet: 40 ans, 60 ans pour les nouvelles constructions et pour les LTO (Long Term Operation) des centrales existantes. Les Américains portent actuellement les discussions sur une prolongation à 80 ans.
2. Compensés par des coûts de fonctionnement (opération, maintenance, combustible...) relativement faibles.

Challenges



TRACTEBEL



08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

Jancovici [41][42]

PUBLIC

28

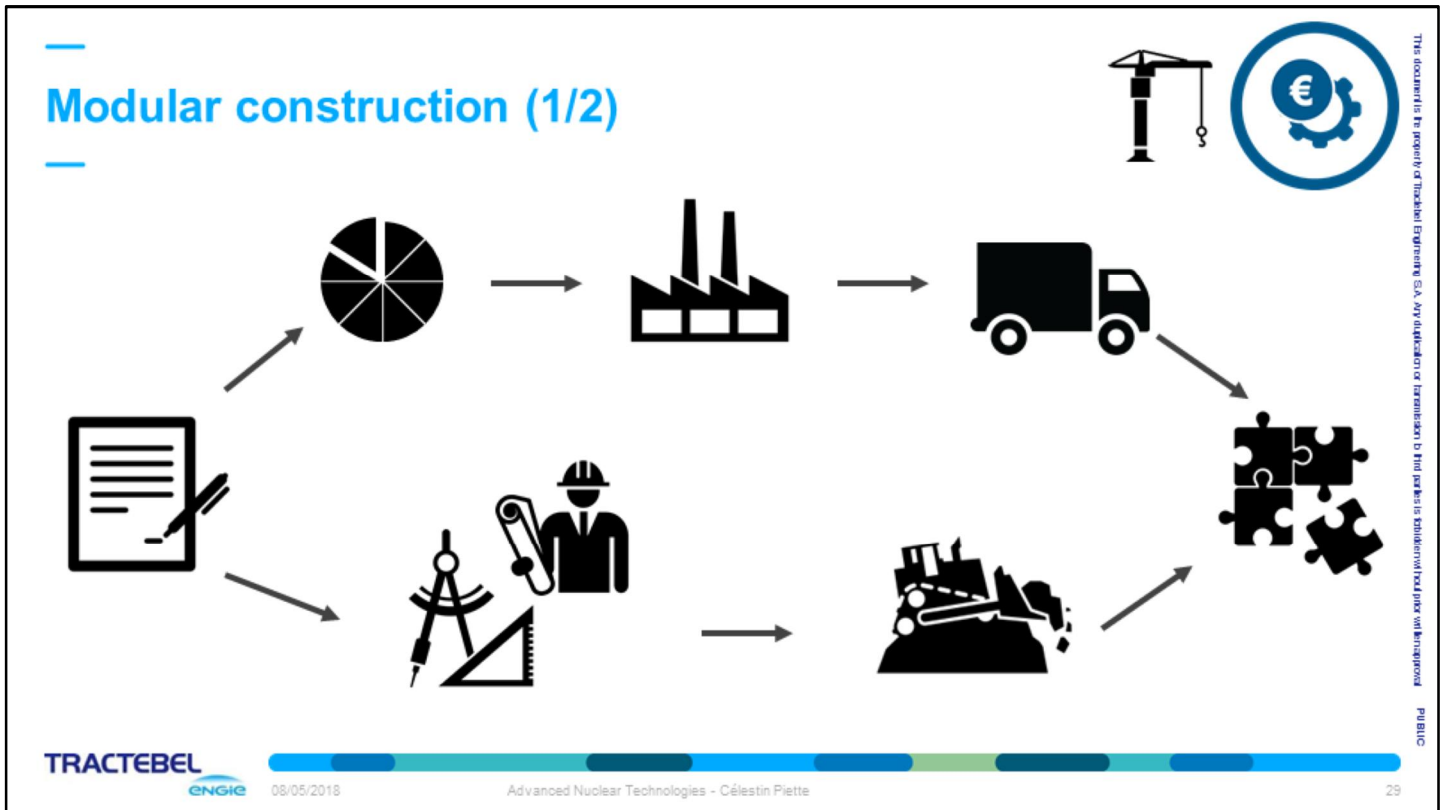
Cette dimension économique se présente actuellement comme un challenge pour le secteur:

1. Un constat assez retentissant qui ressort des chantiers nucléaires actuels, c'est l'accroissement continu des **délais de construction**. Ce qui s'accompagne par des pénalités de retard et/ou par une perte de crédibilité.
2. De plus, la **rentabilité** des grands projets nucléaires est conditionnée par deux dimensions:
 - i. La dimension **matérielle**: directement liée à la construction du génie-civil, des équipements et de la main d'œuvre. Ce sont ce qu'on appelle les « overnight cost ». Pour mieux comprendre, imaginons que l'on arrête le temps et que la centrale soit construite en 1 seule nuit, combien est-ce que cela coûte ?
 - ii. Et la seconde dimension est la dimension **financière**. Une centrale coûte plusieurs milliards d'euros, il est impossible pour une entreprise de la construire sur fond propre. Elle va donc emprunter le financement à des investisseurs qui vont exiger en retour des intérêts. Au plus la construction est longue et au plus le projet est incertain et au plus les intérêts exigés par les investisseurs seront élevés.

Et cette dimension n'est pas à sous-estimer puisqu'elle peut être même plus importante que la dimension matérielle. Si la rémunération des investisseurs se fait à hauteur de 2%, alors le coût de revient de l'électricité produite sera de l'ordre 40 euros/MWh alors que si les investisseurs sont rémunérés à hauteur de 10%, le coût de revient de l'électricité sera de plus 100 euros du MWh dont 64 euros iront aux financiers. (Rem: ce sont les coûts projetés pour les nouvelles constructions. Ces coûts n'étant pas représentatifs des constructions existantes, déjà amorties).
3. Et c'est la **complexité** des projets qui induit des délais de construction accrus et des incertitudes grandissantes: non seulement de par leur taille (challenges quant à la coordination des acteurs) mais également au niveau de l'expertise et du « know-how » qui est à construire ou à restaurer lors de l'apparition d'un nouveau design ou d'une nouvelle technologie. A titre d'exemple, le chantier de Flamanville et celui de Olkiluoto étaient les premiers nouveaux chantiers nucléaires en Europe depuis 2 décennies. Il a donc fallu un investissement considérable pour remettre l'industrie Européenne à la hauteur des standards de qualité qu'exige le secteur nucléaire.

Deux points sur lesquels on essaie de jouer pour remédier à ces challenges, c'est la **constructibilité** du projet d'une part et la **financement** d'autre part.

Commençons par la constructibilité, une des manières très tendance pour améliorer la constructibilité, c'est l'approche **modulaire**.

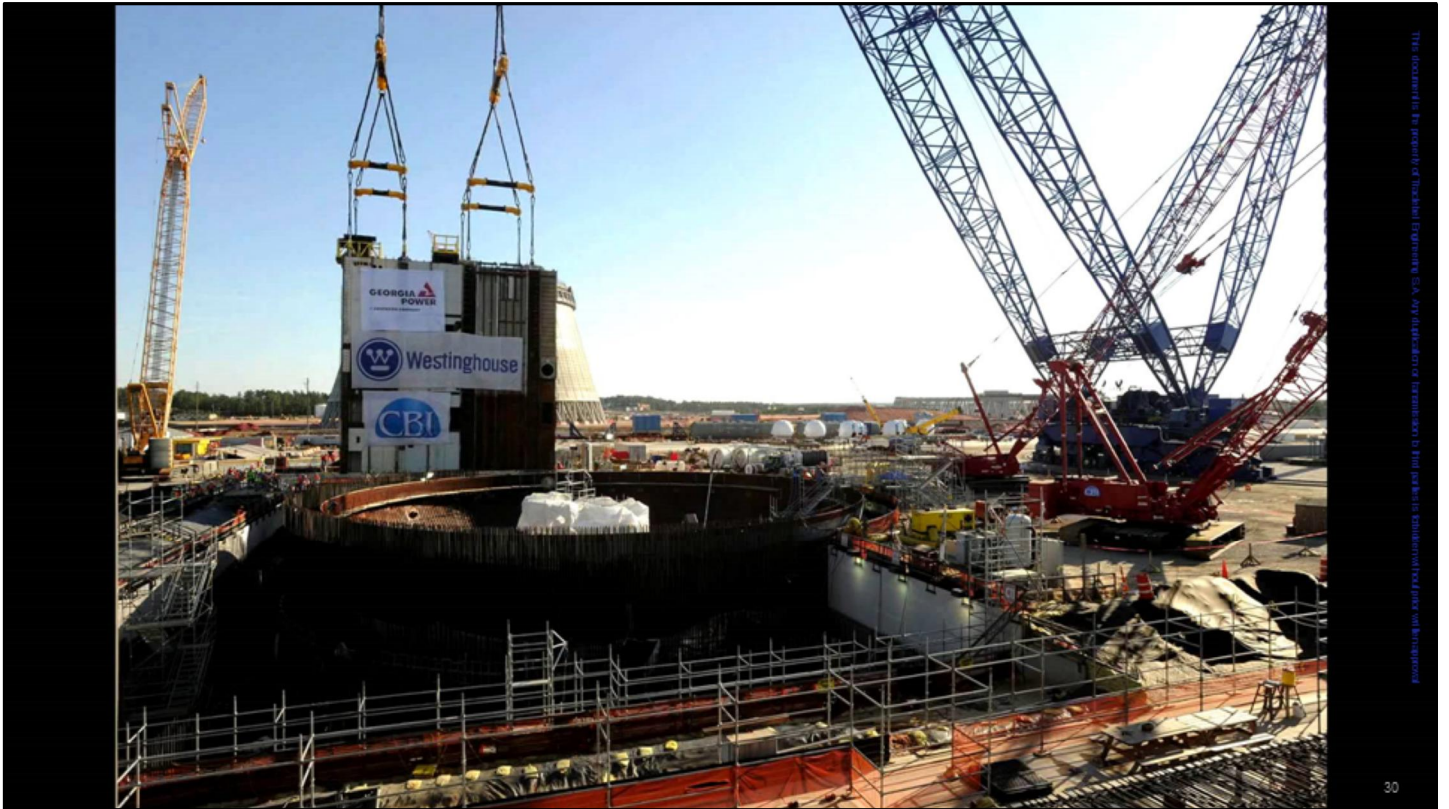


La **modularité** se caractérise par:

1. la subdivision de la centrale en un ensemble de modules élémentaires,
2. construits en usine,
3. amenés sur site par camion,
4. Assemblés sur site,
5. permettant, en parallèle de préparer le site de construction.

Les avantages de la construction modulaire sont:

- La mise en parallèle d'étapes de la construction qui devaient traditionnellement se construire séquentiellement,
- Le désengorgement des sites de construction en rapatriant un maximum de l'ouvrage en usine où sont concentrés le savoir faire et les outils de fabrication spécialisés.
- Ce à quoi sont associés, une réduction des coûts et des délais de construction ainsi qu'une diminution des risques et incertitudes liés à la taille de l'ouvrage.



Crédit illustration: Southern Company
(<https://www.youtube.com/watch?v=dr8R64cO1-Q>)

SMR – Small Modular Reactor A new paradigm ?



*“Advanced reactors that produce electric power up to **300 MW(e)**, designed to be built in **factories** and **shipped** to utilities for installation as demand **arises**”*

- International Atomic Energy Agency (IAEA) [17]



Si l'on pousse la réflexion à son maximum, l'idée de serait de construire l'intégralité du réacteur en usine. Et c'est là que l'approche SMR (Small Modular Reactor) intervient.

L'approche SMR consiste en:

1. la réduction de la taille du réacteur et en la modification de son design,
2. permettant sa fabrication sur une chaîne de production; de la même manière que Boeing et Airbus procèdent pour la fabrication de leurs avions de ligne.
3. Le réacteur est alors amené sur site pour installation.

L'**espoir** étant que l'économie de volume compense l'économie d'échelle que présente les grands réacteurs actuels.

SMR

A few PWR concepts







KLT-40s [19a][19b]





Nuscale [18]





08/05/2018 Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

32

Avant toute chose, ce qu'il faut bien comprendre, c'est que le SMR n'est pas un produit, c'est une approche qui se décline en plus d'une cinquantaine de concepts.

A titre d'exemple:

- Le Canada soutient particulièrement le développement de la technologie et souhaite accueillir jusqu'à 2 démonstrateurs de SMR sur le site du laboratoire national de Chalk River. Lors de leur ROI (Request Of Interest), ils ont reçu 80 réponses de 381 organisations dont 22 développeurs de réacteurs:
http://www.cnl.ca/site/media/Parent/CNL_SmModularReactor_Report.pdf
- Le Royaume-Unis poursuit la même stratégie:
<https://www.gov.uk/government/publications/small-modular-reactors-techno-economic-assessment>

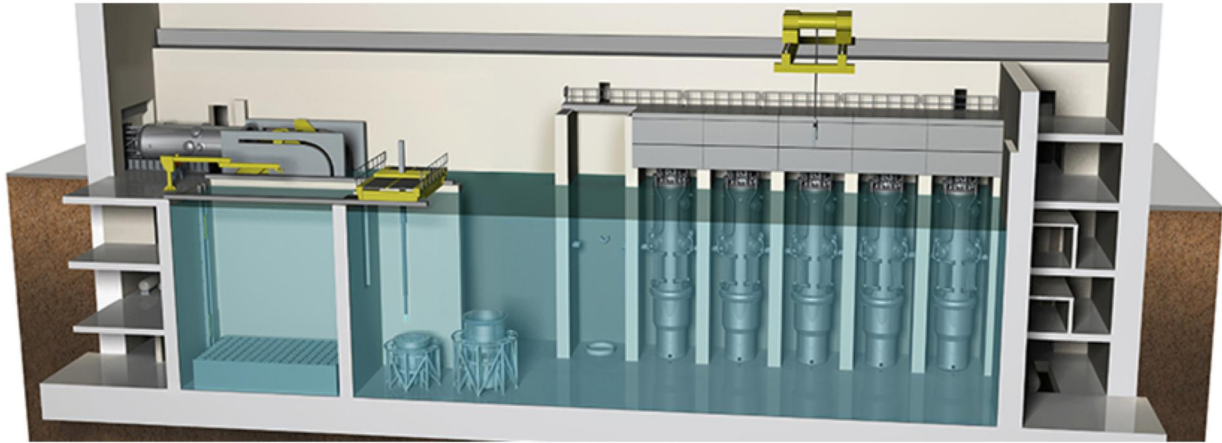
Ici sont présentés deux designs qui permettent d'expliciter les application potentielles du SMR:

1. Le modèle KLT-40s, design russe, réacteur flottant qui est une adaptation du KLT-40 qui était utilisé dans les brise-glaces commerciaux. Ce concept présente l'avantage d'être mobile et donc peut être utilisé pour des applications côtières mais également pour l'exploration offshore.

Et ceci traduit le premier avantage des SMR qui est d'être complémentaire au réacteur de grande taille: applications mobiles et temporaires, décentralisées et hors du réseau (qui présente un grand avantage aux US et au Canada), ou justement pour les réseaux de faible capacité (il est de bon ton de limiter la puissance de chaque nouvelle unité de production d'énergie à 10% de la capacité du réseau. Et ce, pour des questions de stabilité).

2. Et le concept NuScale, concept américain, qui est à ce jour le plus abouti aux Etats-Unis.

Nuscale (1/2) Layout



NuScale [18]

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

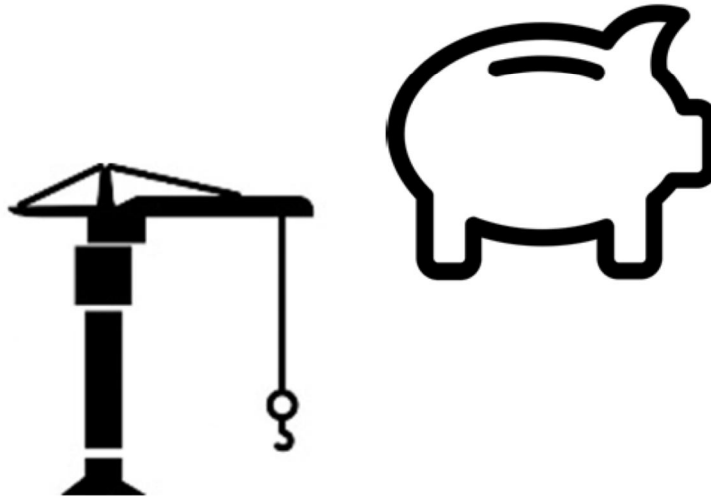
Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

33

La modélisation suivante illustre l'approche modulaire: une infrastructure conventionnelle commune est construite pour abriter une série de réacteurs (de modules) individuels. La centrale peut produire de l'électricité dès la mise en place du premier réacteur et progressivement monter en puissance à mesure que les réacteurs sont ajoutés. L'idée est ici de répartir la puissance totale de la centrale en plusieurs réacteurs autonomes, ce qui permet de bénéficier au maximum des avantages de la modularisation comme expliqué précédemment.

Le département de l'énergie pour accélérer le développement de la technologie, a proposé d'accueillir le premier démonstrateur sur son site de l'Idaho National Lab. La préparation du site a commencé, le processus de certification est en cours et la fin de la construction est prévue pour 2026...

Constructability - Financeability



TRACTEBEL

ENGIE

25/04/2017

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

34

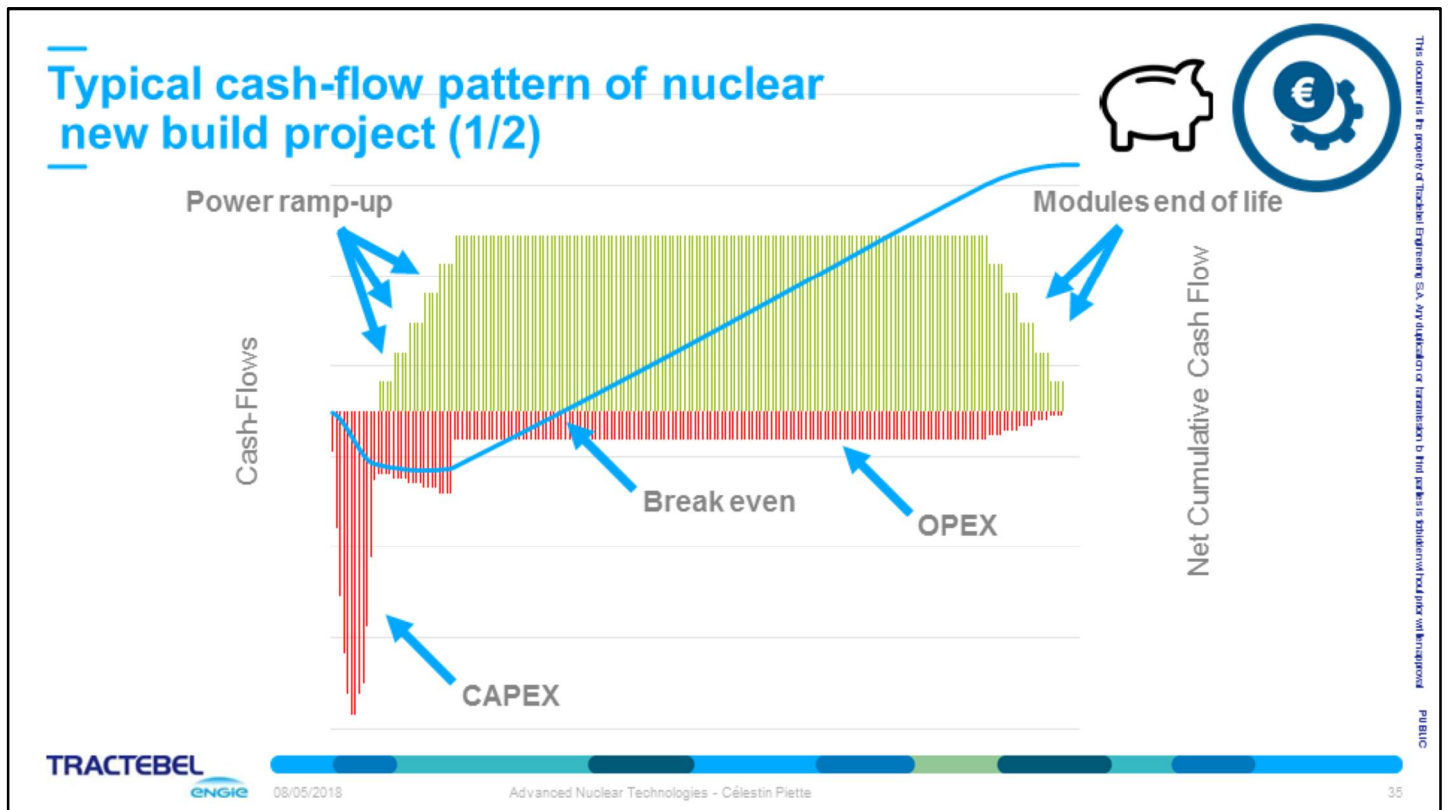
Ceci clôture donc les aspects de modularisation et l'approche SMR pour faciliter la construction des centrales nucléaires.

Pour synthèse, l'approche SMR permet de (1) d'accéder à de nouveau marché et de nouvelles applications et (2) dans certains contextes, faciliter la construction de centrales nucléaires.

Pour mettre cette notion en perspective, il faut savoir que les Coréens qui n'ont jamais réellement mis en pause leur programme nucléaire ont maintenu cette compétence de construction. On le voit par exemple à Barakah aux Emirats Arabes Unis où 4 unités sont actuellement en construction avec la première qui vient de se terminer... On time and on budget.

Donc le message clef ici est que les SMRs ne sont pas conçus pour remplacer les réacteurs de grande puissance, non. Ils sont là pour compléter l'offre actuelle du secteur.

La seconde dimension que nous allons aborder est celle de la capacité de financement des projets nucléaires. Comme mot d'introduction, il est bon de savoir que le projet Hinkley Point C, en Angleterre, est le plus grand chantier européen en construction (toute industrie/infrastructure confondue).



Le graphique suivant présente l'allure générale des cash-flow d'un projet nucléaire:

- Les CAPEX (CAPital Expenses) d'investissement de début de projet sont relativement importants en comparaison des;
- OPEX (Operational Expenses) qui sont les dépenses de fonctionnement de la centrale (combustible, frais opérationnels, maintenance).

Les projets nucléaires sont donc lourds en investissement (plusieurs milliards d'euros) mais contrebalancés par: (1) un amortissement sur la longue durée de vie de ces assets énergétiques et (2) de relativement faibles coûts opérationnels.

La faible part du combustible (et plus précisément du minerai, qui est la composante du combustible sujet à la volatilité des marchés) dans le coût de production du kWh électrique, combiné au très haut taux de disponibilité (à savoir que les centrales nucléaires sont des assets pilotables), offre une (1) stabilité et (2) une prévisibilité à très long terme sur les coûts de production de l'électricité.

Et la question est: « quels sont les acteurs qui sont particulièrement friands de cette stabilité et prévisibilité ? » -> les industries électro-intensives.

La représentation qui est affichée ici est dite « comptable » (qu'est-ce qui rentre et qu'est-ce qui sort ?). On parle également de comptabilité de caisse: de la même manière qu'un épicier qui a acheté un stock de fruits pour un montant de 100 et qui conclut en fin de journée que l'activité a été rentable car le tiroir caisse contient 110.

Financial aspects Introduction

Listen to your first instinct...

“Would you rather have 1000€ today or 1100 € in 10 years ?”

Time has a value

“What seems more fair when playing the roulette game? Double your bet when you pick the right number or when you guess the right colour ?”

Risk must be rewarded

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{FCF_t}{(1 + WACC)^t}$$

NPV = Net Present Value

FCF = Free Cash Flow

WACC = Weighted Average Cost of Capital

TRACTEBEL



08/05/2018

Preliminary Lead SMR Cost Economic Study - Célestin Piette

36



Comme nous venons de voir, les projets nucléaires sont des investissements des plusieurs milliards d'euros avec des échéances de temps de plusieurs dizaine d'années. L'approche comptable "naïve" n'est pas applicable ici et c'est là qu'intervient la dimension financière.

Pour introduire le sujet, prenons deux analogies:

1. Que préférez-vous ? Recevoir 1000 euros aujourd'hui ou 1100 euros dans 10 ans ? La réponse est assez triviale: nous préférons tous recevoir les 1000 euros aujourd'hui.... La raison est que le **temps** a de la valeur et donc que le timing des cash-flow est crucial.
2. Qu'est-ce qui vous semble le plus équitable en jouant à la roulette au casino ? Doubler sa mise lorsque l'on anticipe la bonne couleur ou lorsqu'on devine le bon chiffre ? Ici aussi la réponse tombe sous le sens. Ce qui traduit le fait que la prise de **risque** doit être récompensée à sa juste hauteur.

Et c'est en fait le principe central de la finance, à savoir que: la **valeur** actuelle nette d'un projet est équivalente à la somme de ses cash-flow, actualisés par rapport (1) au niveau de risque perçu du projet et (2) au timing d'apparition des flux d'argent.

Typical cash-flow pattern of nuclear new build project (2/2)



TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

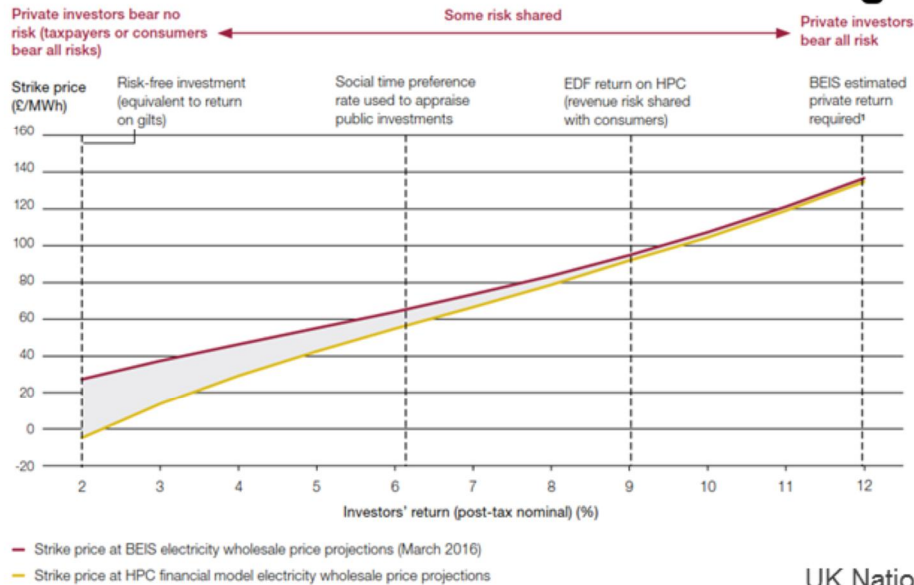
37

Le graphique suivant traduit parfaitement cette dimension où:

1. On observe que, à montant égal, la valeur associée à un cash-flow se réduit à mesure que le temps passe. Il y a une érosion temporelle de la valeur;
2. La rentabilité du projet est impactée, ce qui est visible par le recul temporel du point de "break-even".

Ce constat est d'autant plus accentué que le niveau de risque perçu par les investisseurs est important.

Strike price according to risk sharing model



UK National Audit Office [48]



08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

38

La cour des comptes Anglaise a mis en évidence, dans son étude sur le contrat de Hinkley Point C, l'importante sensibilité des projets nucléaires (ou de manière générale, des projets « capital intensive »), au taux de rentabilité exigé par les investisseurs (qui est proportionnel au niveau de risque perçu du projet).

Pour réduire le risque perçu deux stratégies existent:

1. Premièrement, et c'est tout le point soulevé par l'étude de la cour des comptes anglaise, à savoir une meilleure répartition du risque entre chacune des parties prenantes au projet: ce qui es typiquement le cas quand le constructeur n'est pas le seul investisseur mais que les consommateurs finaux prennent également part à l'investissement (ce système a été par exemple mis en place avec TVO pour la construction de l'EPR de Olkiluoto).

Un ordre de grandeur à retenir: la rentabilité exigée pour le projet d'Hinkley Point C où l'essentiel du risque est concentré chez le constructeur est de l'ordre de 9%. Tandis que le modèle Mankala de TVO suggère un taux attendu de 5% [47].

Remarque: en Russie et en Chine les entreprises nucléaires sont étatiques, ce qui signifie que les financements des projets se font à très faibles taux: de l'ordre de 4%. C'est une des raisons pour lesquels ≈70% des projets de construction nucléaire dans le monde sont d'initiative russe ou chinoise [39].

Le message clef de cette étude est: le risque, ça se partage ou ça se paie cash.

2. Deuxièmement, réduire les risques intrinsèques du projet. On rassemble les risques projets autour de 4 grandes familles:
 1. Le risque de marché: associé à l'incertitude et à la volatilité des prix futurs de vente sur le marché de l'électricité;
 2. Le risque d'exécution: principalement le risque de construction (délais et dépassement de budget, problème de qualité);
 3. Le risque opérationnel: incertitude sur la future disponibilité des installations (qualité des maintenances, optimisation des programmes de rechargements, pannes imprévues...);
 4. Le risque environnemental: incertitude liée à (1) l'évolution de la réglementation sur la pollution (déchets industriels, gestion des déchets nucléaire, limitation de l'élévation de température de l'eau de refroidissement), (2) la question du nucléaire étant dans certains pays une question politique, le risque lié à un changement de majorité.



Dans le cas particulier du risque d'exécution, l'approche SMR est l'une des réponses qu'apporte le secteur:

- Parce que l'investissement initial est réduit: (1) le risque financier inhérent au projet est réduit et (2) un plus grand nombre d'acteurs vont pouvoir prendre part aux projets;
- Parce que le projet est plus petit, il va y avoir une facilitation de la constructibilité: standardisation, modularité, réduction du nombre d'acteur à coordonner...

En conclusion, si il fallait retenir deux choses de ce chapitre:

1. L'approche SMR est une des réponses apportée par le secteur pour dérisquer les projets nucléaires: nouvelles opportunités de marché, meilleure constructibilité et financement plus aisé;
2. Comme l'ont montré la Corée, la Russie et la Chine, une industrie forte & expérimentée ainsi qu'un cadre réglementaire stable seront toujours la meilleure des réponses au risque d'exécution.

—
What fundamentally distinguish nuclear from other energy sources ?
—



Waste



Safety



Cost

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Plette

15

© 2018 ENGIE

Ceci clôture donc l'analyse des caractéristiques intrinsèques de la branche nucléaire.

CONTENTS

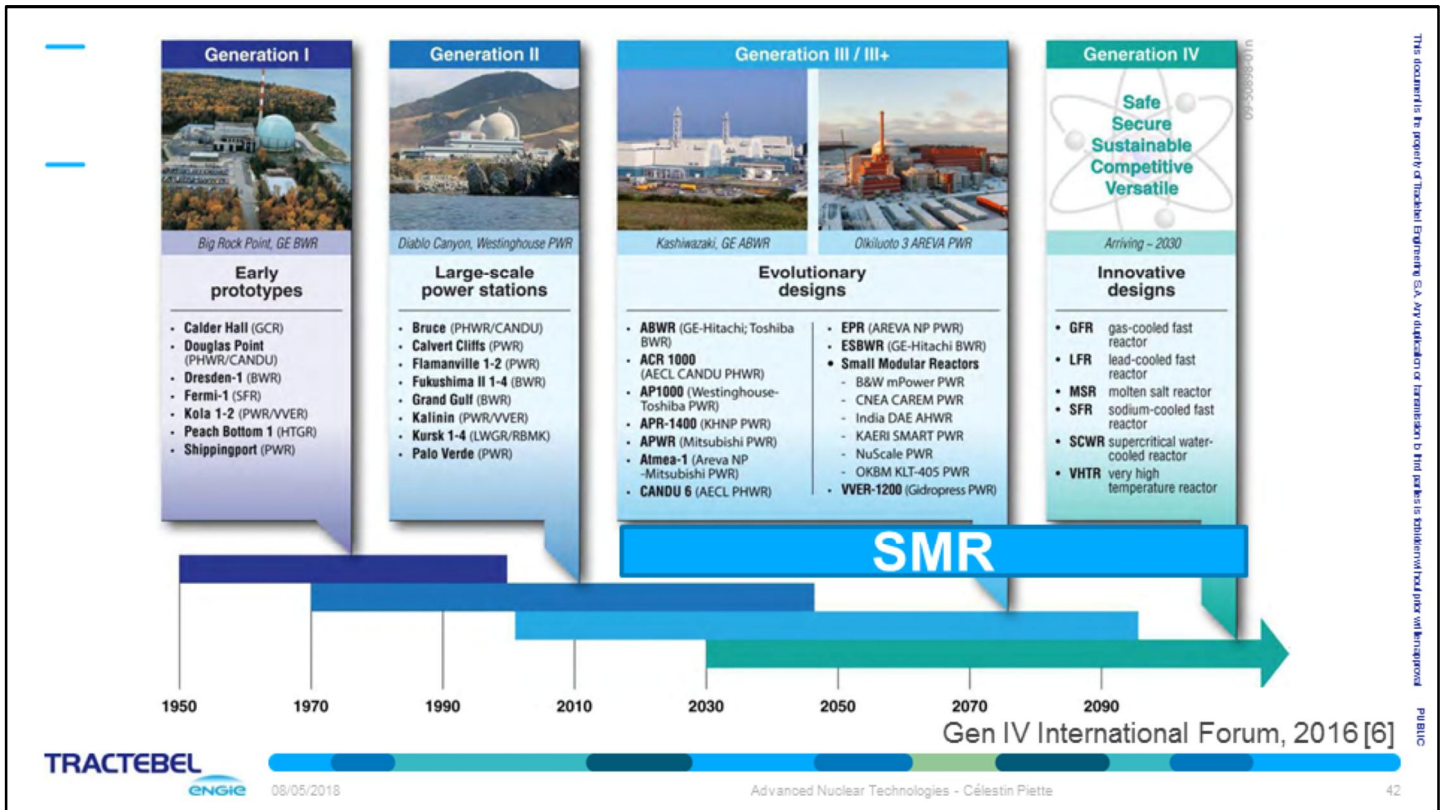
- Who ?
- How ?
- What ?
- Which ?

- Scope & Methodology
- A global context...
- Nuclear main features ?
- **A sustainable nuclear reactor ?**
- Let's conclude by discussing !

08/05/2018
Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

This document is the property of Tractebel Engineering S.A. Any dissemination or transmission to third parties is strictly prohibited without approval. PUBLIC

Maintenant, dans le cadre d'une vision long terme de production d'énergie durable. Comment le secteur organise-t-il la réflexion ?



Parce que le nucléaire fera partie du mix énergétique de demain, c'est dans une optique long terme que la recherche scientifique et l'innovation technologique s'inscrivent dans une logique qui cherche à renforcer la durabilité du secteur.

Et c'est ici qu'interviennent les réacteurs de génération IV, la prochaine génération de réacteur, actuellement en développement.

What are Generation IV systems? Requirements of the GIF Charter



- *Generate energy sustainably and promote long-term availability of nuclear fuel.*
- *Minimise nuclear waste and reduce the long term stewardship burden*
- *Have a very low likelihood and degree of reactor core damage.*
- *Eliminate the need for offsite emergency response.*
- *Excel in safety and reliability.*
- *Have a life cycle cost advantage over other energy sources.*
- *Have a level of financial risk comparable to other energy projects.*
- *Be a very unattractive route for diversion or theft of weapon-usable materials, and provide increased physical protection against acts of terrorism.*

Sustainability

Reliability & Safety

Economics

Proliferation resistance & physical protection

Gen IV International Forum [6]

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

43

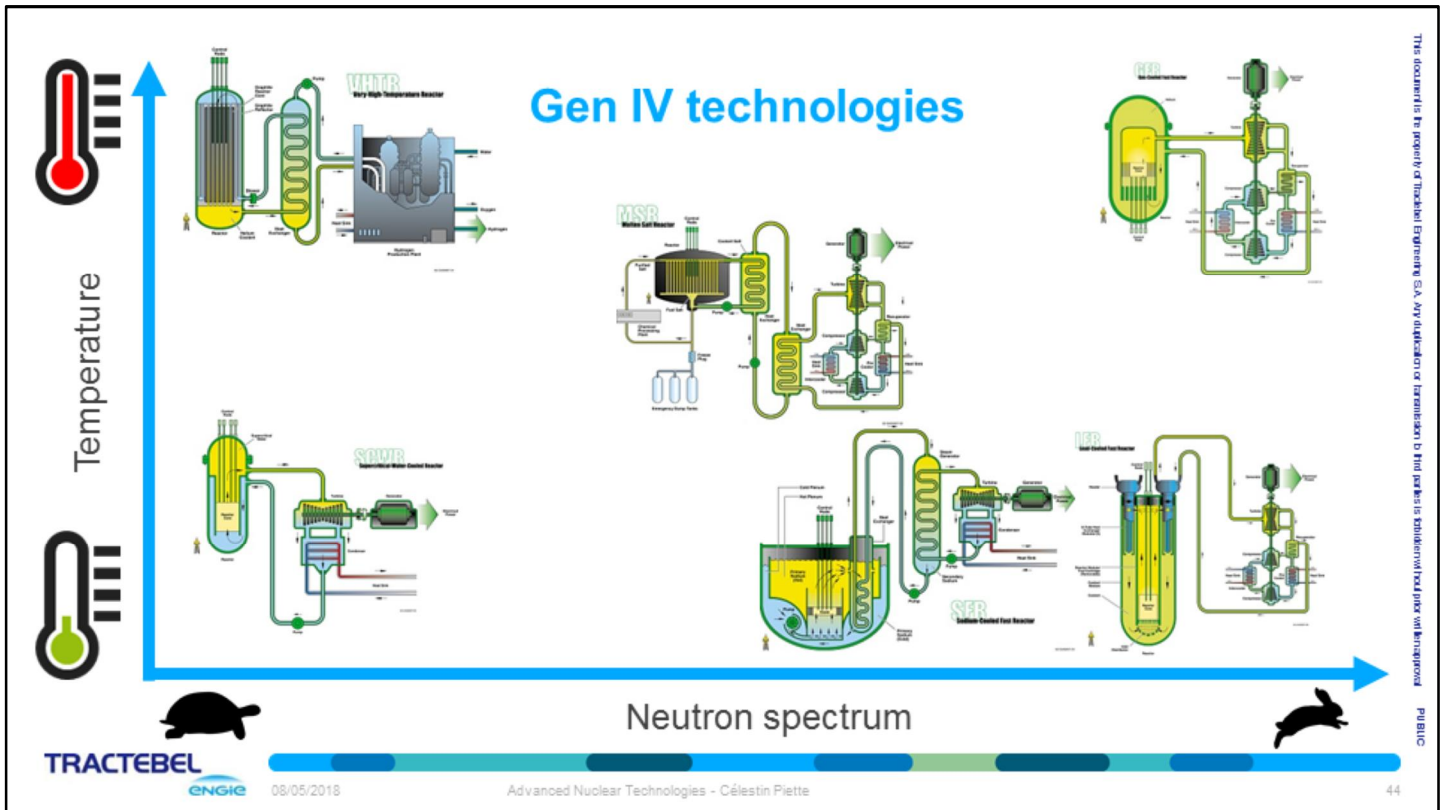
La communauté internationale se penche sur la question. Et c'est à l'initiative américaine, qu'est né, le forum international Génération IV.

C'est un effort international coopératif qui a été mis en place pour mener à bien la recherche et le développement nécessaires aux systèmes d'énergie nucléaire de nouvelle génération.

Une charte reprenant les 8 critères, les 8 objectifs technologiques a été rédigée et s'axe autour de 4 dimensions.

1. Une dimension de durabilité vis-à-vis
 - a) des ressources nucléaires, du combustible: pas d'épuisement long terme,
 - b) de la production de déchets nucléaires: via le retraitement et la valorisation des déchets à vie longue comme combustible.
2. Une dimension ayant trait à la sûreté et à la disponibilité des installations.
3. Economique
4. Et l'aspect résistance à la prolifération nucléaire.

Le reste de la présentation se focalise sur les deux premiers aspects puisqu'ils sont intrinsèquement conditionnés par la technologie considérée plutôt que par le design implémenté.



Après analyse d'une centaine de concepts par un panel d'expert internationaux, 6 ont été sélectionnés par le GIF.

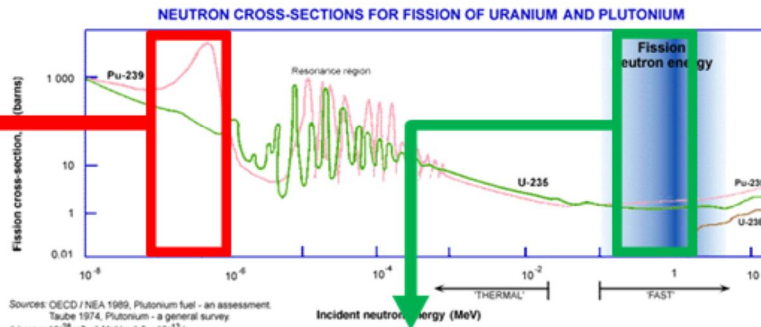
Chacun des concepts va être présenté en s'axant autour de 3 paramètres :

1. Le caloporteur:
 - a. De l'eau,
 - b. Un métal liquide (Na, Pb),
 - c. Du graphite comme modérateur et du gaz comme réfrigérant.
 - d. Ou du sel fondu.

2. Le régime neutronique dans lequel opère le réacteur: s'agit-il d'un réacteur à neutron lent ou à neutrons rapide (concept illustré au slide suivant) ?

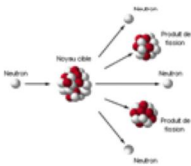
3. La température atteinte en sortie de réacteur.

Why fast reactors?

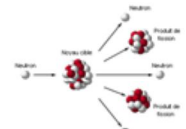


Sources: OECD / NEA 1989, Plutonium fuel - an assessment. Traube 1974, Plutonium - a general survey. 1 barn = 10^{-28} m², 1 MeV = 1.6×10^{-13} J

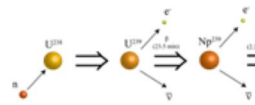
U^{235}



$Np^{237}, Am^{241}, Cm^{243}$



U^{238}



Pu^{239}

World Nuclear Association [37]

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

45

Historiquement pourquoi est-ce que l'on cherche à travailler avec des **neutrons lents** (des neutrons thermiques) ? C'est parce que la probabilité pour ces neutrons de causer une fission est supérieure. Pour le comprendre intuitivement, prenons un astéroïde qui passe à proximité de la terre. Si celui-ci est plus lent, la probabilité qu'il soit capté par le champ gravitationnel de la terre est plus élevé.

Maintenant la question est : pourquoi cherche-t-on à travailler avec des **neutrons rapides** ? La raison elle est double :

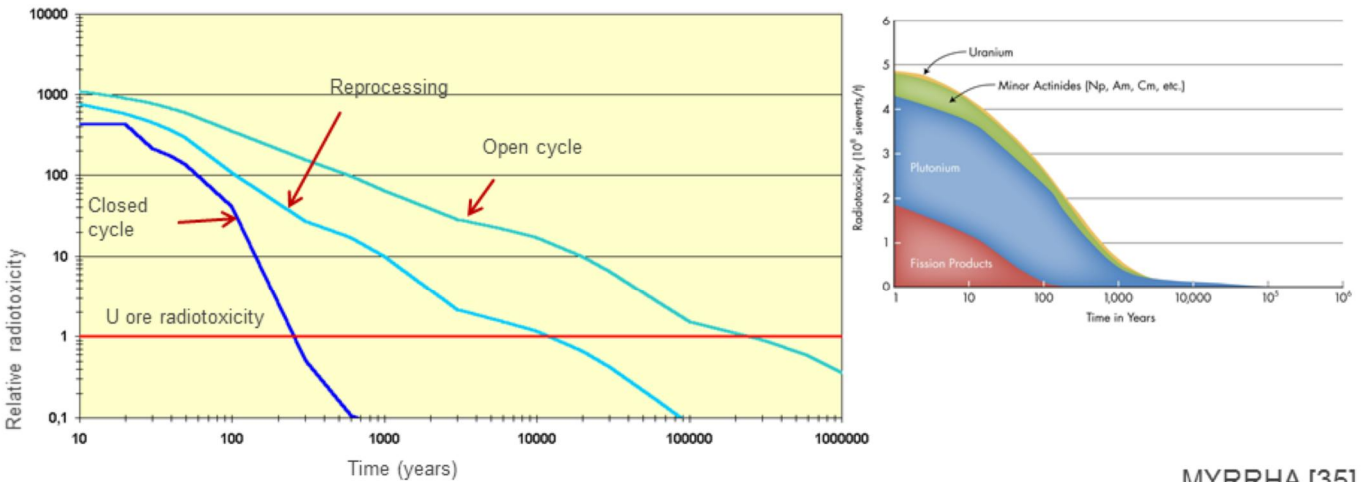
1. La plus haute énergie des neutrons va permettre de transmuter les déchets radioactifs à vie longue qui sont des noyaux lourds (ce sont les actinides mineurs).
2. Et deuxièmement, une réaction de fission causée par un neutron rapide va émettre plus de neutrons. Et à puissance égale (donc nombre de fission égal), cet excès de neutrons peut être valorisé en convertissant de la matière fertile, l'uranium 238 typiquement, en matière fissile.

Rem: bien que des réactions de conversion prennent place dans les réacteurs à neutrons lents (ex: les réacteurs à eau traditionnels), seule la filière rapide permet de construire des surgénérateurs: produisant plus de matière fissile qu'ils n'en consomment.



Nuclear Wastes

Lifetime of nuclear waste



TRACTEBEL



25/04/2017

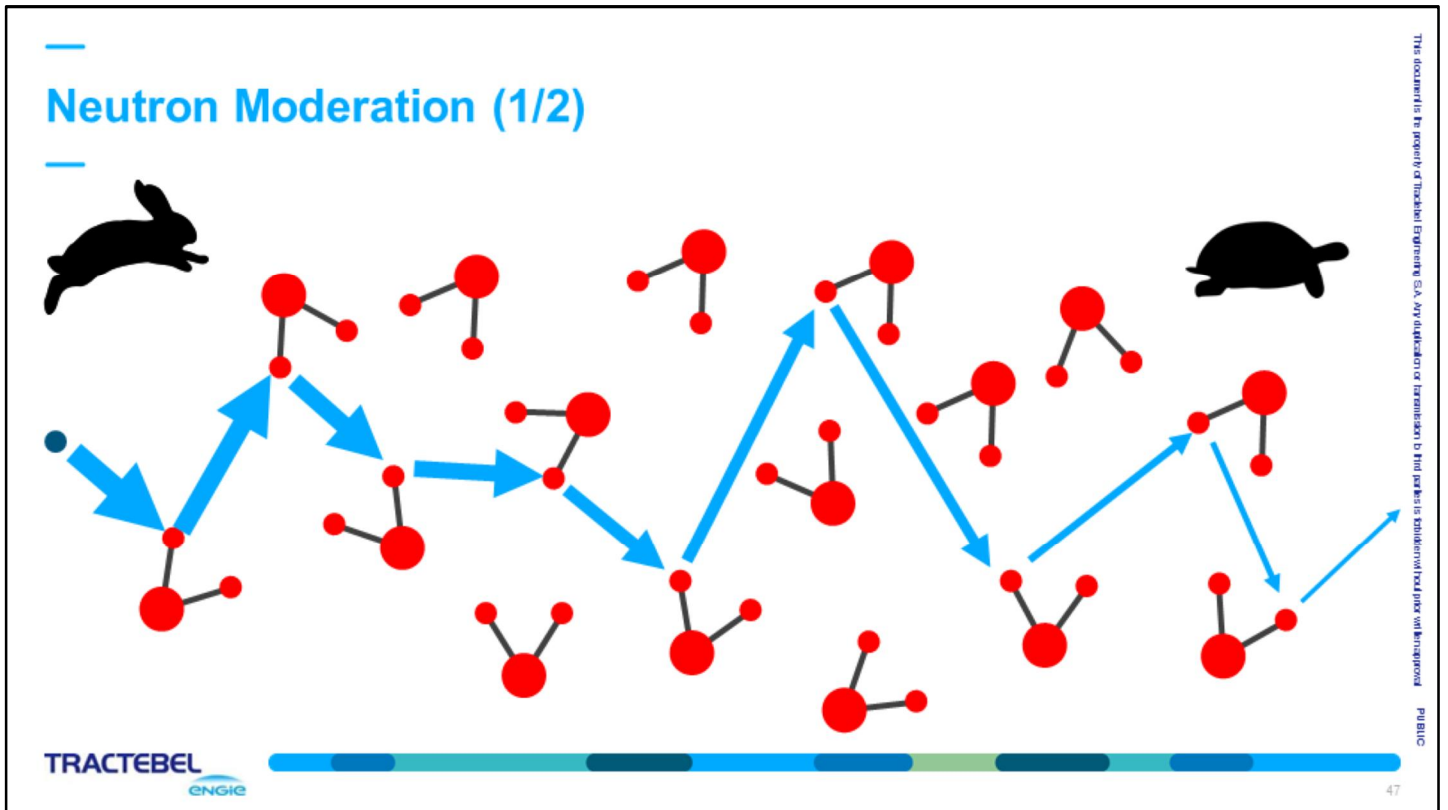
Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

MYRRHA [35]

PUBLIC

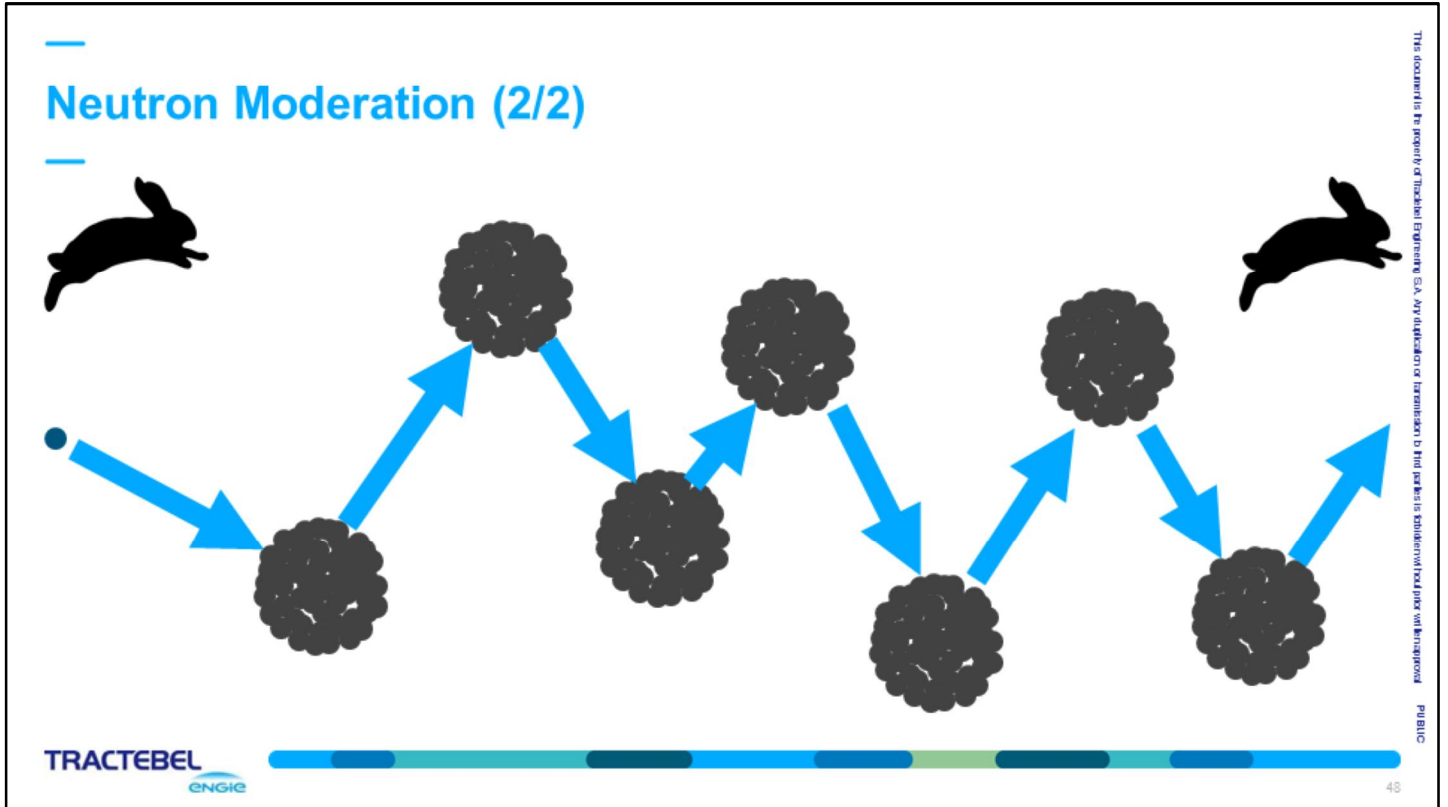
45

Pour reprendre la réflexion posée ultérieurement, l'ambition des réacteurs à neutrons rapides est traduite ici avec l'approche du cycle fermé où ces réacteurs convertiraient eux-mêmes leur matière fissile dans des surgénérateurs tout en transmutant les déchets à vie longue générés. Le but étant à nouveau de penser dès la conception à comment réduire en amont le volume et la longévité des déchets radioactifs.



Comprendre la **modération**:

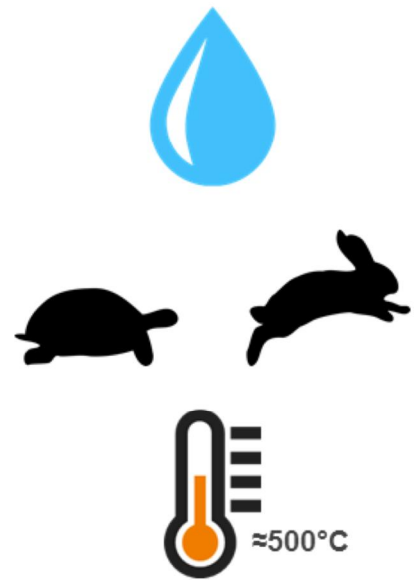
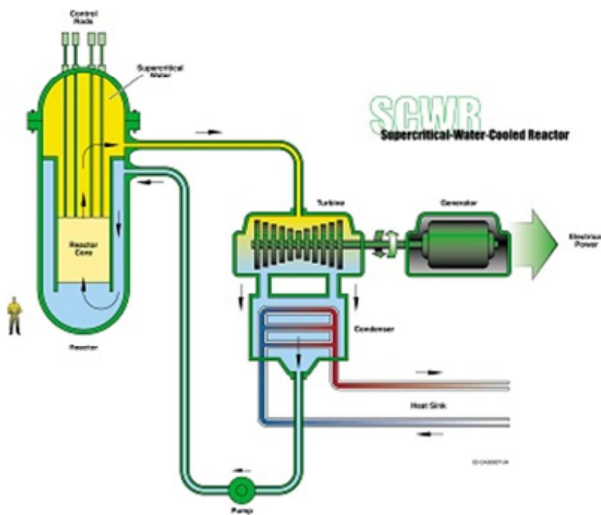
Lorsqu'ils sont générés par la réaction de fission, les neutrons sont dits rapides, ils ont une haute énergie ($\approx 1\text{MeV}$). Les collisions successives du neutron avec son environnement tendent à le **ralentir**; on dit que le neutron est thermalisé. Le noyau cible est appelé le modérateur. Au plus ce noyau est léger et au plus la modération est efficace: comme par exemple: le proton des noyaux d'hydrogène de l'eau.



A l'inverse, un noyau lourd – comme le plomb ou l'uranium lui-même – a un faible pouvoir de modulation et les neutrons restent dans le spectre rapide.

SuperCritical Water Reactor (SCWR)

General characteristics



Gen IV International Forum [44] [45]

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

49

Le SCWR est un réacteur dont:

1. Le caloporteur est de l'eau portée à l'état super critique,
2. Fonctionnant en régime thermique (cfr. le proton de l'hydrogène); des design plus avancés permettront de fonctionner en régime rapide.
3. Une température en sortie de cœur de l'ordre de 500-600°C (contre ≈350°C dans les PWR actuels).

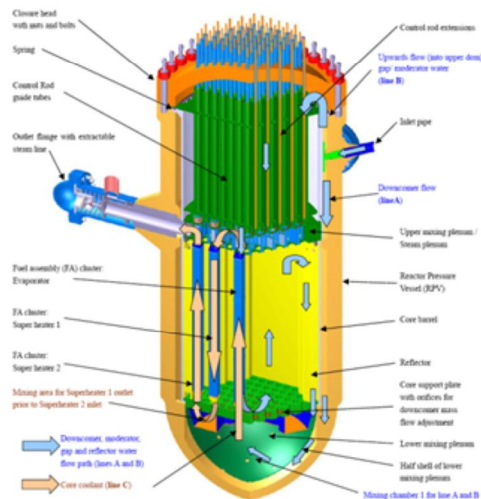
Le SCWR est une sorte de super PWR (Pressurized Water Reactor) qui présente les avantages suivants:

1. Une plus importante montée en enthalpie lors du passage à travers le cœur, ce qui permet:
 - a. Un important gain d'efficacité thermodynamique (un gain de près de 30%: 44% contre 34% actuellement) de part la plus haute enthalpie en sortie de cœur (température et pression supérieures).
 - b. La suppression du générateur de vapeur puisque l'eau sort à l'état supercritique et peut donc directement alimenter la turbine haute pression. Ce qui simplifie le design et diminue les coûts d'investissement.
2. Cette technologie capitalise l'expérience accumulée par l'exploitation des réacteurs à eau bouillante et des centrales à charbon supercritique.

D'importants efforts de R&D sont encore nécessaires pour le développement de matériaux. Les matériaux « classiques » n'étant pas compatibles avec, à la fois, la chimie de l'eau supercritique, corrosive et le bombardement neutronique intense du cœur.

SuperCritical Water Reactor (SCWR)

Some reference designs

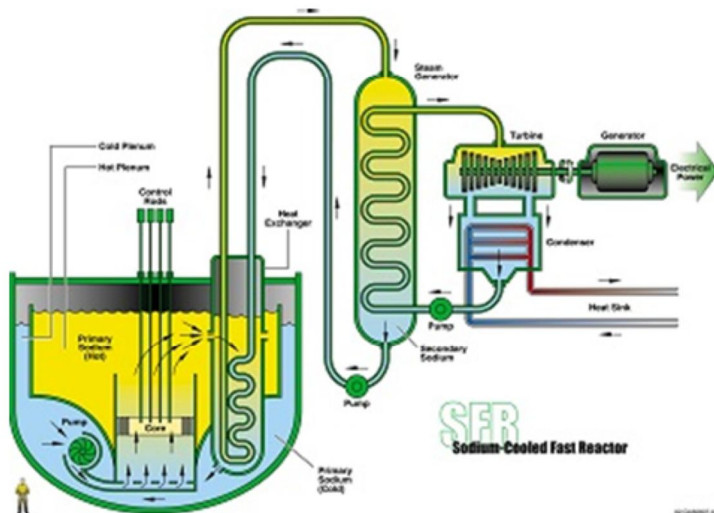


HP-LWR
KIT, EU [31]



Différents concepts sont en cours de design, en particulier au Canada, en Chine et en Russie. Le design présenté ici est celui porté par l'Union Européenne: le HP-LWR.

Sodium Fast Reactor (SFR) General characteristics



TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

51

Le SFR est un réacteur dont:

1. Le caloporteur est du sodium (un métal) à l'état liquide,
2. La masse atomique du sodium étant de 22, le réacteur fonctionne en spectre rapide,
3. La température en sortie de cœur est de l'ordre de 500-550°C (contre $\approx 350^\circ\text{C}$ dans les PWR actuels).

En plus de permettre l'accès au spectre rapide, les réacteurs au sodium:

1. Présentent une conductivité thermique importante, ce qui offre la possibilité d'un cœur plus compact.
2. Une température d'ébullition relativement élevée (883°C),
3. Fonctionnent à basse pression.

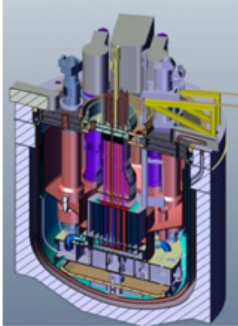
Le sodium est par contre:

1. Solide à température ambiante,
2. Opaque,
3. Réagit de manière très exothermique avec l'air et l'eau,

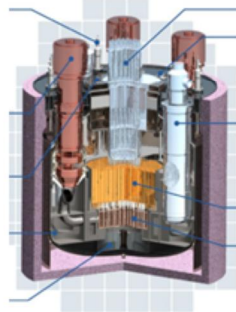
Ce qui contraint à l'implémentation de moyens spécifiques supplémentaires, que les réacteurs à eau ne nécessitent pas.

Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)

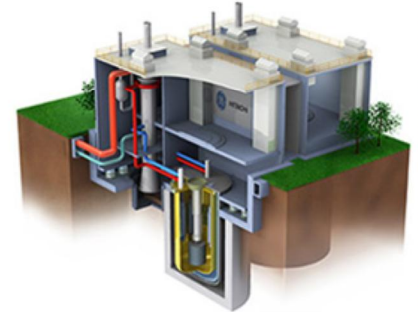
Some reference designs



ASTRID
CEA, France [31]



BN-1200
OKBM Afrikantov, Russia [32]



PRISM
GE-Hitachi, US [33]

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

52

This document is the property of Tractebel Engineering S.A. Any distribution or communication to third parties is strictly prohibited without written permission. PUBLIC

Les réacteurs au sodium sont ceux qui capitalisent le plus d'expérience parmi les 6 technologies de génération IV. Et ce, de par l'opération de plusieurs prototypes et démonstrateurs.

1. Le projet ASTRID est le concept – français – conçu pour prendre la relève les réacteurs Phoenix et Super-Phoenix.
2. Le BN-1200 est l'amélioration du BN-800, un réacteur à neutron rapide au sodium, connecté au réseau en 2016 en Russie. Le BN-1200 va intégrer les retours d'expérience accumulés par l'exploitation du BN-800.
3. Le projet PRISM, concept Américain, qui est un SMR au sodium.

Rem: l'approche SMR est un design particulier alors que les réacteurs au sodium est une technologie. Les deux concepts ne sont donc pas mutuellement exclusifs comme le démontre ce concept.

Lead Fast Reactor (LFR)

TRACTEBEL **ENGIE** 08/05/2018 Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette 53

Le LFR est un réacteur dont:

1. Le caloporteur est du plomb (un métal) à l'état liquide,
2. La masse atomique du plomb étant de 207, le réacteur fonctionne en spectre rapide,
3. La température en sortie de cœur est de l'ordre de 480-570°C (contre ≈350°C dans les PWR actuels).

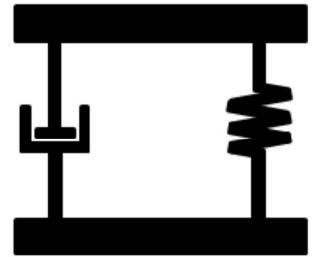
Tout comme le sodium, le plomb est solide à température ambiante et opaque. Les avantages comparativement aux réacteurs au sodium sont:

1. Pas de réaction énergétique avec l'eau et l'air.
2. Une température d'ébullition supérieure (1749°C)
3. Pas de risque de d'effet de vide positif (l'absence de plomb ne mène pas à une augmentation de puissance).

A l'inverse, les principaux challenges propres aux réacteurs au plomb sont:

1. Les phénomènes de corrosion et d'érosion, nécessitant le développement de matériaux plus complexes;
2. Une température de fusion plus importante que le sodium (327,5 °C contre 97,79 °C pour le sodium);
3. Une densité importante (10x supérieure à celle de l'eau). (Suite slide suivant)

Lead-cooled Fast Reactor (LFR) Seismic isolation



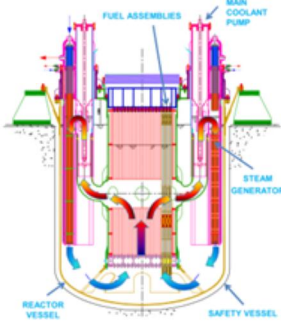
Intuitivement, il est facile de comprendre qu'en cas de séisme, les contraintes induites sur les structures internes par le plomb, sont plus importantes que pour les autres technologies de réacteur (à volume égal).

Deux stratégies sont possibles pour s'en prémunir:

1. Concevoir des structures plus résistantes.
2. Découpler sismiquement le réacteur du sol afin d'amortir et d'atténuer les effets sismiques d'un tremblement de terre.

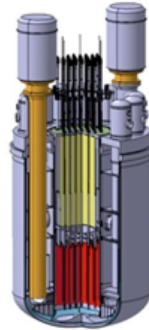
Lead-cooled Fast Reactor (LFR)

Some reference designs



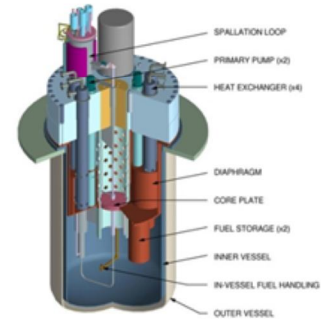
ALFRED

Ansaldo Nucleare, EU [34]



SVBR-100

AKME, Russia [36]



MYRRHA

SCK-CEN, Belgium [35] [49]



TRACTEBEL



08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

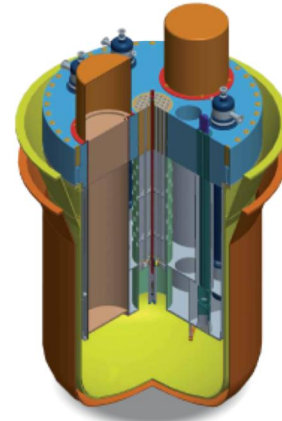
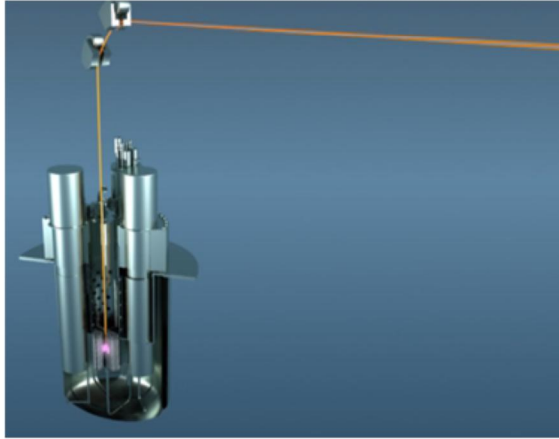
55

Les LFR sont une technologie relativement mature.

1. Le projet ALFRED est un projet de démonstrateur industriel, porté par l'Union Européenne,
2. Le SVBR-100 est un concept de SMR Russe dont la construction du démonstrateur est en cours et la complétion espérée pour début des années 2020 [50]. La Russie possède déjà une expérience dans la technologie plomb puisque plusieurs sous-marins russes étaient dotés de réacteurs nucléaires au plomb-bismuth.
3. Le projet MYRRHA est un ADS (Accelerated Driven Reactor) au plomb-bismuth. C'est un démonstrateur qui est un réacteur de recherche développé en Belgique, au SCK-CEN et qui reçoit un important soutien des fonds européens.

Il est à noter que les ADS n'ont pas été retenus par le GIF comme technologie de 4^{ème} génération. Le réacteur est présenté au slide suivant.

Projet MYRRHA



SCK-CEN, 2016

TRACTEBEL
ENGIE

This document is the property of Tractebel Engineering S.A. Any distribution or transmission to third parties is strictly prohibited under penalty of law.

PUBLIC

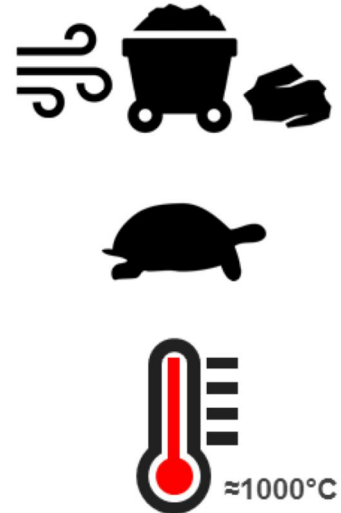
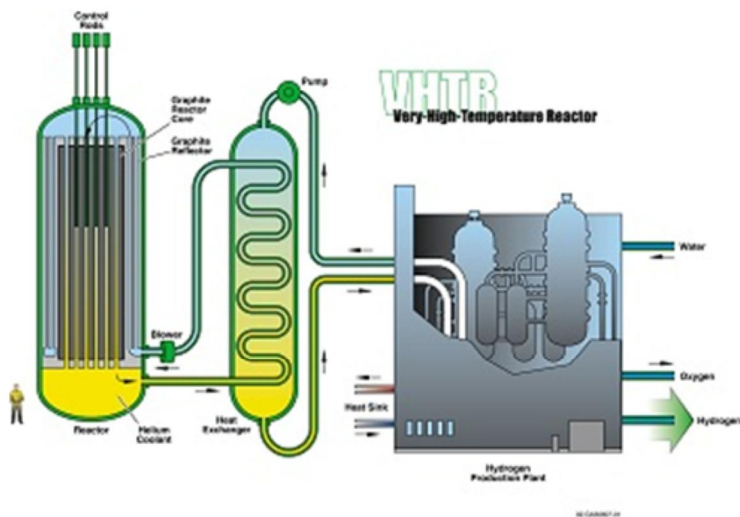
55

MYRRHA est au niveau mondial **le premier prototype d'un réacteur nucléaire piloté par un accélérateur de particules**. Particularité: en tant que source externe de neutrons, cet accélérateur de particules maintient la réaction en chaîne de la fission nucléaire. Il s'agit d'un réacteur sous-critique: le cœur ne contient pas assez de substance combustible pour entretenir spontanément la réaction en chaîne.

Il est prévu que le projet soit construit en plusieurs phases [49]:

- Une première pour la construction de l'accélérateur (100MeV) avec une mise en service pour 2024 et;
- Une seconde pour la montée en puissance de l'accélérateur avec en parallèle la construction du réacteur, la mise en service est actuellement prévue pour 2033.

Very High Temperature Reactor (VHTR)



TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

57

Les VHTR sont des réacteurs dont:

1. Le cœur est refroidi à l'hélium,
2. Les neutrons sont modérés par du graphite, le réacteur fonctionne donc en spectre lent,
3. La température en sortie de cœur avoisine les 1000°C.

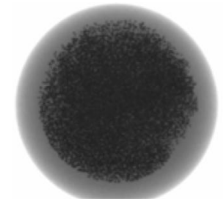
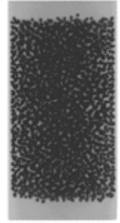
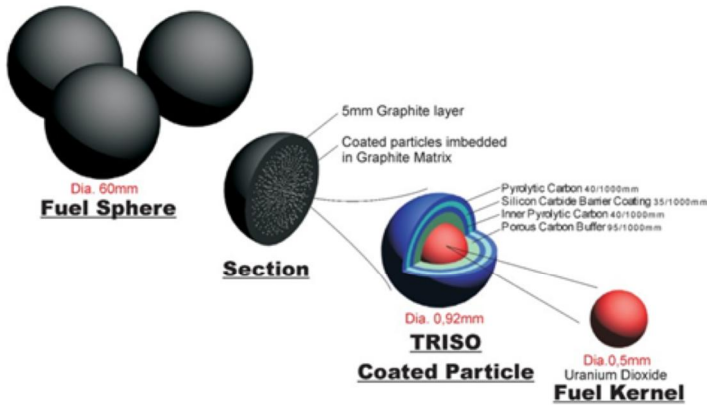
Une telle température de fonctionnement pose deux questions:

1. Quels matériaux peuvent conserver leur intégrité structurelle à une telle température ?
2. Pourquoi travailler à une telle température ?

(Suite slide suivant...)

Nuclear material

FUEL ELEMENT DESIGN FOR PBMR



Gen IV International Forum Webinar [25]

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

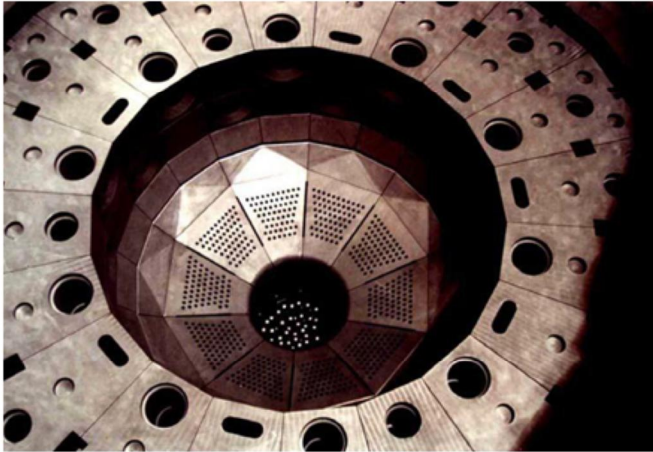
58

Au niveau des matériaux, les seuls pouvant tenir une telle température sont les matériaux réfractaires, tel que le graphite et ses dérivés, les carbures.

Ici le combustible, l'oxyde d'uranium est réduit à l'état de billes qui sont enveloppées dans des couches successives de matériaux réfractaires. Cette bille, que l'on appelle communément une « particule triso » est dispersée dans une nouvelle matrice réfractaire. Et deux approches existent:

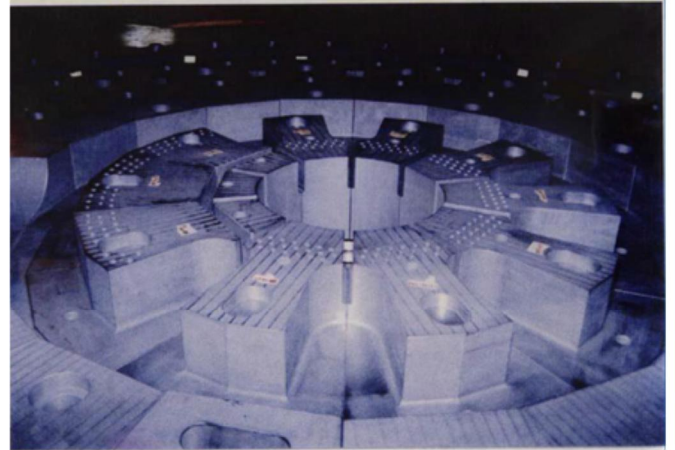
1. Ces billes sont dispersées dans un bloc prismatique de graphite, le fuel est alors statique dans le cœur du réacteur.
2. De manière alternative, les particules triso sont dispersées dans des boules. Le fait de travailler avec du combustible contenu dans des boules de graphite, permet un remplissage continu (on line) de la cuve.

Nuclear material



Core bottom of the HTR-10 showing the fuel pebble collection area

Top of the graphite core of HTR-10



Gen IV International Forum Webinar [25]

TRACTEBEL

ENGIE

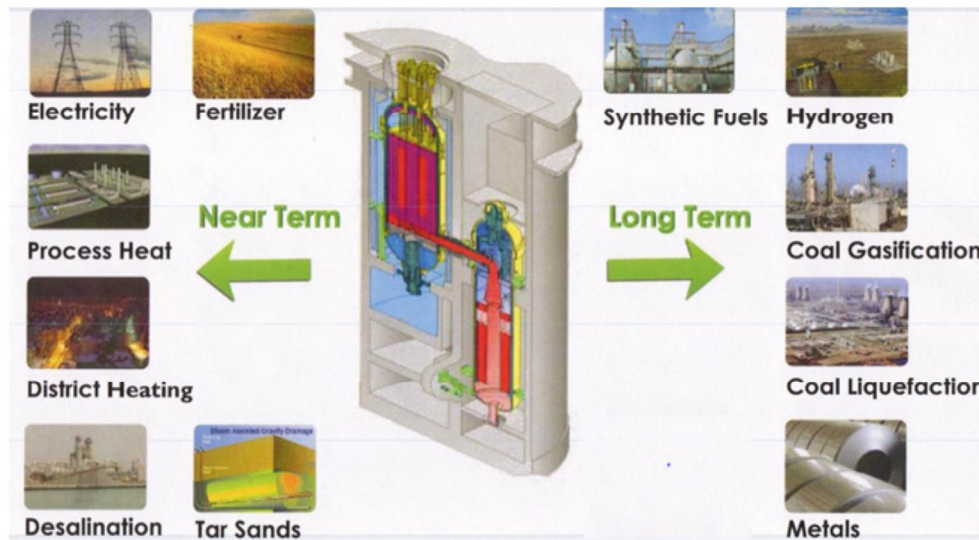
08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

59

La structure de la cuve implémente la même logique que précédemment: l'intérieur de la cuve est constitué d'une première couche de graphite, la partie extérieure restant en acier.

Nuclear cogeneration



Gen IV International Forum Webinar [25]

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

60

La seconde question soulevée est: pourquoi fonctionner à de telles températures ?

Et c'est ici qu'intervient la notion de cogénération nucléaire. Une importante partie ($\approx 2/3$) de l'énergie thermique générée par le cœur du réacteur n'est actuellement pas valorisée (envoyée à l'atmosphère par la tour de refroidissement: de l'eau propre, un peu chaude). Des initiatives visent en le développement d'applications industrielles à basse température permettant de valoriser ces calories thermiques perdues. A basse température on pense par exemple à la désalinisation de l'eau de mer et au chauffage urbain.

La logique est donc de décroiser le nucléaire à la seule application de production d'électricité pour atteindre de nouveaux marchés et une efficacité thermodynamique globale bien supérieure.

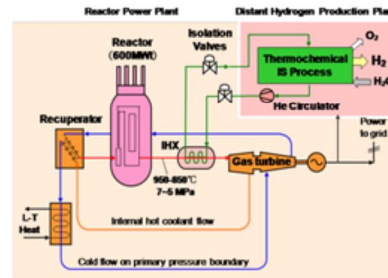
Et les températures plus élevées permettent de se tourner vers des applications plus nobles. En particulier, dès 900-1000°C il devient possible de produire de l'hydrogène: soit par électrolyse haute température ou par reformage de l'eau (voir: cycle iode-souffre).

Very High Temperature Reactor (VHTR)

Some reference designs



HTR-PM
INET, China [26]



GT-HTR-300
JAEA, Japan [27]

TRACTEBEL



08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

61

Les VHTR capitalisent de l'expérience accumulée par l'opération de plusieurs prototypes.

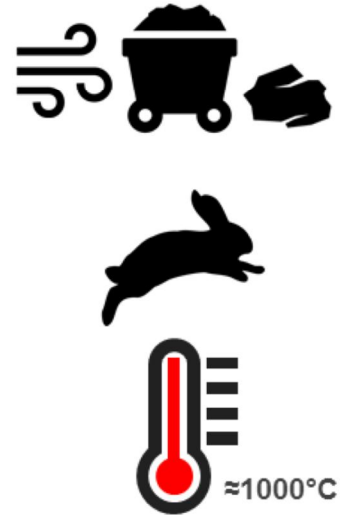
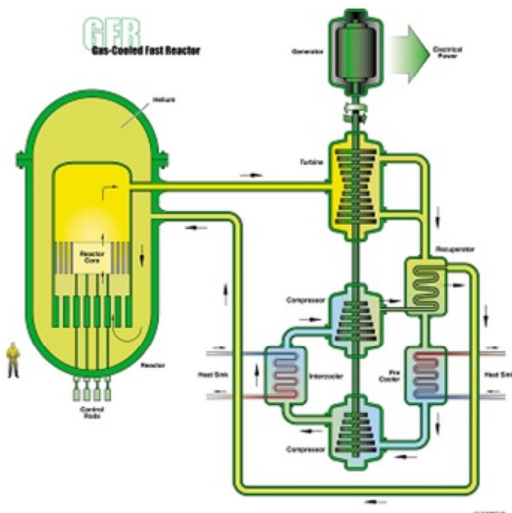
1. Le HTR-PM est un démonstrateur industriel chinois, basé sur le design de son prototype, le HTR-10. Le HTR-PM est un pebble-bed SMR . Actuellement construit, sa mise en service est prévue pour cette année (2018).

Remarque: la température en sortie de cœur est ici de 750°C.

2. Le GT-HTR est quant à lui un modèle japonais de type prismatique (statique).

Crédit photo: World Nuclear News

Gas Fast Reactor (GFR)



TRACTEBEL



08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

62

Les GFR sont des réacteurs dont:

1. Le cœur est refroidi à l'hélium,
2. Les neutrons ne sont que peu modérés par le graphite, le réacteur fonctionne donc en spectre rapide,
3. La température en sortie de cœur avoisine les 1000°C.

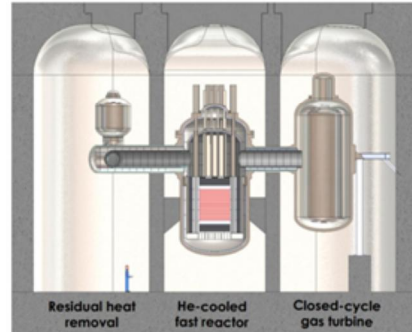
Pour fonctionner en spectre rapide l'inventaire en graphite du cœur doit être réduit. Or, c'est justement la matrice de graphite qui, tout en modérant les neutrons, offre une importante résistance à la température.

D'importants efforts de R&D sont encore nécessaires pour le développement d'assemblages combustibles permettant de conserver leur intégrité structurale à de telles températures tout en réduisant l'inventaire en graphite.

Gas-cooled Fast Reactor (GFR) Some reference designs



ALLEGRO
V4G4 consortium, EU [28]



EM²
General Atomics, US [29]

Plusieurs projets sont à l'étude à un stade encore conceptuel:

1. Le projet Allegro, porté par l'Union-Européenne,
2. EM², projet américain.

Molten Salt Reactor (MSR)

MSR Molten Salt Reactor

Generator → Electrical Power

Turbine

Compressor

Heat Exchanger

Heat Sink

Intercooler

Pneumatic Cooler

Compressor

Heat Sink

Reheater

Pump

Control Rods

Cockwell Salt

Purified Salt

Fuel Salt

Chemical Processing Plant

Emergency Dump Tanks

≈800°C

TRACTEBEL ENGIE 08/05/2018 Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette 64

This document is the property of Tractebel Engineering S.A. Any disclosure or transmission to third parties is strictly prohibited without the prior written consent of Tractebel Engineering S.A.

PUBLIC

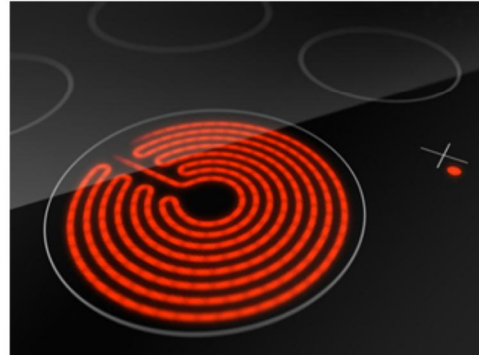
Les MSR sont des réacteurs dont:

1. Le caloporteur est un sel fondu,
2. Qui opère en spectre rapide (ou en spectre thermique pour les premiers concepts qui sont modérés au graphite),
3. Avec une température en sortie de cœur de l'ordre de 800°C.

Contrairement à toutes les autres technologies présentées, les réacteurs à sels fondus n'opèrent pas avec du combustible solide.

En effet, de la même manière qu'un morceau de sucre est dissous dans du café, l'uranium est ici à l'état **liquide**, dissous dans le caloporteur (le sel).

You say intrinsic safety ?



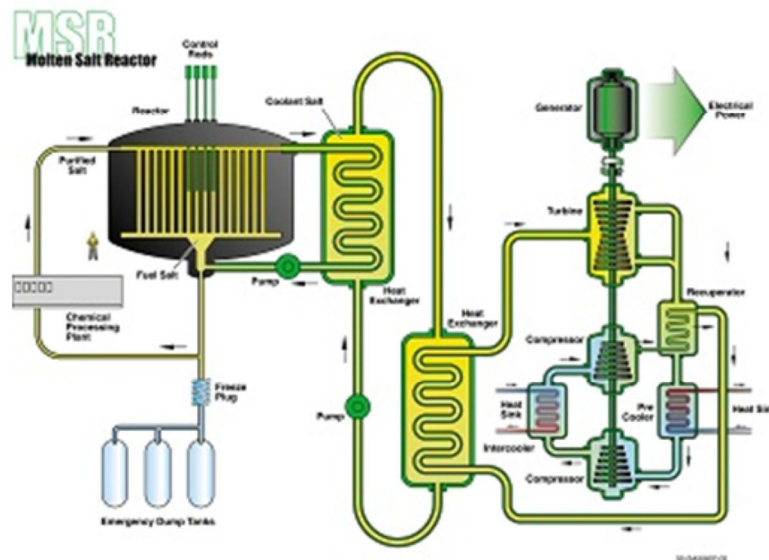
La manière la plus efficace de se protéger d'un risque est, trivialement, de le supprimer. En reprenant l'analogie de début de présentation: le risque est ici la fuite de gaz, ce risque est supprimé en substituant le gaz par une taque de cuisson électrique. Le système est ici **intrinsèquement sûr**.

La perte de tous les systèmes de refroidissement d'un réacteur mène à la montée en température progressive du cœur. Celui-ci pouvant alors entrer en fusion. Ce risque particulier est supprimé en opérant un réacteur dont le cœur est déjà à l'état liquide. C'est la logique mise en place dans les réacteurs à sels fondus.

Remarquons que la sûreté intrinsèque n'est pas l'apanage des réacteurs à sel fondu:

1. Dans un VHTR, la tenue à la température du graphite est telle qu'il est virtuellement impossible d'atteindre sa température de fusion. En effet, la chaleur résiduelle étant naturellement (passivement) compensée par des flux de chaleur conductif, convectif et radiatif.
2. Il en va de même des réacteurs au plomb dont la haute conductivité thermique assure une évacuation efficace et passive de la chaleur résiduelle par convection naturelle.

Molten Salt Reactor (MSR)



TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

65

Dans un cœur dont le combustible est à l'état liquide:

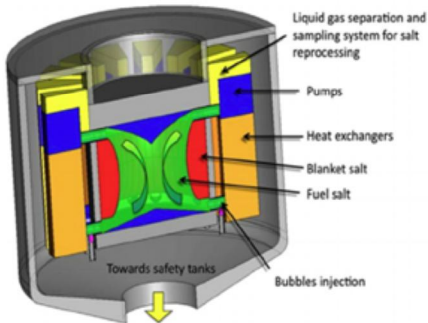
1. En cas de perte de toutes les sources d'alimentation électrique, une « freezing valve » fond (« saute » tel un disjoncteur dans un tableau électrique). L'inventaire du réacteur s'écoule alors par **gravité** dans un réservoir. Et ce réservoir, est dimensionné pour que la chaleur résiduelle puisse s'évacuer passivement par conduction et convection. Le réacteur est dit « walk-away safe ».
2. Les produits de fission ne sont plus emprisonnés dans une gaine de combustible. Il est donc possible d'effectuer un retraitement et un rechargement on-line du réacteur afin de doper les performances neutroniques du cœur et de limiter son inventaire en radio-isotopes.

C'est cette caractéristique qui rend les MSR particulièrement adaptés à la filière thorium. En effet, le thorium est une matière fertile dont la conversion en U-233 (fissile) est sensible à l'économie de neutron (pour rappel: une partie des neutrons est « détournée » de la réaction en chaîne principale pour convertir de la matière fertile en matière fissile).

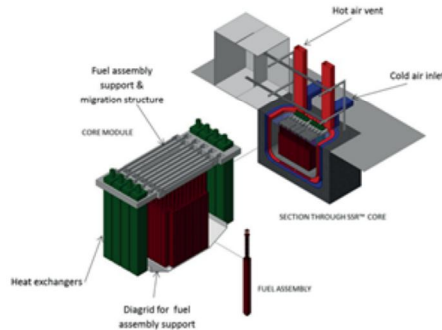
C'est pourquoi les MSR sont souvent improprement appelés des « réacteurs au thorium ». En fait, de la même manière que le moteur électrique et le moteur à explosion sont des technologies et que l'essence et le diesel sont des combustibles. Les Molten Salt Reactors (MSR) sont une technologie et l'uranium et le thorium sont des filières combustibles.

Molten Salt Reactor (MSR)

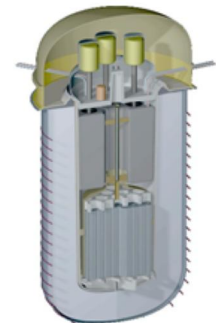
Reference design



MSFR
CNRS, France [22]
Molten salt fast reactor



SSR
Moltex Energy, UK [23]
Molten salt reactor



iMSR
Terrestrial Energy, Canada/US [24]

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

67

Dans les années 1960, les Américains ont opéré pour la première fois un réacteur à sel fondu à Oak Ridge National Laboratory; le MSRE qui a fonctionné pendant 4 ans.

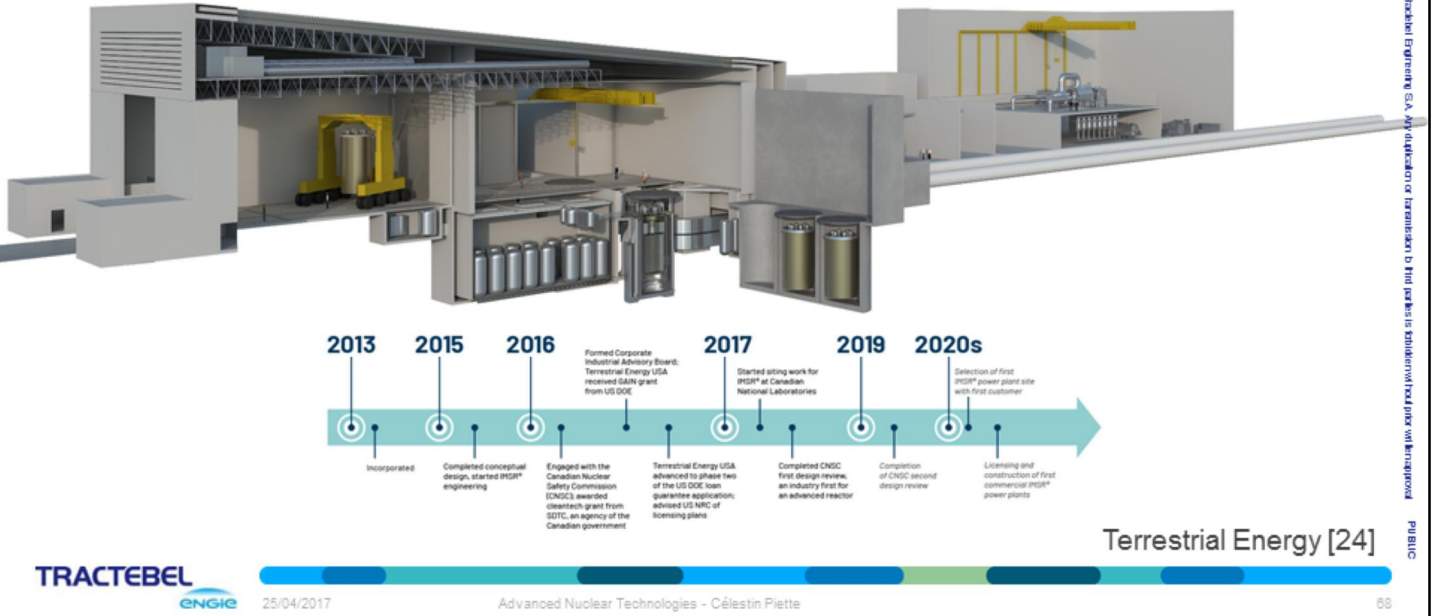
1. Le CNRS de Grenoble travaille sur le design d'un réacteur; leurs subsides sont maigres (30.000 euros).
2. Moltex Energy, une Start-Up Anglaise, développe un "Stable Salt Reactor". Leur stratégie est le confinement du combustible liquide dans une gaine de combustible (non fermée), permettant de figer l'emplacement du combustible dans le réacteur. Ceci permettant une meilleur appréhension du comportement du combustible.
3. Terrestrial Energy développe un SMR à sels fondus.

Il est à noter que iMSR n'est pas un réacteur de 4^{ème} génération à proprement parler puisque celui-ci fonctionne en spectre lent (modération au graphite); cependant, celui-ci pave la route vers de développement industriel de la technologie. En effet, le principal challenge auquel sont confrontés les réacteurs à sel fondu sont:

- a. L'inexistence des infrastructures propres à la technologie (cycle amont et aval du combustible, industries manufacturières des principaux composants...).
- b. Le manque d'expérience et de connaissance de la technologie: comportement du combustible, tenue des matériaux au long terme, transitoires...

La stratégie est donc de réduire le délais avant commercialisation (en: « time to market ») en simplifiant le design et en supprimant les fonctionnalités non indispensables: retraitement et rechargement en ligne, réduction de taille, pas de « freezing valve »...

Terrestrial Energy's targeted roadmap



Pour donner un ordre de grandeur, Terrestrial Energy est l'un des candidats au « call » du laboratoire canadien (Chalk river) pour la construction de son démonstrateur dès les années 2020...

Generation IV

*“The electric **light** did not come from the continuous improvement of **candles**.”*

- Oren Harari

Le premier mot de conclusion que j'aimerais vous partager sur la génération IV; et que cette phrase résume assez bien. C'est que ces technologies vont répondre **autrement** aux différentes aux caractéristiques intrinsèques de l'énergie nucléaire.

The Global Race for Advanced Nuclear



Reactor Design Types

- Molten Salt Reactor
- Fluoride Salt-cooled High Temperature Reactor
- Liquid Metal-cooled Fast Reactor
- High Temperature Gas Reactor
- Pebble Bed Reactor
- Nuclear Battery Reactor
- Small Modular Reactor
- Fusion Reactor
- Super-Critical CO₂ Reactor
- Super-Critical Water-Cooled Reactor



© 2017 Third Way. Free for re-use with attribution/link.

Third way [51]



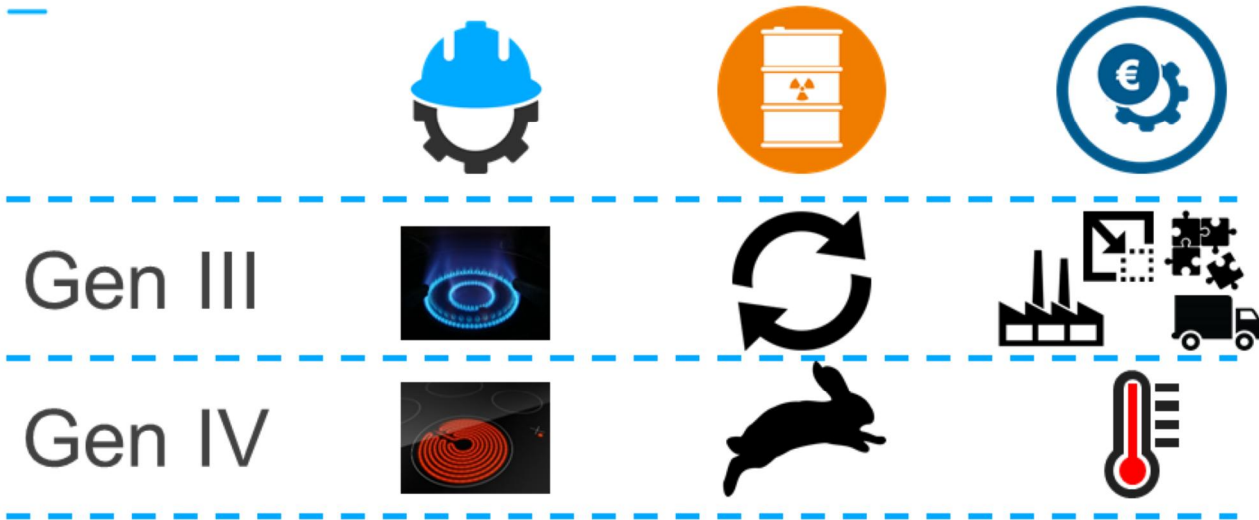
25/04/2017

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

70

Et deuxièmement, il y a actuellement une effervescence **historique** dans le secteur du nucléaire et une dynamique d'**innovation** sans précédent.

Conclusion and summary



TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

71

En résumé, les trois caractéristiques intrinsèques à la filière atomique ont été expliqués. Et les moyens de gestions spécifiques mis en place par le secteur le secteur ont été analysés. Maintenant, dans un contexte d'**évolution continue** de l'état de l'art, les nouvelles générations de réacteurs implémentent dans leur design les améliorations issues (1) des milliers d'années d'expérience cumulée de l'exploitation des générations existantes et (2) des innovations émergentes dans les laboratoires de recherche.

En particulier:

1. Certains design de III ème génération implémentent
 - a. de plus en plus de systèmes de sûreté de type passif;
 - b. Le reprocessing partiel du combustible (pour former le MOX) permet déjà de réduire le volume et la durée de vie des déchets;
 - c. la construction modulaire permettant de réduire les coûts de construction et les risques financiers liés à de tels chantiers.

L'approche SMR espère rendre l'économie de volume aussi que l'économie d'échelle et de faciliter le financement des nouveaux projets nucléaires dans des marchés où l'accès aux capitaux est plus difficile que pour des sociétés étatiques.

2. La IV ème génération réutilise ces principes et pousse l'amélioration encore plus loin, dans une perspective de durabilité long terme. Elle introduit pour certains concepts:
 - a. La notion de sûreté intrinsèque.
 - b. L'utilisation des neutrons rapides pour la transmutation des déchets à vie longue (les actinides mineurs) et la conversion de noyaux fertiles (ex: U238, Th232...): fermeture du cycle combustible (en: « closing the fuel cycle »).
 - c. L'accession à de nouvelles applications industrielles. En particulier, la production d'hydrogène.

Golden rules for an efficient Q&R



1. KISS: Keep It Short And Simple
2. One question/subject at a time
3. Priority to science rather than polemic !

References

To proof-check and go further...

- [1] <http://www.climate-lab-book.ac.uk/2016/spiralling-global-temperatures/>
- [2] http://www.lexpress.fr/actualite/societe/meteo/alerte-maximale-a-la-pollution-en-region-parisienne_1498047.html
- [3] http://www.senat.fr/rap/r10-349/r10-349_mono.html
- [4] https://www.forumnucleaire.be/assets/craft/docs/Document-Memorandum_fr.pdf
- [5] <https://www.foratom.org/facts-figures/>
- [6] WEBINARS https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_84279/webinars
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Cloud_chamber

References

To proof-check and go further...

[8] https://en.wikipedia.org/wiki/Decay_heat

[9] <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors.aspx>

[10] <https://www.youtube.com/watch?v=CuG0ZUE450Y>

[11] https://aris.iaea.org/Publications/IAEA_WRC_Booklet.pdf

[12] <https://aris.iaea.org/sites/PWR.html>

[13] <http://www.westinghousenuclear.com/New-Plants/AP1000-PWR/Safety>

[14] <http://synatom.be/fr/>

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Plette

13

References

To proof-check and go further...

- [15] <https://www.ondraf.be/le-stockage-g%C3%A9ologique>
- [16] https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/SMR/files/IAEA_SMR_Booklet_2014.pdf
- [17] <http://www.westinghousenuclear.com/New-Plants/Small-Modular-Reactor>
- [18] <http://www.nuscalepower.com/>
- [19a] <https://aris.iaea.org/PDF/KLT-40S.pdf>
- [19b] <http://www.world-nuclear-news.org/NN-Russias-floating-power-plant-clear-for-operation-11011801.html>
- [20] <https://www.youtube.com/watch?v=dRMF9IC0tXs&t=227s>
- [21] <http://analysis.nuclearenergyinsider.com/3d-printers-could-slash-smr-lead-times-years-months>
- [22] <https://www.youtube.com/watch?v=M4MgLixMrz8>

TRACTEBEL



08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

13

References

To proof-check and go further...

[23] http://www.moltexenergy.com/learnmore/Moltex_Design.pdf

[24] <http://terrestrialenergy.com/media/videos/>

[25] https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2017-02/genivwebinar_vhtr_csink_final_25_jan_2017.pdf

[26] <https://aris.iaea.org/PDF/HTR-PM.pdf>

[27] <https://aris.iaea.org/PDF/GTHTR300C.pdf>

[28] <https://aris.iaea.org/PDF/ALLEGRO.pdf>

[29] <https://aris.iaea.org/PDF/EM2.pdf>

TRACTEBEL



08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

13

References

To proof-check and go further...

- [30] <https://aris.iaea.org/PDF/HP-LWR.pdf>
- [31] <https://aris.iaea.org/PDF/ASTRID.pdf>
- [32] <https://aris.iaea.org/PDF/BN-1200.pdf>
- [33] <https://aris.iaea.org/PDF/PRISM.pdf>
- [34] <https://aris.iaea.org/PDF/ALFRED.pdf>
- [35] <https://aris.iaea.org/PDF/MYRRHA.pdf>
- [36] <https://aris.iaea.org/PDF/SVBR-100.pdf>
- [37] <http://www.world-nuclear.org/information-library.aspx>

TRACTEBEL



08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

13

References

To proof-check and go further...

[38] <https://www.iter.org/>

[39] <https://www.iaea.org/pris/>

[40] <https://www.youtube.com/watch?v=dT3Bt8KGqEg>

[41] https://www.forumnucleaire.be/assets/craft/docs/Interview-Trends-Tendances_Jean-Marc-Jancovici.pdf

[42] <https://www.youtube.com/watch?v=mh3HPRHPREo>

[43] <http://www.westinghousenuclear.com/New-Plants/AP1000-PWR/Construction>

[44] https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42151/supercritical-water-cooled-reactor-scwr

TRACTEBEL

ENGIE

08/05/2018

Advanced Nuclear Technologies - Célestin Piette

13

References

To proof-check and go further...

- [45] https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_88739/laurence-leung-webinar-annonce-final
- [46] <https://www.foratom.org/downloads/people-really-think-nuclear-energy/>
- [47] http://www.sfen.org/sites/default/files/public/atoms/files/les_couts_de_production_du_nouveau_nu_cleaire_francais.pdf
- [48] <https://www.nao.org.uk/wp-content/uploads/2017/06/Hinkley-Point-C.pdf>
- [49] <https://foodshield.vids.io/videos/a09adfba151bebce28/sckcens-r-d-on-myrtha>
- [50] <http://www.akmeengineering.com/svbr100.html>
- [51] <https://www.thirdway.org/graphic/keeping-up-with-the-advanced-nuclear-industry>