

Le(s) nouveau(x) NUCLEAIRE(S)

B. DECUGIS 31-5-2022

I.INTRODUCTION

- Micro-trottoir: « J'y connais rien mais je cherche même pas à comprendre car ça pollue et c'est dangereux, alors WTF ? »

B. DECUGIS 31-5-2022

« J'ai cherché à comprendre »
« Avec de lointaines bases... »
Un plaidoyer « pro » affiché et assumé
Trop de slides → Annexes

- Une vulgarisation d'un sujet complexe: une bonne illustration systémique

- Fait suite à JB et GL (et à des Q → 3 focus ci-dessous)

LE NUCLÉAIRE, AVENIR DE L'ÉCOLOGIE ? Entretien avec Bruno Comby https://youtu.be/1IJprh_2MkY

- Informer évangéliser pour combattre une très mauvaise image ← manque d'éduc/ Information
 - 70% des français pensent que le N émet des GES
 - y/c les politiques (10 ans de perdus **)
 - Les médias en rajoutent: Faire peur fait vendre : 70%= cout de la trouille (Janco)²
 - Ces écolos qui défendent le N: Bruno Comby, [Association des écologistes pour le nucléaire](#) (AEPN)

- Centrée sur « aujourd'hui » :

- Comment se présente l'énergie nucléaire aujourd'hui ?

- → De quel nucléaire parle-t-on ? → il y a « Un ou même des nouveaux nucléaires »

- Ds quel contexte:

- L'URGENCE Climatique : supports gvnmtx → booster l'innov.

La future génération: le GIF-Gen IV
L'émergence des SMR → **Disruption**

- Et sur 3 focus:

- Les réacteurs à sels fondus
- Les SMR
- Et l'EPR ds tout ça ?

**l'Académie des sciences, qui publiait le 7 juillet 2020 un communiqué intitulé : « Fermer Fessenheim et d'autres réacteurs est un contresens »

- Conclusion : Les solutions porteuses à suivre, pts à retenir, et qq questions ouvertes

PLAN

- I - Le CONSTAT et rappels historiques
- II - BACK TO BASICS: comment ça marche ?
- III – La nouvelle génération GIV
- IV – Focus sur les MSR
- V – Focus sur les SMR
- VI - Focus EPR-II
- VII - CONCLUSION

Avec mes excuses pour les nombreuses citations et reprises de texte en anglais

II. Historique et Constat

II. Historique et Constat

- Marie CURIE:
 - N03: physique (radiations)
 - N11: chimie (Po, Ra)
- WWII → nuke=militaire: U-Pu, physique
- >45: U-Pu → ss-marins N → filière PWR/REP Westinghouse/(GE BWR)
- 2 Nobels (Weinberg et Wigner) en 45: sels fondus → oubli ↔ chimie
- Idée reprise à Oak Ridge (65) .. et abandonnée sans suite!
- Le marché → le REP/PWR s'impose (# 80% des 500+, 20%REB, Candu)
 - France : GG → REP ss license W – l'envolée des années 70
- 3 accidents majeurs → très peu de morts → inflation médiat. → un climat d'insécurité → montée des anti-nuke → des décisions politiques « irrationnelles » : une longue traversée du désert
- Un regain actuel* sous la pression de l'urgence climatique

*actuel pour nous depuis
un revirement tardif et spectaculaire !

Les autres n'ont pas
attendu.....

Le CONSTAT-I

Constat aujourd'hui:

- Un Parc mondial # mono-filière /mono-tech
- Pas d'innovation de rupture depuis 50+ ans
 - Hors qq essais: en F : R,PHX,S-PHX,ASTRID (CEA) et MSFR (CNRS), sans suite !
- Un climat (« entrisme »- CEA) anti-nuke
- Une industrie laissée en « déshérence » en F,USA,.. → Qui a du mal à repartir → FIASCO FIII
- Une vigilance accrue (normes, ASN, et principe de précaution poussé à l'extrême*)
- MAIS : Une urgence climatique qui impose de renoncer aux discours idéol., savoir raison garder et → « créativité»
 - → Des projets qui foisonnent ici ou là
 - La relance généralisée du nuke (sauf exceptions: A,A,S,..)
 - Les starts up sont entrées ds la course !
 - GIV = 6 technos de rupture prêtes à prendre la relève.
- Et NEANMOINS
 - Nous continuons à penser en « temps long » ss réviser nos projections.....
 - L'image s'améliore sensiblement ici ou là (Suède) et même un peu en F
 - Les énergies et financements ne sont pas mobilisés à la hauteur des enjeux
- La solution viendra sans doute d'ailleurs ...(si elle vient ? surement ← marché)

* - Janco: le coût d'une centrale nuke =30% effectif + 70% subjectif (cout de la trouille)
- F-III: l'ASN a changé ses normes en cours de construction entrainant un retour arrière dramatique sur F-III

Le CONSTAT-II

- Il y eu un avant Fuku (2011):

- Tchernobyl avait ébranlé les esprits mais → pas sensément répliquable chez nous.
- On poursuivait notre essor nucléaire avec ASTRID et le lancement des EPR

→ Au plan mondial: création en 2000 du GIF: « Generation IV International Forum »

- Projeter le nuke de prochaine génération: selon 3 axes clés:

- 3 AXES CLES du GIF:
 - DURABILITE
 - COMPETITIVITE
 - SECURITE

- Il y eu un après Fuku:

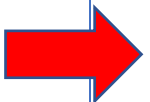
- Trop c'est trop pour certains : on condamne le nuke, on fera sans.
- Qt aux autres : on fige le nuke. Pas de nouvxs projets et investissmts
- Dans tous les cas → DOXA : à fond sur les ENRs seul planche de salut:

- Le réveil:

- Il faut qq part raison garder:
 - On ne pourra se passer du nuke (rapport RTE)
 - Le nuke est victime d'une image imméritée
 - Les faiblesses des ENRs se font jour (essentiellmt « l'intermittence »)
- La pression climatique ne laisse pas bcp de choix: si la priorité et zero GES le nuke est le mieux placé
- Les SMR changent la donne → Nuke multi-usage, partout → explosion « champinonesque »

Le CONSTAT-III → Rapport ASN 2021 du 18/5/22

1. **Le système électrique français doit aujourd'hui faire face à une double fragilité inédite en matière de disponibilité qui touche tant les installations du « cycle du combustible » que le parc nucléaire des réacteurs.** Ces fragilités, qui résultent pour l'essentiel de l'absence de marge et d'un déficit d'anticipation, doivent servir de retour d'expérience pour l'ensemble de la filière nucléaire et les pouvoirs publics.
2. **Les préoccupations de sûreté nucléaire doivent être placées au cœur des décisions de politique énergétique, au même niveau que les préoccupations de production d'électricité décarbonée à horizon 2050.** Dans les 5 ans qui viennent, EDF devra questionner et justifier individuellement la capacité des réacteurs les plus anciens à poursuivre leur fonctionnement au-delà de 50 ans, voire de 60 ans, et d'ici la fin de la décennie au plus tard, le Gouvernement devrait se prononcer sur la poursuite ou non du retraitement des combustibles usés à l'horizon de 2040.
3. **La perspective d'une politique énergétique comportant une composante nucléaire de long terme doit être accompagnée d'une politique exemplaire en matière de gestion des déchets et du nucléaire historique.** Une telle politique suppose que des décisions soient prises pour que tous les types de déchets disposent de filières de gestion opérationnelles, et que les exploitants nucléaires se mobilisent davantage pour conduire, dans les délais prévus, les projets de reprise et de conditionnement sûr des déchets nucléaires historiques dont ils ont la responsabilité.
4. **Les nouvelles perspectives de politique énergétique, quelles qu'elles soient, supposent un effort industriel considérable pour faire face aux enjeux industriels et de sûreté.** Si le nucléaire fait partie des choix faits pour assurer un mix énergétique décarboné à horizon 2050, la filière nucléaire devra mettre en place un « véritable « plan Marshall » pour rendre industriellement soutenable cette perspective, et disposer des compétences lui permettant de faire face à l'ampleur des projets et à leur durée.



Le CONSTAT-IV : aujourd'hui la scène internationale bouillonne de projets



Office of NUCLEAR ENERGY

- There's a lot of buzz around advanced nuclear.
- These technologies are going to completely change the way we think about nuclear reactors.

Le nucléaire est reparti presque partout avec des ACTEURS principaux majeurs et le phéno SMR qui bouscule la donne

- CHINE : la plus avancée sur les GIV- nouvelles technos → sur tous les fronts
- RUSSIE : traditionnellement très nucléaire avec encore de remarquables avancées et une forte coop ROSATOM-EDF
- USA : C'est reparti: DOE très actif → pousse les projets en partage de funding : les Start up sont entrées ds la danse
- UK : toujours actif en recherche avec des projets intéressants
- France: Malgré le FIASCO F III, Macron redresse la barre in extremis -- on a perdu 10 ans – avec 2 priorités : REP-EPR II, et SMRs, +→ PLAN France 2030 –500M€ → reacteurs nucléaires innovants
- INDE: investit ds le Th – ils en ont bcp (1/3)
- JAPON: redémarre sélectivement ses réacteurs (REP-côte W) et rejoint voire conduit divers groupes de recherches
- Le Canada: vise une utilisation généralisée à travers le pays
- Autres: Pays-bas, ...sauf All, Aut, Belgique (?), Italie, Espagne, Suisse ..
Des pays comme Pologne, Roumanie ont déjà passé commande de GIV

*Pour les seuls SMR l'AIEA recense
En 2020 >70 concepts SMR dont la ½
Russie, Chine, USA, Canada

L'INNOVATION permettra-t-elle de rattraper le temps perdu ?

- En changeant l'échelle de temps et le "time to market"
- En généralisant l'utilisation du nuke pour tous les usages
- En assurant une sécurité passive intrinsèque à 100%
- En s'appuyant sur l'innovation constante: simplification de design, nouvelles technos (ex TRISO)

• RUPTURE TECHNO

- SECURITE
- TEMPS
- COUT
- USAGE

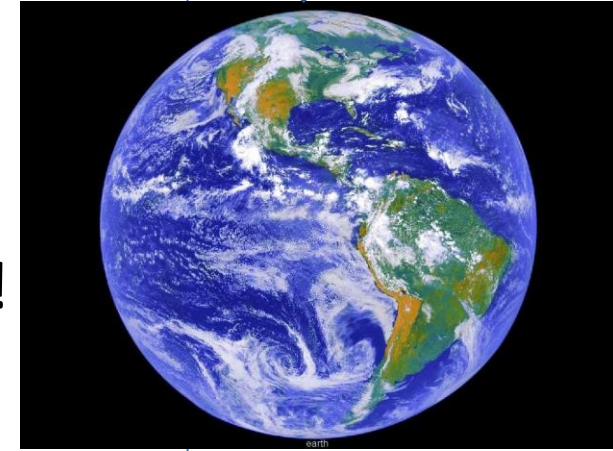
- **le GIF → 2000: 6 modèles/technos/concepts "les plus prometteurs": pour les réacteurs de demain (petits, moyens ou grds) → 6 technos pour un nouveau nucléaire**

- **Le concept SMR** bien que connu a véritablement émergé récemment: **il change la donne**
 - On parle de "Production d'énergie distribuée" → Ca change tout
 - Il est de nature à avancer la disponibilité de réacteurs de petite taille susceptibles de remplacer toute centrale - charbon ou gaz et d'être fourni aux pays/région n'ayant pas l'infrastructure correspondant aux grosses centrales.
 - Il intègre les 6 technos qui seront très probablement testées en SMR

- **La filière REP reste un point d'ancrage essentiel**

Le nouveau nucléaire ? → **RENDRE LE NUCLEAIRE SOCIALEMENT ACCEPTABLE* !!**

- Le réchauffement menace non pas la planète mais bien **l'humanité**.
- **On ne peut pas interdire** aux pays émergents de prétendre aux stds de vie des pays développés
- La demande en énergie va continuer à croître **TRES** fortement
- Tout faire pour **décarboner cette énergie** → Tous secteurs
- Pour jouer **véritablement son rôle** le nucléaire → **facteur 10-30 !**
 - **Les SMR** vont pousser comme des champignons
 - Demain **des milliers de réacteurs ds le monde**, 100-200 en France
 - Impossible en techno actuelle → car rejet sociétal



- • **Nécessité de changer de paradigme : « vers un nuke « socialement acceptable* » » = qui lève les raisons même du rejet :**

- **Sécurité TOTALE** : en aucun cas on aura besoin d'évacuer des populations:
- Minimiser → **DECHETS – traitement du cycle/ Transmutation**
- **Compétitivité**

- Des économies d'E'ie
- Les ENR bien sûr
- La capture/ séquestration du CO2
- Mais aussi le nucléaire qui devrait croître très fortement: **mais qui ne saurait le faire ds les conditions actuelles .**

*Daniel HEUER 2015 <https://youtu.be/FDy9FemEk8Y>

Le nouveau nucléaire

→ le nouveau nucléaire :
GIV +SMR

A retenir :

- La GIV : un nucléaire socialement acceptable: sûr et envrnmnt-friendly et qui répond à toutes les objections
- Les SMR = un chgmt de paradigme → tous usages, toutes régions et sûrs.
- Ils vont s'imposer rapidement → sur base REP ds un 1^{er} temps car bien connue et bien maîtrisée
- Mais aussi en tant que démonstrateurs des 1ers GIV,
- À des échéances sans doute plus proches que les plans/prédictions actuelles.
- Sans condamner les Gdes centrales pour lesquelles un marché demeure

SMR multi-usage:

- Ds l'industrie
- Pour de l'H² vert → transports etc..
- Ds la chimie (engrais- agriculture)
- En complément indispensable aux ENR
- Chauffage urbain
- Centres/usines isolés
- Remplcmt centrale trad.

Vers une energie à part
nuke prépondérante :
Ex CANADA

Le temps long au CANADA

Travailler ensemble pour réaliser le potentiel des PRM. En réponse, RNCAN a lancé en 2017 le projet de feuille de route des PRM avec les provinces, les territoires et les services publics d'électricité intéressés.

Le projet est un programme de dix mois d'engagement avec l'industrie nucléaire, ainsi que les utilisateurs finals potentiels tels que les collectivités du Nord et autochtones et les intervenants de l'industrie lourde, afin d'explorer l'ampleur potentielle d'une progression nationale pour les PMR

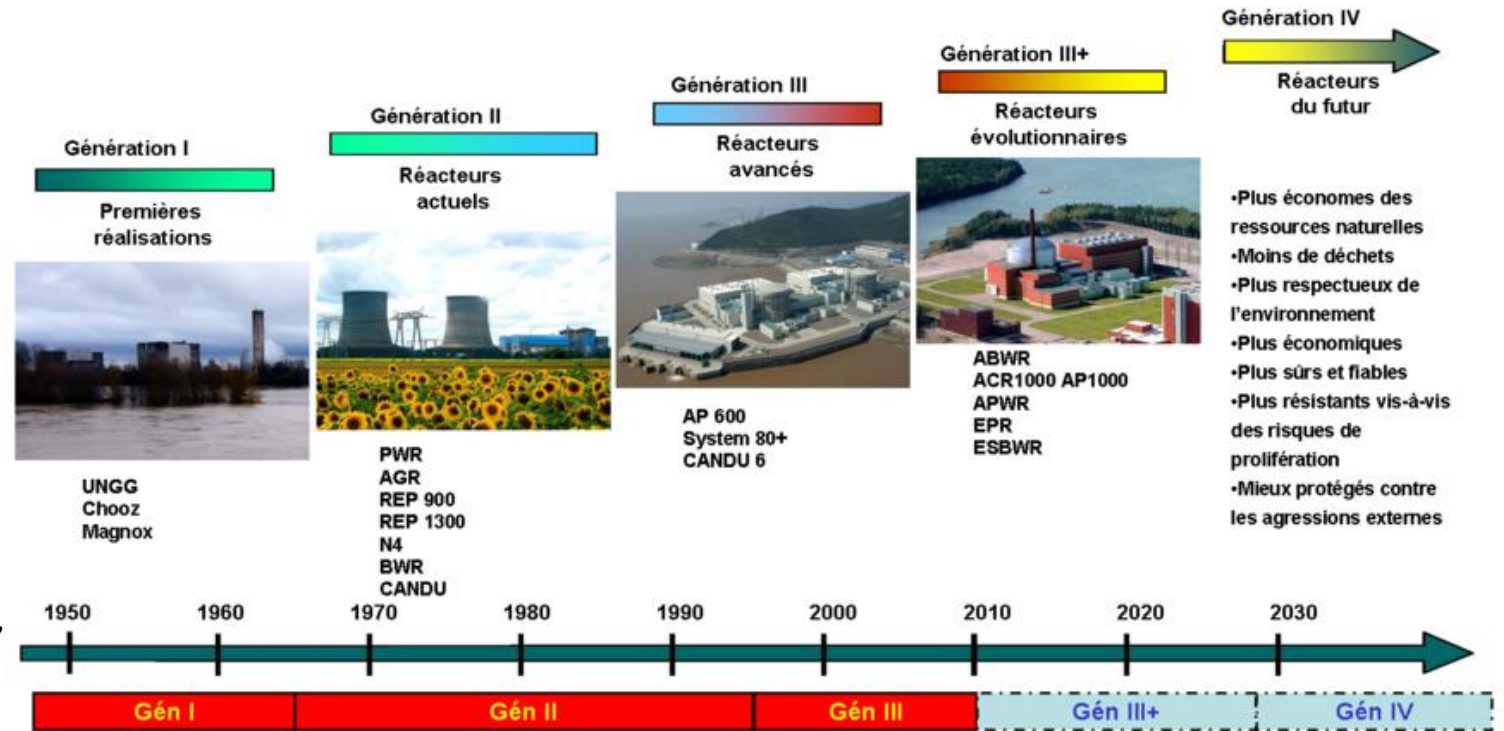
The Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) will have pre-licensing vendor design reviews (VDRs) the NuScale 50 MWe SMR and Westinghouse's eVinci microreactor. The CNSC is now involved with ten pre-licensing VDRs, all for small reactors with capacities in the range of 3-300 MWe.

The NuScale design review will start in mid-2018

Vous avez dit « nouveau » ?.....

Le Forum Int'al GIF G IV

- DOE: Coopération Internationale : 2000
- Développer la 4 ème génération
 - I: protos et GG- II:REP-PWR, III: EPR,AP1000,
 - Maturité technique vers 2030
 - Améliorer la sureté nucléaire
 - Diminuer prolifération (en brulant stocks de Pu)
 - Minimiser déchets (en recyclant actinides)
 - Economiser ressources naturelles (recyclage U238 par ex, MOX) (iso, surgénérateurs)
 - Diminuer couts de construction (simplifier le design)
 - Multiusages: électricité/ Chaleur / H²/ eau potable/ stockage chaleur/..
 - Cycle complet de combustion : obtention du combust / Production d'Eie / gestion des déchets



Le GIF

2000: 6 technos les plus « prometteuses »

En 3/2021

- ➔ • **Durabilité**
 - Utilisation opt des ressources
 - Reduction et Gestion des déchets
- ➔ • **Compétitivité**
 - Avec les autres sources sur le cycle complet
 - y/c avec le risque financier sur l'investissmt
- ➔ • **Sécurité**
 - GIV assureront une sécurité « absolue » et passive
 - GIV présenteront un risque # 0 et conséquences # 0
- ➔ • **Non-prolifération**



[États-Unis](#)
[Canada](#)
[Afrique du Sud](#)
[Chine](#)
[Japon](#)
[Corée du Sud](#)
[Brésil](#)
[Argentine](#)
[Union européenne](#)
[Russie](#)
[Suisse](#)
[France](#)
[Australie](#)
[Royaume-Uni](#)

EN MEME TEMPS: le GIF prend le contre-pied des écolos dont le fonds de commerce est:

1/ risque d'accident catastrophique « voir T, voir F, etc » **Même si le risque est « faible » les conséquences peuvent être désastreuses**

2/ les déchets constituent **une menace permanente** pour les générations futures → (x100 000 années)

En ➔ 1/ **Éliminant virtuellement le risque d'accident** ou en tous cas ses **conséquences**.

➔ 2/ En proposant des solutions de retraitement et de **transmutation des déchets** . → (x100 000 années → 2-300 a.)

En résumé

- La pré-histoire

- Marie Curie
- Fermi: 2 dec 42 Chicago pile One
- Le choix militaire: U/Pu
- Les PWR – Westinghouse-GE

- En France :

- Filière G-gaz
- Puis license W: PWR
- Envolée magnifique des années 70

- Aujourd'hui :

- 3 générations mais pas d'évolution de rupture depuis 50+ ans :
 - On est et on reste ds l'eau pressurisée
- Des essais néanmoins :
 - Surgénérateurs (Rapsodie, Phénix, S-Phx) très satisfsts
 - ASTRID projet CEA
 - MSR/RSF projet Cnrs
- Puis traversée du désert, les « errements » et,
- Tout d'un coup → urgence clim oblige:
 - ça foisonne...de toutes part
 - Relance générale du nuke (exc All,Aut,..) mais perte d'expertise

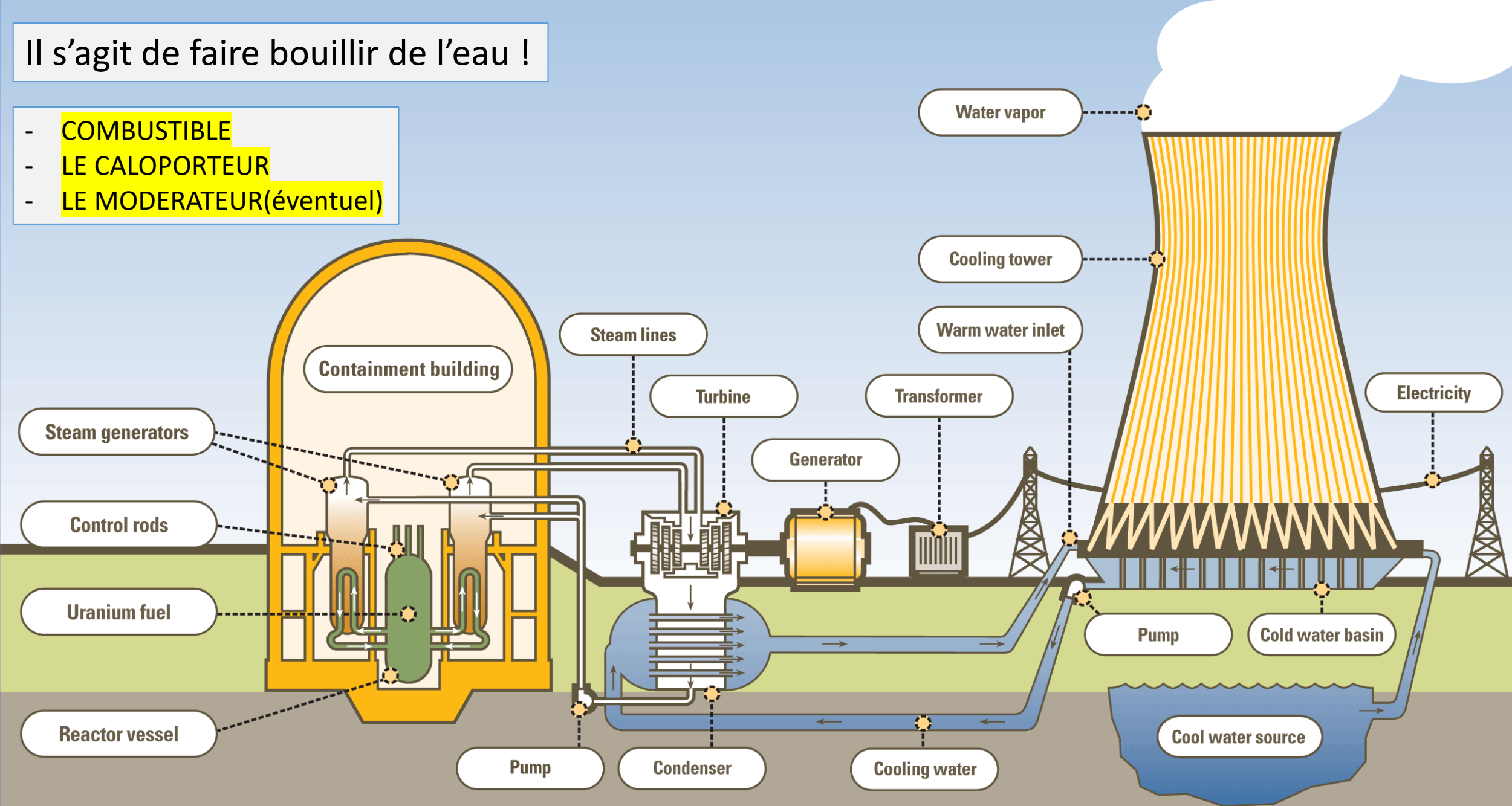
Planifier demain:GIV Int'al FORUM : 14 pays définissent → La NOUVELLE GENERATION : les technos les plus prometteuses à grde ou petite échelle (SMR, MMR)

II Back to BASICS

- Avant d'aller plus avant, quelques rappels sur « comment ça marche tout ça ? »

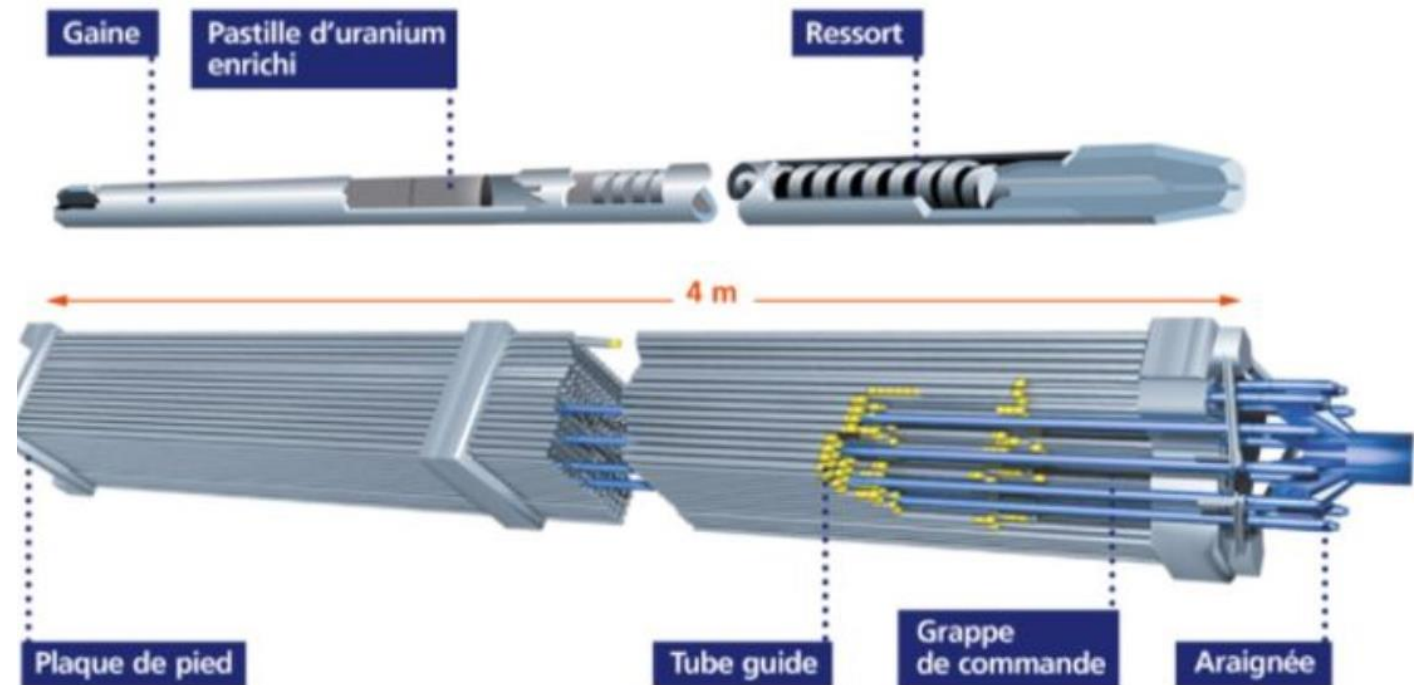
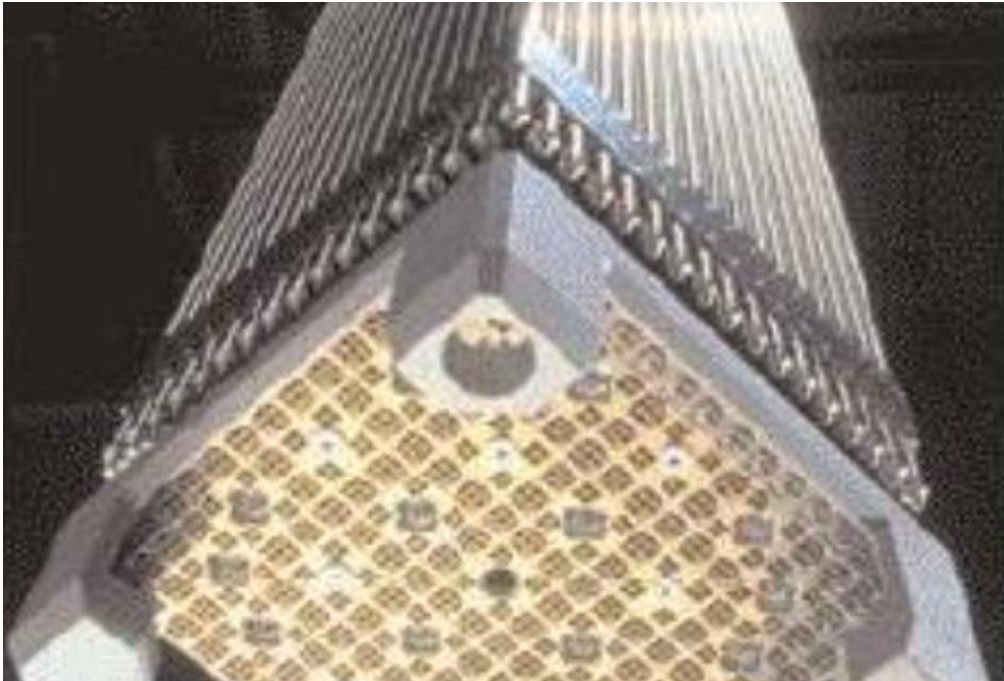
Il s'agit de faire bouillir de l'eau !

- COMBUSTIBLE
- LE CALOPORTEUR
- LE MODERATEUR(éventuel)



Cœur EPR – les crayons de Zirco – pastilles d'U

Cœur: 241 assemblages de 256 crayons = 1 ère barrière
(2 ème circuit primaire, 3 ème enceinte)



Back to basics : comment ça marche ? Qq rappels

- On parle de fission
 - Fissiles, (fissibles si nR^*) et fertiles
- 2 fissiles naturels : U 235, Pu 239
- Autres fissiles : Pa 230, Th 227, U (231-232-233), Pu (236-37-39-41-43), Am (241-42-44), Cm, Cf
- Des fertiles Th232, Pu, esstlmt, ...
- Th232 $\rightarrow$ U233 (232) $\rightarrow$ cycle du Th
- Le Th : altern valable ? voir + loin

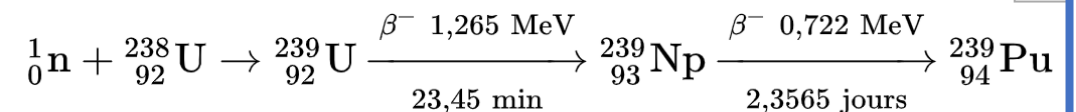
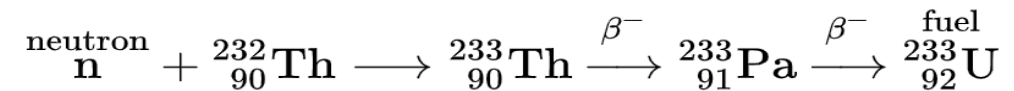
3 choses à fixer:

- COMBUSTIBLE
- LE CALOPORTEUR
- LE MODERATEUR(éventuel)

3 éléments à combiner $\rightarrow$ n x filières, qq unes ci-dessous:

REP (PWR)	REB (BWR)	CANDU (PHWR)	UNGG-MAGNOX-AGR	RBMK (LWGR)	RNR
U enrichi 3%	U un peu moins enrichi	U nat	Unat/Uenrichi 2.6%	U enrichi (1.8%)	Uret ou Uapp ou Unat Pu
Eau sous pression	Eau bouillante	Eau lourde	Gaz carbonique (CO2)	Eau sous pression	Sodium, Plomb, Gaz
Eau	Eau	Eau lourde	Graphite	Graphite	

* N rapides et n thermiques $\rightarrow$ cycle ouvert, cycle fermé



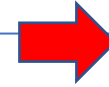
n-rapides et n-thermiques

- les 1^{ers} sont émis en l'absence de ralentisseur. Ils ont bcp d'énergie et peuvent casser des fissibles, mais sont « **peu efficaces** » (nbre de capture -> fission) pour entretenir une réaction en chaîne: mais ils permettent le **CYCLE FERME**
- Le modérateur est un medium qui les **ralentit idéalement sans les capturer** (rebondissent) et les convertit en n-thermiques à énergie plus faible → **CYCLE OUVERT**
- Ces n-th sont bcp-bcp plus à même de **propager efficacement** la react en chaîne de fissiles.
- Des modérateurs usuels: l'eau (légère) 75%, graphite pur (boron) 20%, l'eau lourde 5%, Be.

• CHOIX ? Dépend de la finalité recherchée.

• Quelle finalité ? En gros:

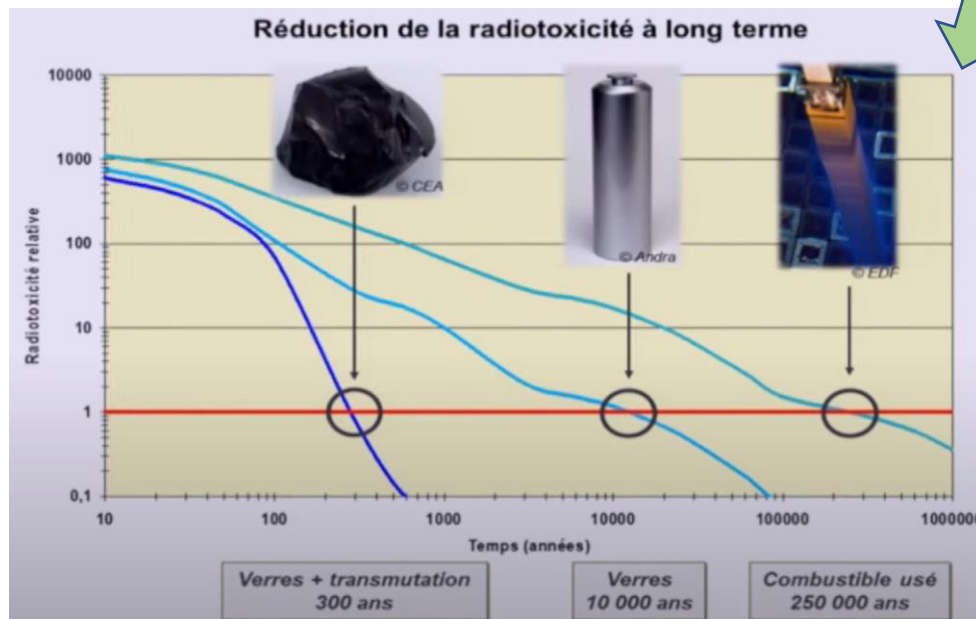
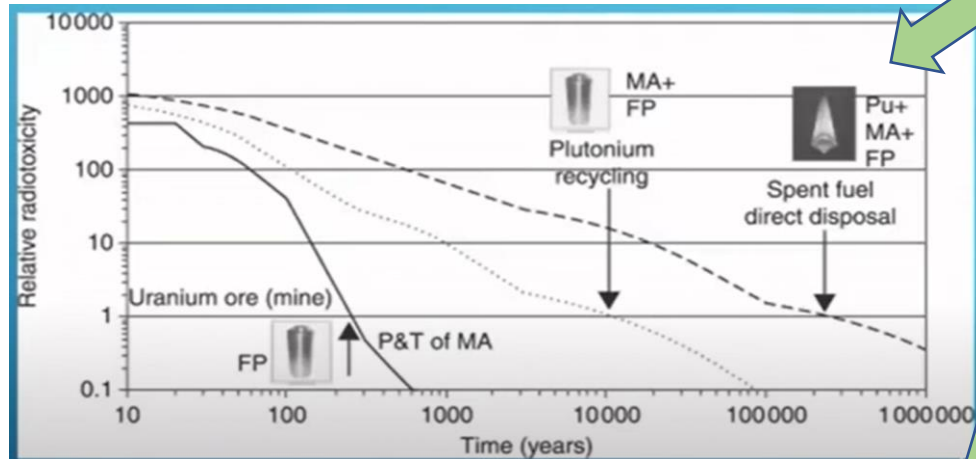
- **Bruler ou recycler des déchets** (fissibles mais pas fissiles)
→ n-rapides (PU, actinides min, ...)
 - → **CYCLE FERME'**
- **Produire de l'élect, de la chaleur, ...**
 - N-th plus efficaces, Meilleur rdmt
 - → **CYCLE OUVERT** → Cycle du combustible, Retraitement, gestion des déchets



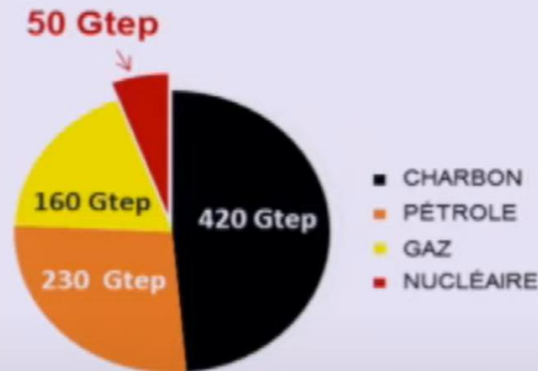
<u>nR= rapides</u>	<u>nth= thermiques</u>
50Kkm/s	2,2km/s
MeV	0,0025 eV
Cycle fermé	Cycle ouvert

nR= CYCLE FERME → 2 choses clés

→ Transmutation et 100% vs 0.7% du combust



- Ramener la radiotoxicité à 2-300 ans vs 10 000, voire x00 000
- Surtout avec des MSR → pas de préparation et « brûlent » tout ds la « soupe »
- R-PhX-SuperPhX(84-97, 1240 MWe)-ASTRID



Utilisation (actuelle) de l'uranium en réacteurs à eau

Ressources conventionnelles identifiées (BP statistical review, 2013 and NEA, 2012)



Historiquement : qq retours d'expérience à savoir

- **1: Plus la temp du caloporteur est élevée → meilleur est le rdmt**
 - GG → PWR:REP → Na, Pb, gaz ss pression, sels fondus, eau super-critique, THT...
 - GII 25%, GIII 25-30%, GIV 40=45%
- **2: Plus c'est gros moins ça coûte au KW (voir plus loin)**
 - On n'a pensé aux SMR (« small is beautiful ») que récemment
- **3: choix du caloporteur : Pression et risque d'explosion/ d'incendie:**
 - Plus la pression est élevée → plus le risque d'explosion et de dissémination //
 - Tous les caloporteurs ne sont pas neutres :
 - Na+air → Feu, Na+eau → explosion
 - Pb ,
- **4: Moins il y a de pompes et de tuyaux et d'échangeurs et mieux on se porte : EPR → EPR II, G IV:**
 - Plus on a de risque « au départ » plus les mesures de sécurité s'emballent:
 - Ex: triple circuit de refroidissement sur EPR → double sur EPR II
- **5: Il faut savoir traiter la chaleur résiduelle après arrêt**
 - Quand ça s'arrête, ça continue : Fukushima
- **6: Il faut savoir « gérer » le cycle :**
 - Qd on arrête la filière ça continue aussi : réduire la dangerosité des déchets restants : recycler/ retraiter , voire TRANSMUTER
 - Retraitement permanent: une bonne base,

Aujourd'hui : des choix selon objectifs

- **Un panel de qq 10 filières parmi 200+ possibles**

- Choisir la fonction 1 ère :
 - Produire de l'Eie
 - En Réutilisant des produits disponibles
 - Avec des produits plus abondants
 - En iso ou sur générateur
 - Bruler des produits de fission
 - Fournir d'autres fcts : chaleur, prod H², desalinisation, industrie, stockage (ENR)

- **Choix du combustible:**

- Choix très limité:
 - Seulement U ou Pu sont fissiles
 - Il y a des fertiles (→ fissiles par capture n) dont les plus connus: le Th, et l'U 238
 - En pratique U-Pu, Pu, MOX, U-Th

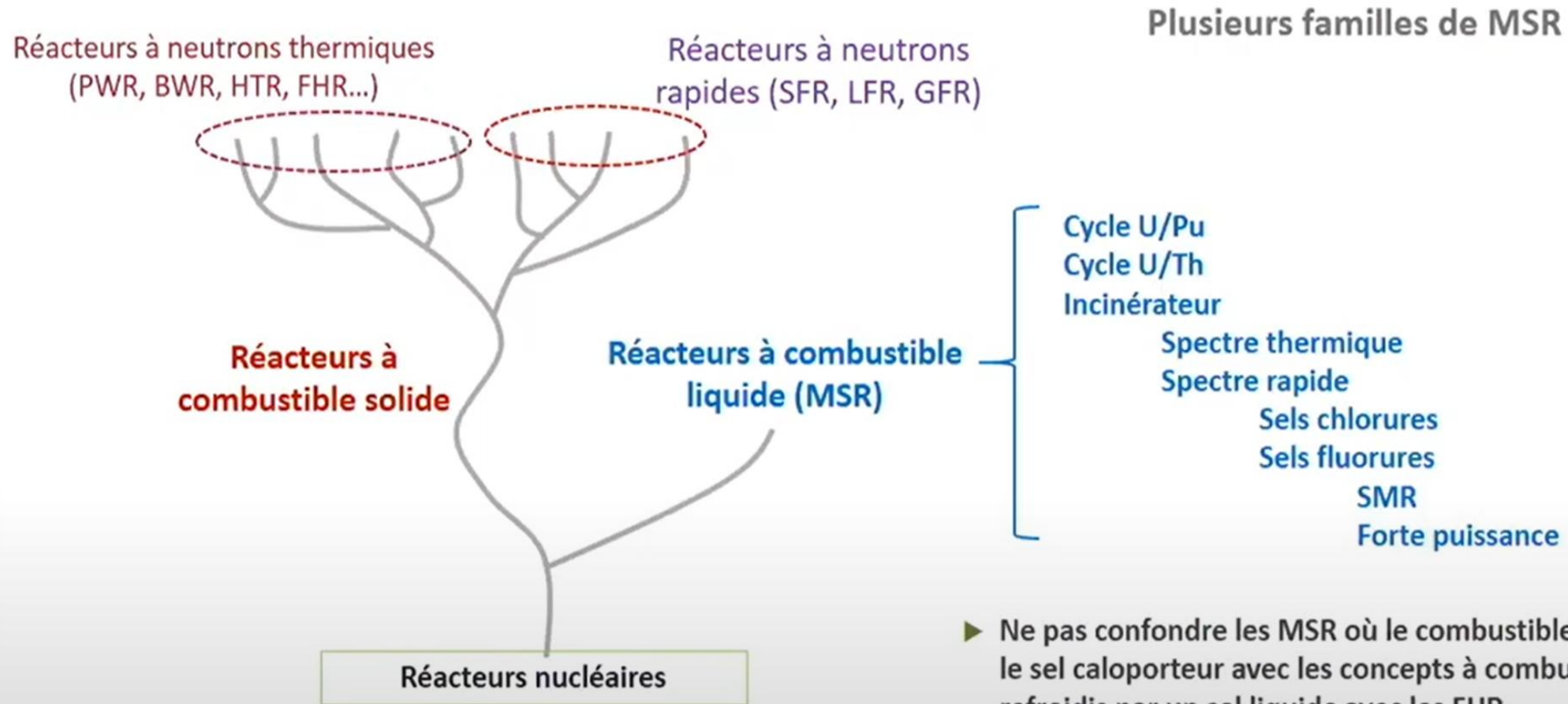
- **Choix de la filière:**

- Hist: GG→GI, PWR/REP →GII,
- Aujourd'hui : EPR ou W1000 en GIII, ou SMR-GIII ou une des 6 →GIV en forte puissance ou SMR

- **Choix du caloporteur:**

- Eau ss pression, gaz ss pression, Na, Pb, sels fondus (chlorures, fluorures)

REACTEURS à COMBUSTIBLE SOLIDE ou LIQUIDE *(source CEA)*



- Ne pas confondre les MSR où le combustible est dissous dans le sel caloporteur avec les concepts à combustible solide refroidis par un sel liquide avec les FHR
- Les FHR (Fluoride High temperature Reactor) sont des HTR refroidis par un sel caloporteur

III- La nouvelle génération

- Le GIF GENERATION IV
 - Des objectifs partagés pour les futurs réacteurs
 - Les 6 modèles / technos / concepts les plus prometteurs pour demain

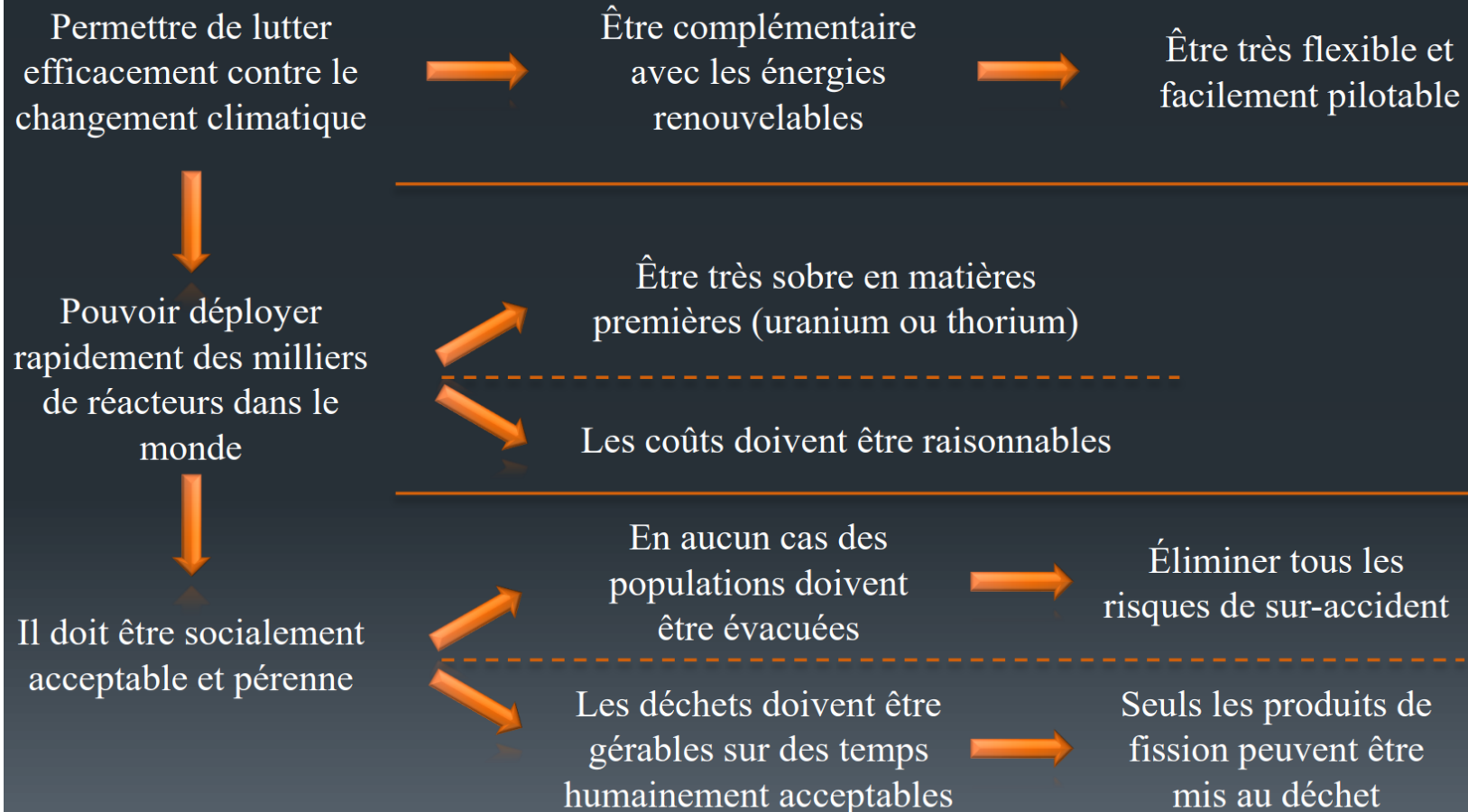
GIV : caractéristiques clés à retenir

- ➔ • Sécurité passive → risque → 0 ou #0 → surtout les conséquences !
- ➔ • Rdmt >> amélioré: htes temp. et utilisation de #100% du combust (vs 0.7%)
- ➔ • Multi-fonct/usages en sortie: Elect, chauff urb, indust, stock-interm, H², eau pot.
- ➔ • Fermeture du cycle selon la filière → possibilités de
 - 1/ surgénération: 97%/100% vs 0.7%/3-4%
 - 2/ retraitement / transmutation

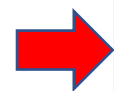
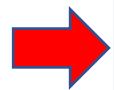
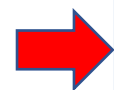
- 3 AXES CLES du GIF:
 - DURABILITE
 - COMPETITIVITE
 - SECURITE

GIV : critères clés

Quels sont les critères d'évaluation d'un réacteur nucléaire de fission du futur ?



Les 6 technos en 2 mots



System	Neutron spectrum	Coolant	Outlet Temperature °C	Fuel cycle	Size (MW _e)
VHTR (Very-high-temperature reactor)	Thermal	Helium	900-1000	Open	250-300
SFR (Sodium-cooled fast reactor)	Fast	Sodium	500-550	Closed ★	50-150 300-1500 600-1500
SCWR (Supercritical-water-cooled reactor)	Thermal/fast	Water	510-625	Open/ closed ★	300-700 1000-1500
GFR (Gas-cooled fast reactor)	Fast	Helium	850	Closed ★	1 200
LFR (Lead-cooled fast reactor)	Fast	Lead	480-570	Closed ★	20-180 300-1200 600-1000
MSR (Molten salt reactor)	Thermal/fast	Fluoride salts	700-800	Closed ★	1000

Comm. by 2020

Target comm. 2020

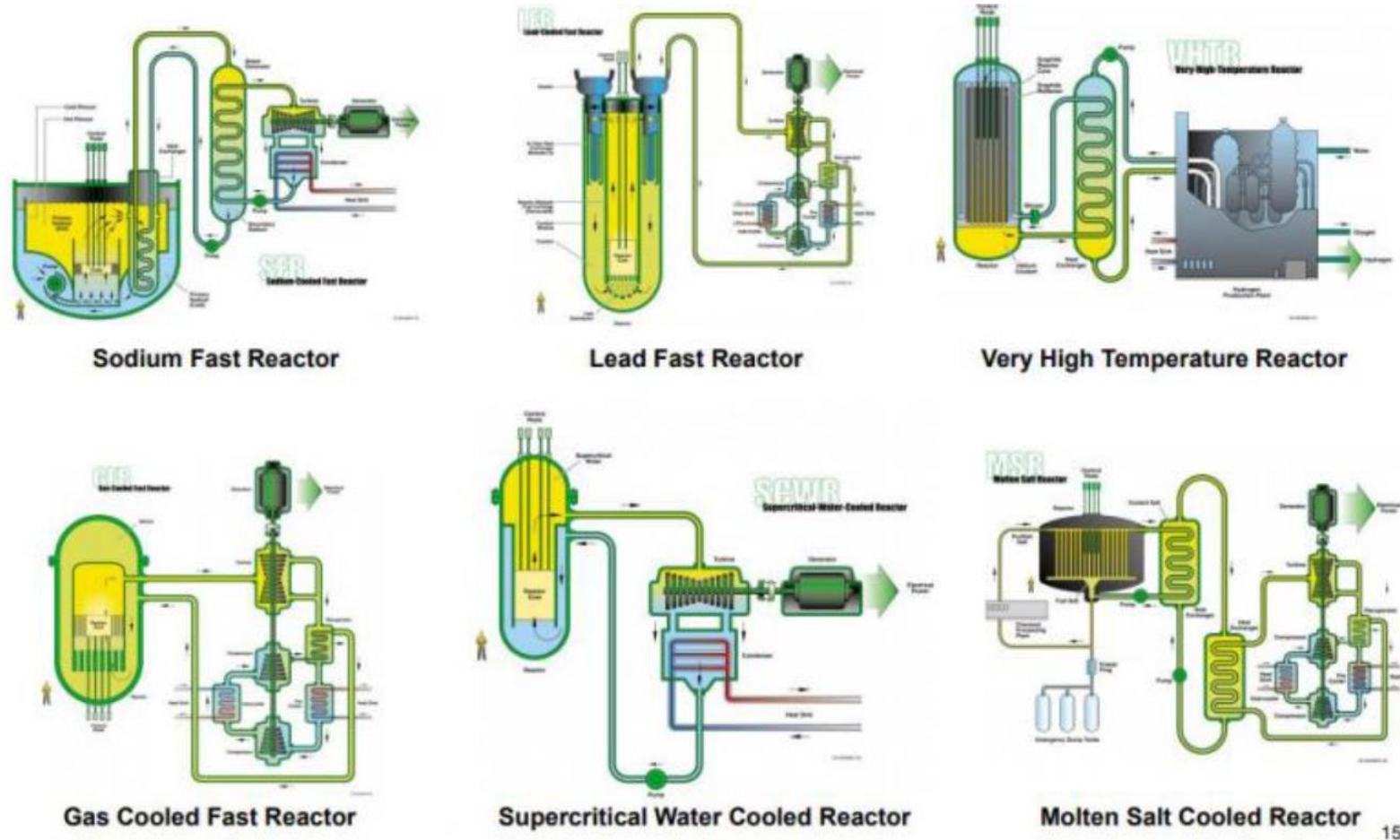
30-150MW target
comm 2022

Demo reactor by
2020

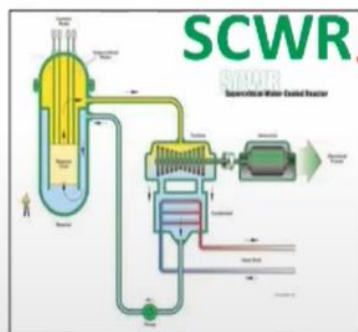
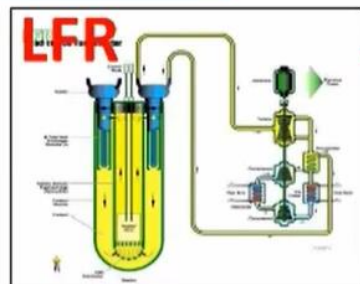
Comm. by 2025

Comm. by 20-22

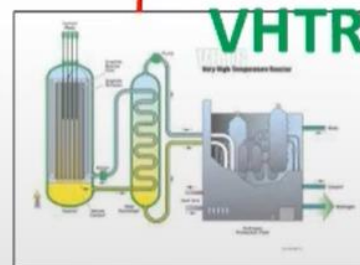
The G IV BIG 6



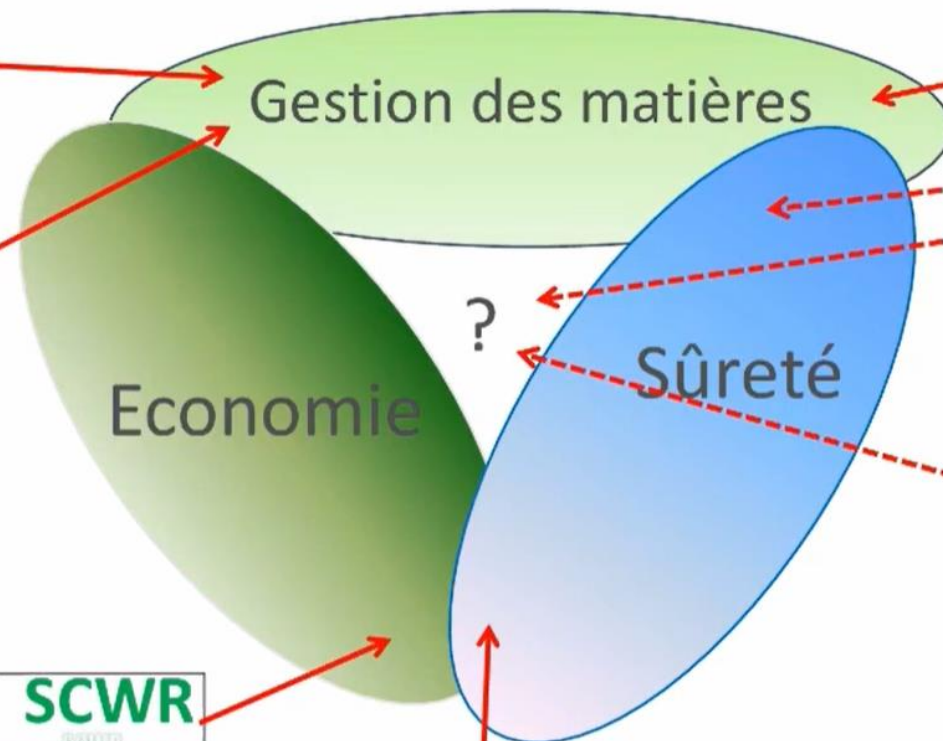
The organisation expects that some of these reactor designs could be demonstrated and commercially rolled out in around 2030-2040, and current members are already developing and constructing prototype technologies.



Supercritical Water-cooled Reactor (SCWR)



Very High Temperature Reactor (VHTR)



Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)



Molten Salt Reactor (MSR)

ASTRID

SMR SFR ?

The perfect GenIV reactor is safe, cheap, resistant to proliferation, sustainable, flexible and compatible with the intermittency of renewable energies

MSR pourrait concilier les 3, les SMR peut-être aussi

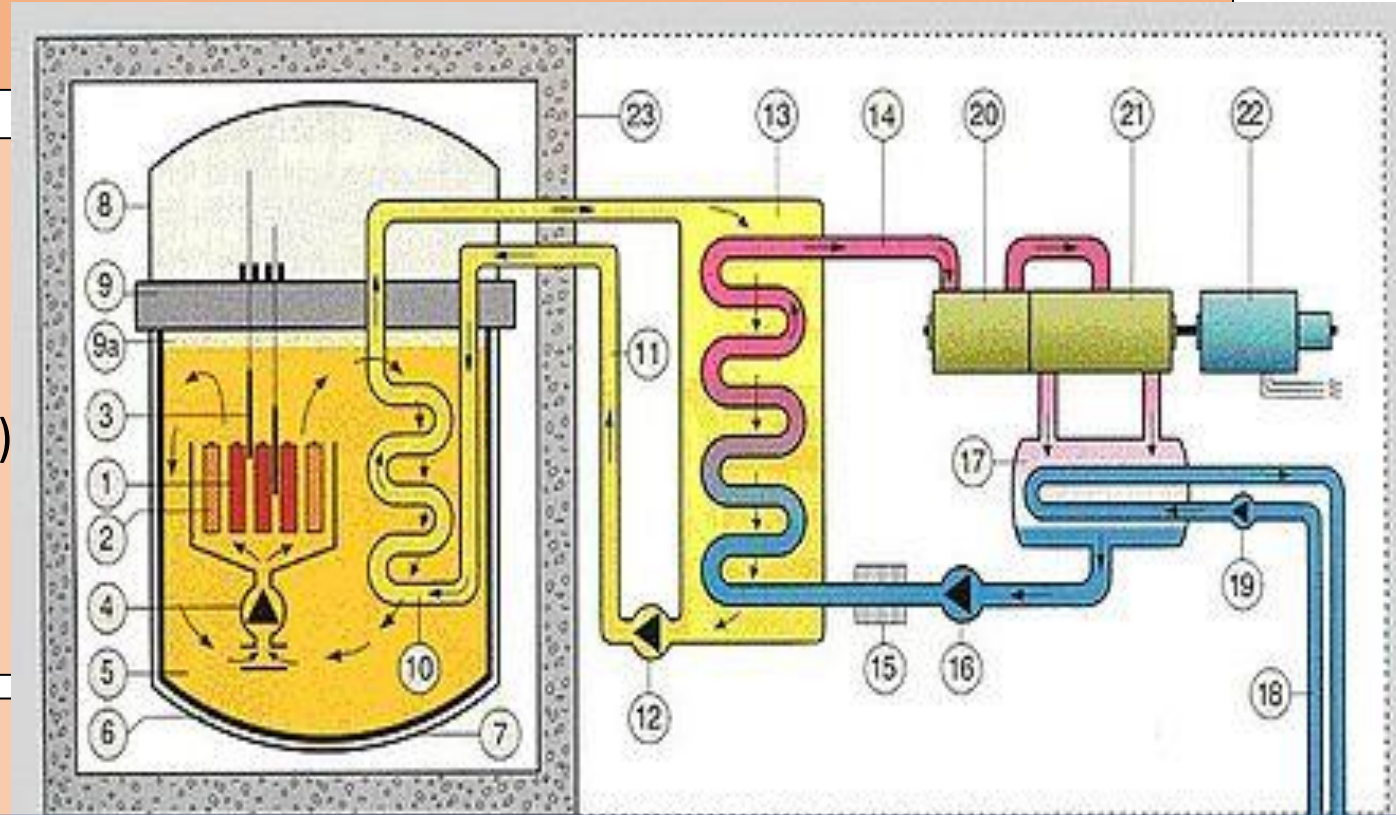
1. SFR – RnR-Na

- France: Filière Rapsodie, Phx, S-Phx, ASTRID
- Sodium : caloporteur et réfrigérant :
 - Sortie à 510-550° : rdmt >> 40%
- Réacteurs arrêtés: 14 dont les 3 F
- R en fctmt: 2 russes, 1 indien, 1 chine (CEFR-2011)
- En constrct : 4 dont Natrium
- Arrêtés: 5 dont ASTRID,
et MONJU (250j/22 ans, 8Md+3)

- POUR:
 - Le Na: Excellent caloporteur peu modér.
 - Possibilité de n rapides
 - Pas de pression
 - Pas de corrosion de l'acier
 - Recycle les déchets de HA (Pu, act)
 - Meilleur REX → meilleur 1 er candidat GIV

CONTRE:

- Na s'enflamme → risque maitrisable
- Coeff Mod/vide >0 (react de puiss) → risque emballmt



CYCLE FERME:

- $nR \rightarrow \text{Unat (238)} \rightarrow \text{Pu fissile} \rightarrow \text{Possibilité iso/sur-générat}$
 - possibilité Transmut Actinides-min à vie très longue
 - 550° vs fusion à 900° = marge
 - Comb= MOX, UPuO_2 , .. UPuZr
- 2 TYPES: - Intégré Phx, S-Phx, PFR, CEFR - A boucles Joyo, Monju

2. LFR – RnR-Pb

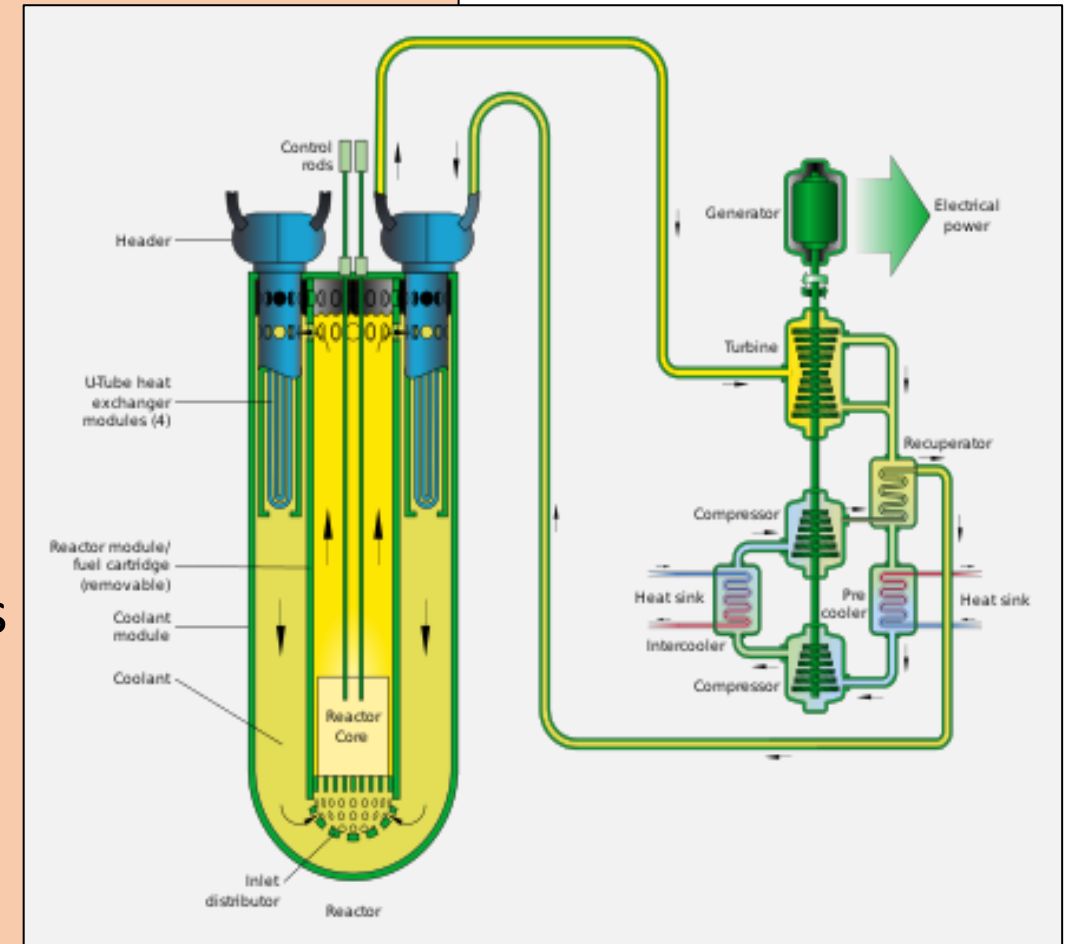
- POUR:

- Le Pb-f ne ralentit pas les n
- Renvoie les n ds le cœur
- Pas d'activation par n
- Ne s'enflamme pas mais se solidifie
- Peut aller $\rightarrow 1400^\circ$, pratiquement 500-550°
- Passive cooling possible (nat convection)
- Rdmt > 40% (hte temp)
- Pas de pression: si fuite, pas de projections

- CONTRE :

- Le Pb
- Plus corrosif et abrasif que Na

Très utilisé par les russes (ss-marins)



Deux projets sont développés dans le cadre du GIF : SSTAR et ELSY
Plus RUSSIE : BREST 1200

3.GFR, gaz-cooled fast reactor

- Calop= He
- Spectre nR
- Cycle fermé U-Pu
- Retraitement et transmutation (id RnR-Na)
- Objectifs: élect + hte temp pour process chim/indust
- POUR:
 - Coeff mod/vide=0 → résolu
 - Hte temp. (850°)→ rdmt>

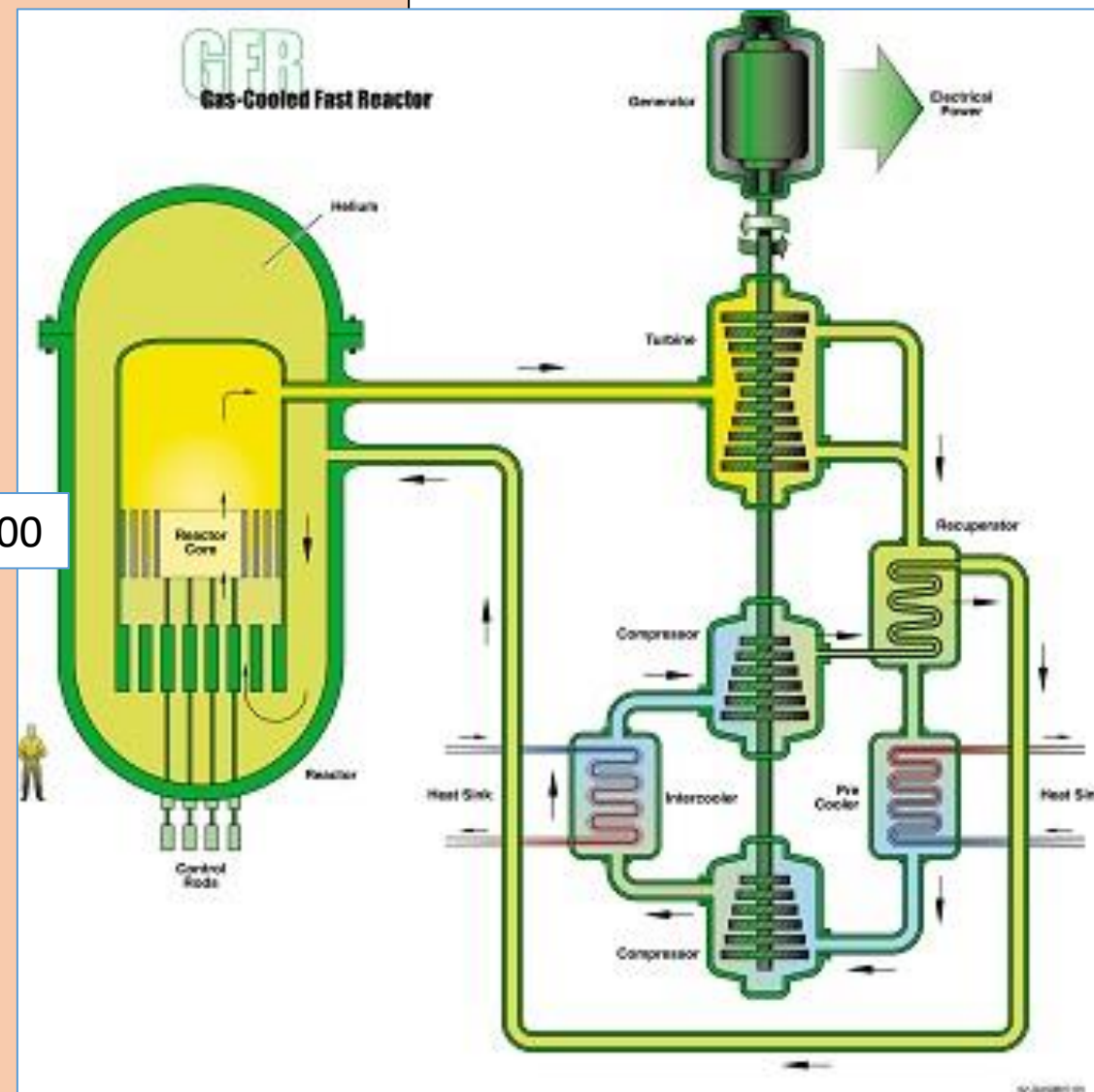
• CONTRE :

- Mauvais caloporteur
- Chaleur résiduelle difficile à évacuer *
- Difficultés de refroidissement si gros *

* Pas le cas en SMR/MMR voir Xe-100

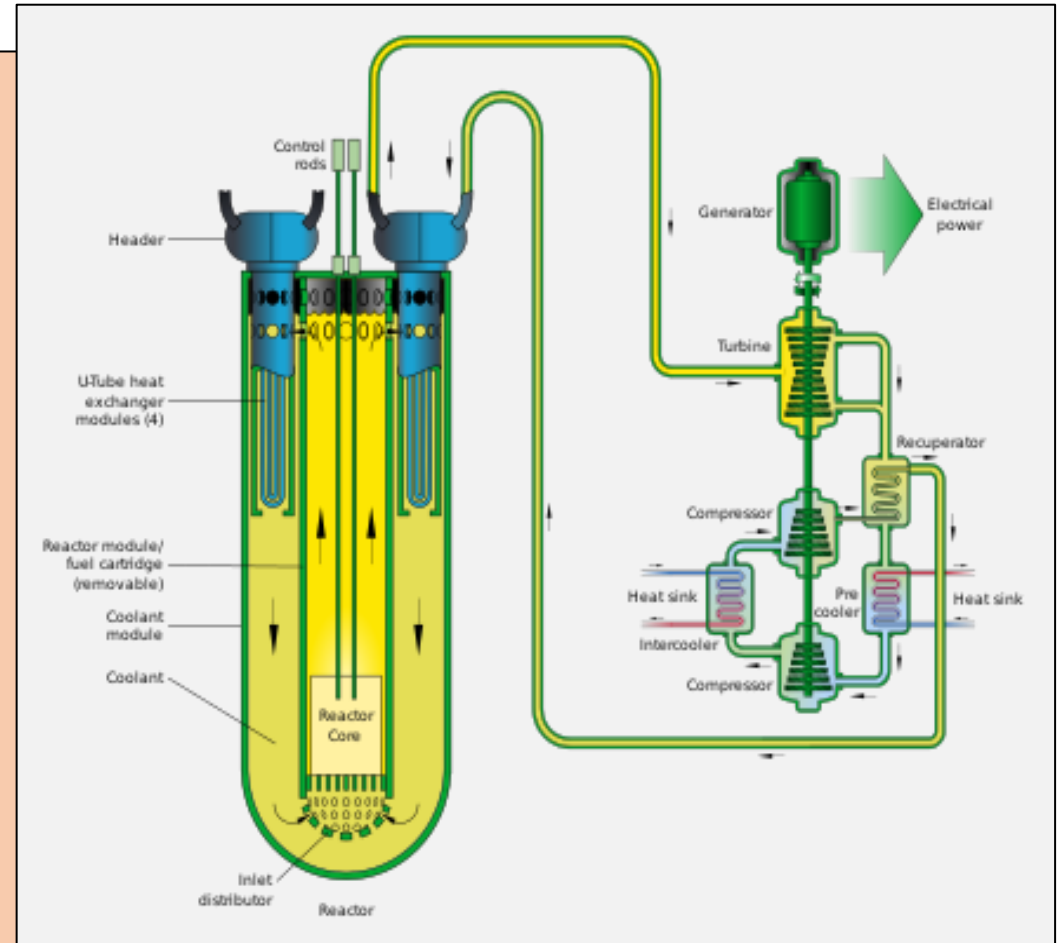
• 15-9-21

- China Huaneng Group (CHGC) has announced the start up of its gas-cooled HTR-PM small modular reactor (SMR) after a nine-year construction, research
- HTR-PM is the **world's first pebble-bed modular high-temperature gas-cooled unit (HTGR)**
- Demonstration reactor that uses two identical gas-cooled high temperature modular reactors to produce the heat for a modern, subcritical, 200 MWe steam .
- 21/12/21 : Connexion au réseau



4. VHTR

- Caloporteur He
- Modérateur Graphite : nth
- Combust.= ceramiques:
 - **TRISO particles** embedded in a graphite matrix, which is then formed either into pebbles (tennis ball size spheres) or into compacts (thumb-size rodlets).
- POUR:
 - Il a été choisi pour son rendement proche de 50 % et sa capacité à produire du dihydrogène sans émission de dioxyde de carbone (voir Cycle soufre-iode bien meilleur que électrolyse ou reformattage).
 - Également intéressant pour processus chim/indus à hte temp (aciéries)
 - **THT = 950-1000° C**
 - Sûreté intrinsèque (faible densité)
- CONTRE :
 - Bcp de recherche encore nécessaires → cycle IS= une source viable d'hydrogène
- Evolution à plus long terme du HTR
 - Usage très spécialisé
 - Horizon lointain

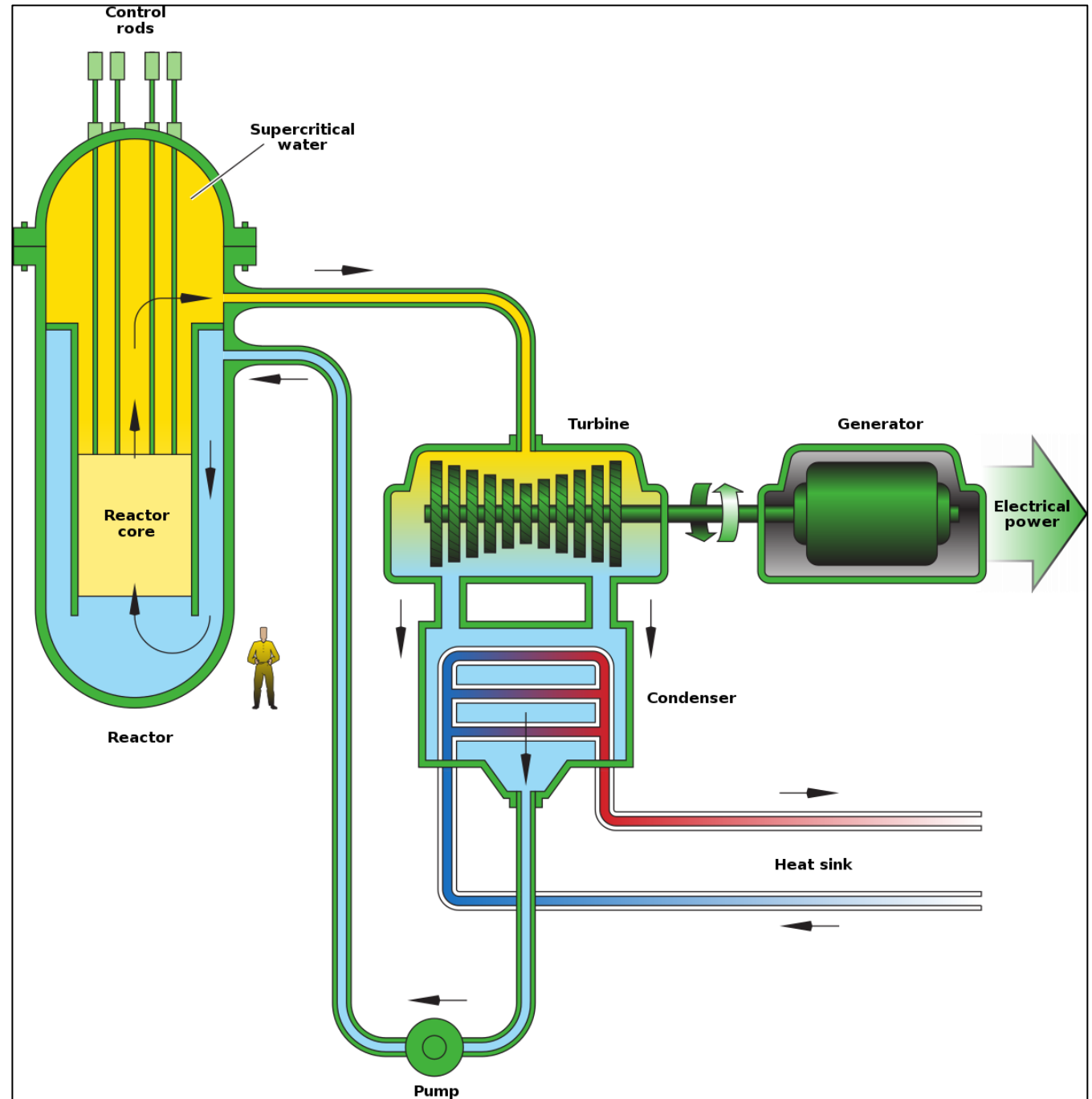


5. SCWR

- Dérivé de PWR-REP
- Pression super-critique: 221+ bar-- T= 374+
- Plus simple: Pas besoin de générateur de vapeur pas de bulles
- Rdmt 33% → 45%

- POUR :
- Procédé bien maîtrisé, facile à mettre en O.
- Déjà utilisée en centrale-charbon
- Abondance de REX
- Bcp plus efficace et simple que BWR et PWR
- Combustible UO_2 (avec mod.) ou MOX
- L'eau est le modérateur et le caloporteur: injection directe ds la turbine

- CONTRE :
- Risque inhérent à la filière PWR aggravé par la surpression.
- Comportement de l'eau supercritique sous irradiations → ?? Tests en cours
- Pas de circuit indepdt



6.MSR

- VOIR LE FOCUS CI-APRES

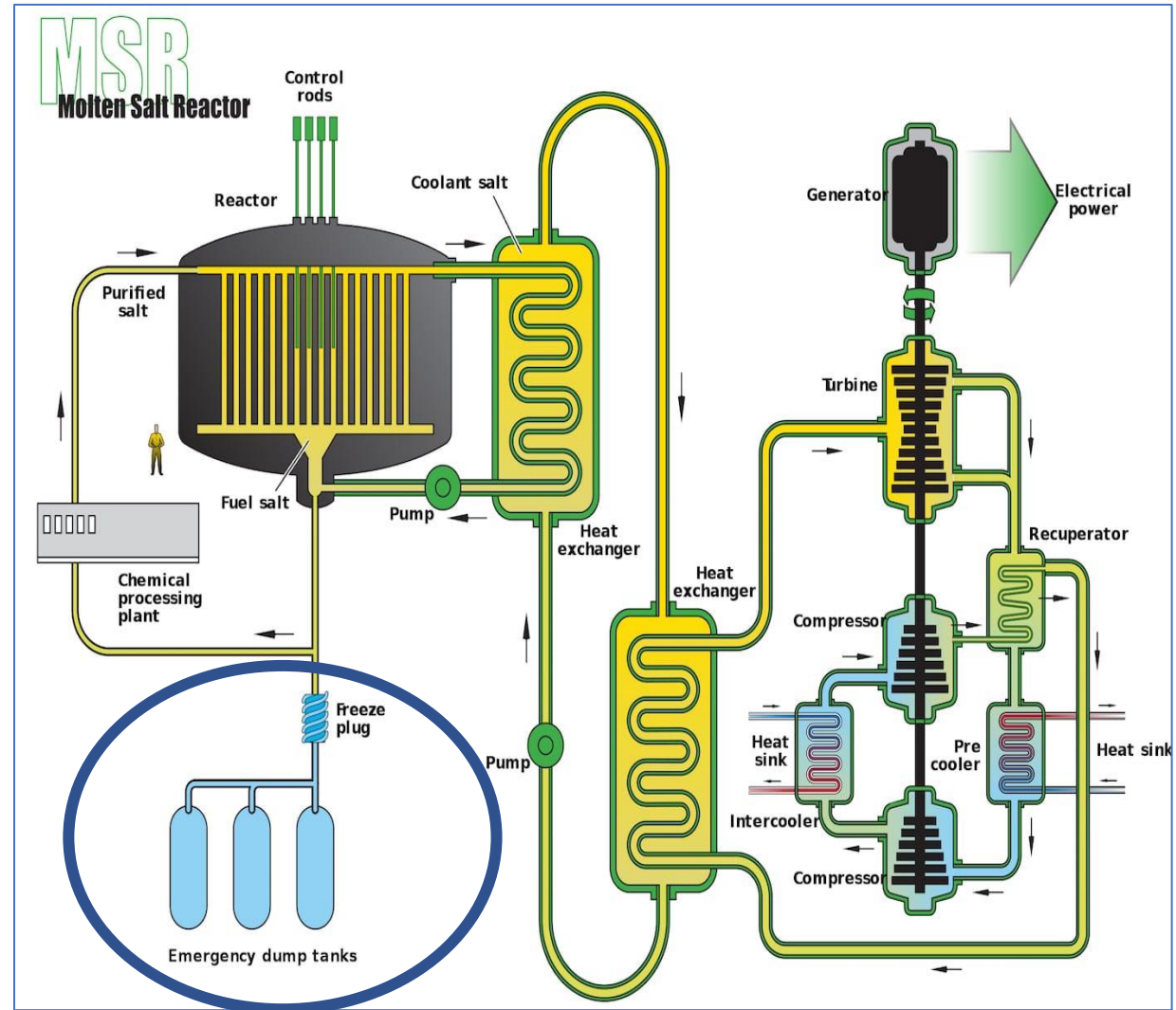
- POUR: coche toutes les cases

- SECURITE
- EFFICACITE
- SIMPLICITE → Faible cout (CAPEX et Ops)
- DURABILITE: Iso/Sur-Gé: mgmt ressources
- VERSATILITE

- Combine avantages des RnR(recyclage-transmutation) avec ceux des MSR (basse pression, hte temp, transparence optique)

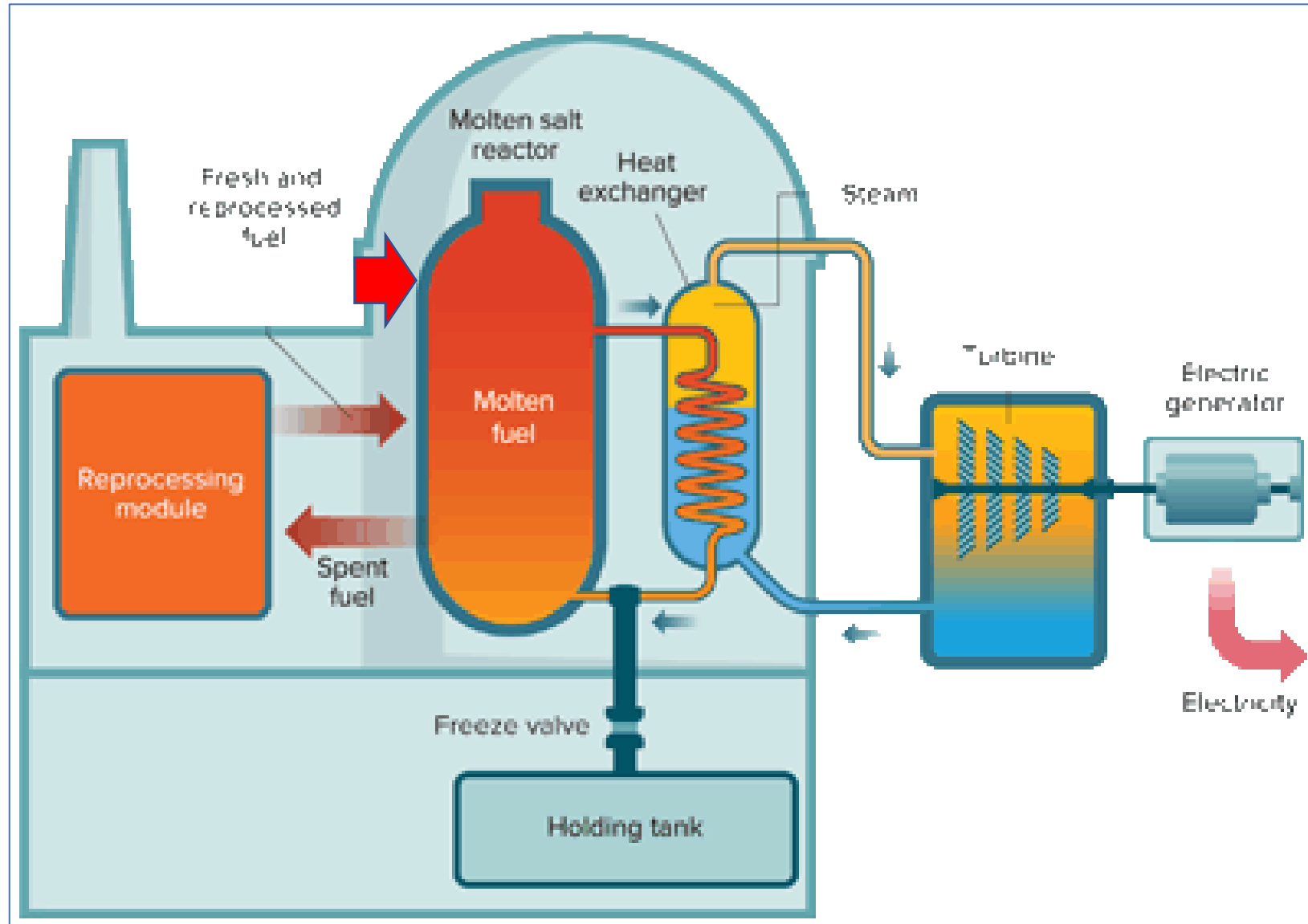
- CONTRE :

- Métallurgie – chimie des sels
- Tenue des matériaux ss irradiation à the temp / forte corrosion
- REX limité bcp des tests à faire



IV - Focus sur les MSR

MSR schéma de principe – Comment ça marche ?



les MSR dans l'arborescence des possibles

Réacteurs à neutrons thermiques
(PWR, BWR, HTR, FHR...)

Réacteurs à neutrons
rapides (SFR, LFR, GFR)

Réacteurs à
combustible solide

Réacteurs à combustible
liquide (MSR)

Cycle U/Pu
Cycle U/Th
Incinérateur

Spectre thermique
Spectre rapide

Sels chlorures

Sels fluorures

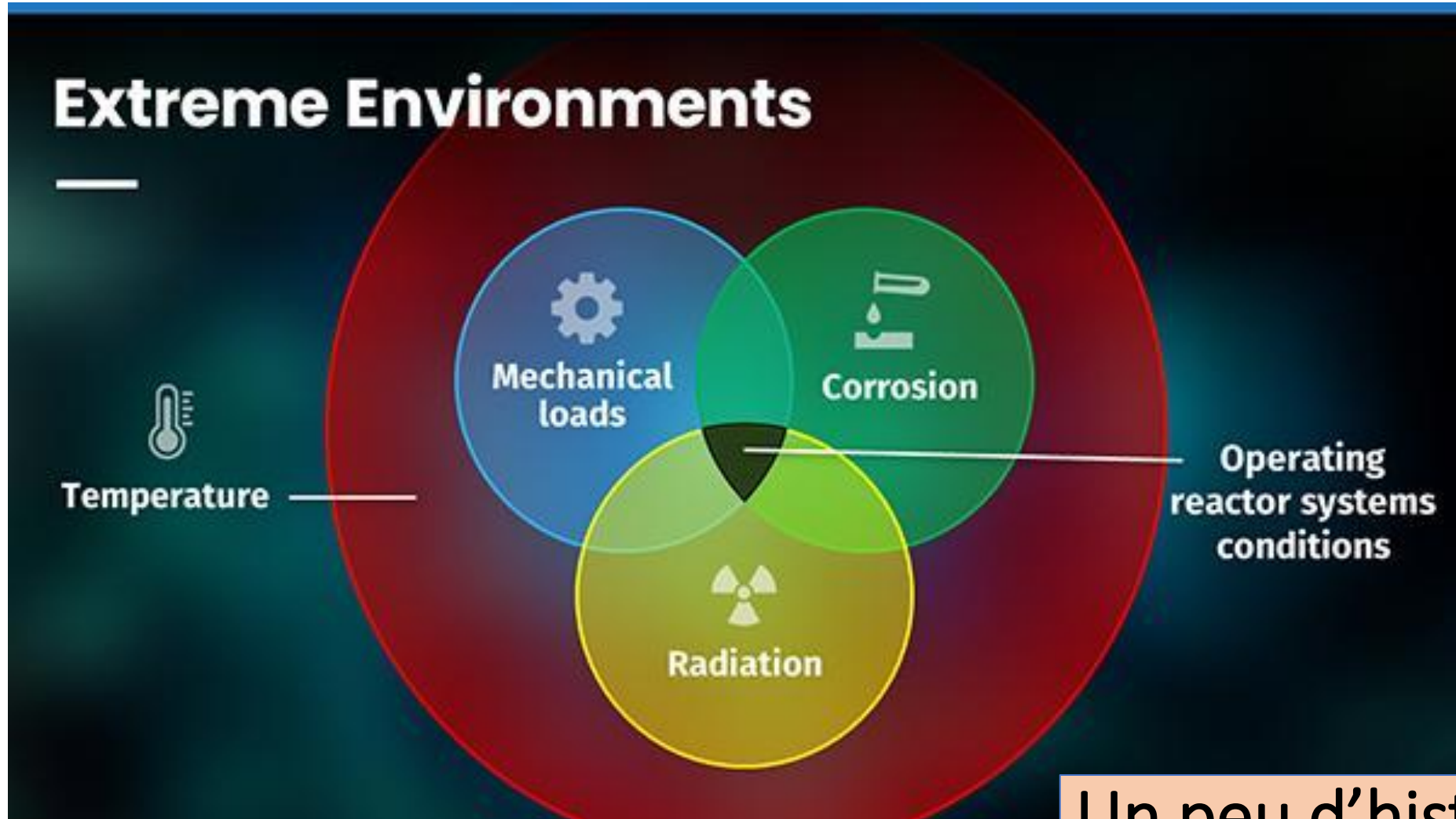
SMR

Forte puissance

Réacteurs nucléaires

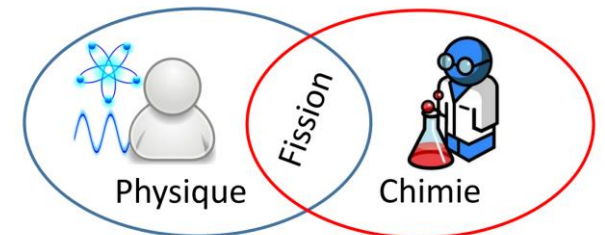
- Ne pas confondre les MSR où le combustible est dissous dans le sel caloporteur avec les concepts à combustible solide refroidis par un sel liquide avec les FHR
- Les FHR (Fluoride High temperature Reactor) sont des HTR refroidis par un sel caloporteur

MSR: Une équation difficile à résoudre



Un peu d'histoire...

- Prédits par E.WIGNER & A.WEINBERG dès 1944-45
 - « Preliminary calculations on a breeder w/ circulating fuel »
- Le leadership a été préempté par les physiciens:
 - Projet Manhattan etc.. Militaire → Pu
- Idée et concept repris à OAK RIDGE Lab :
 - 1954: Reacteur ARE pour Convair-B36 (1000h, 2,5MWth): « l'avion atomique »
 - 1964-69: MSRE: the molten salt react experiment (7,4MWth, 650°, U+(66-68) U233(68-69)-Pu(69)
 - Mis en sommeil de la recherche ← Westinghouse/GE
- « REDECOUVERT » récemment* → fort engouement* CNRS G 2006-2012
- On y revient qq 50 a. avec qq 10-20 projets ds le monde.
 - Idéalement marier physique et chimie



L'AVION ATOMIQUE

CONVAIR NB-36-H

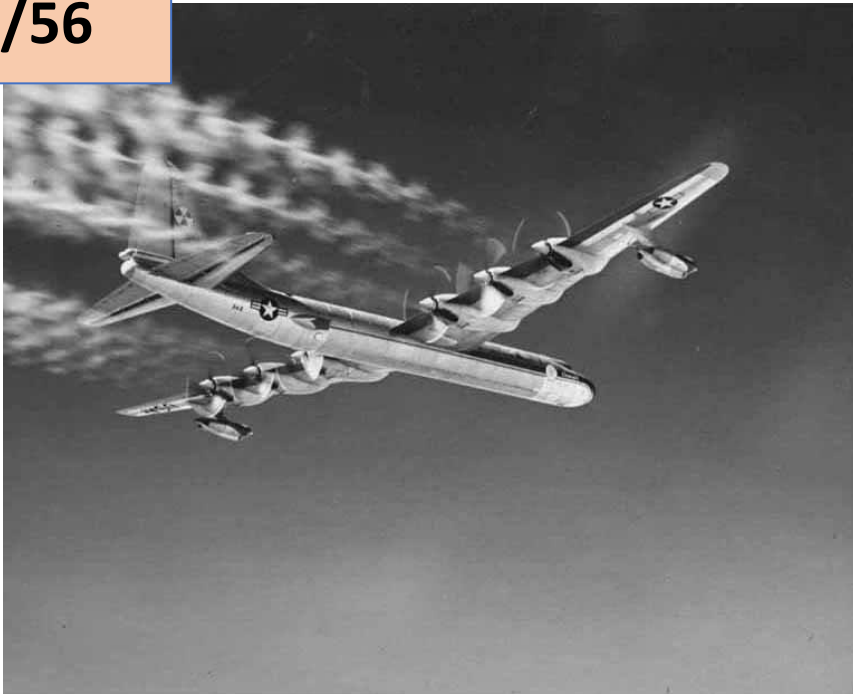


A la source de la 1^{ère} renaissance du concept MSR

REX du CONVAIR NB-36-H

12/11/54:
criticalité (non
embarqué)

6/8/56



Et ça a marché !

Qq 100h

Puis arrêt (Kennedy) ← Spoutnik, missiles intercont,..

1/ c'est faisable mais pas viable en aerien (protection, poids, autres vecteurs ..)

2/ il faut poursuivre (MSRE)

3/ c'est pas gagné (la corrosion): Hasselltoy-N (Ni-Mo), etc...



MSRE: le seul MSR qui ait fonctionné *

REX très détaillé dispo

**Avant les Chinois et 2021 = TMSR-LF1 2MW-Th-fluorures techno*

- ➔ - Fonctionnement durant 15 mois, dont 6 en continu sans vidange du sel
- ➔ - Deux campagnes : une avec U 235 enrichi/ Une avec U 233/ Sels fluorures/ Pas de thorium / Pas de plutonium autre que celui créé
 - Temps total de circulation du combustible : 21 788 h
 - Sur cette durée relativement courte : bon déroulement du fonctionnement
 - Une petite série de problèmes usuels d'exploitation à résoudre (rupture du ventilateur, entraînement de gaz, défaut de chute de barres, fissuration d'une vanne lors d'une vidange, etc.)
 - Le Xénon (poison neutronique principal) récupéré sous forme gazeuse en continu
 - Pas de nécessité de retraiter le sel pour pouvoir fonctionner
Seul l'uranium 233 a été extrait et récupéré lors d'une campagne effectuée ultérieurement.
 - **Pas de retraitement du sel** : toujours stocké avec ses PF sur le site

MSRE:

- Puissance 7,4 MW
- 1965-1970= 5 ans
- Spectre thermique
- Graphite
- 650°
- Hastelloy
- Cycle U
- Sels fluorures

MSBR- projet:

- P 1000 ?
- 1970-76
- 705°
- Graphite
- Fluorures
- Cycle Th

Pas de retraitmt du sel ; pas de REX

Les MSR: une longue histoire d'aléas vers un dénouement heureux ?

- 1944: l'idée E. WIGNER et A.WEINBERG
- 1945: EW-AW: « Preliminary calculations on a breeder w/ circulating fuel »
- 1947: Etude de faisabilité
- 1952: choix des sels fondus pour l'ARE/ 1954: démarrage ARE/ 1957: PWAR-1
- 1965: démarrage du MSRE en U235/1968: id en U233/1969: arrêt MSRE
- 1973-83: gpes de trav. CEA/EDF sur RSF/MSR/ 1984: CR et conclusions
- 2006: Reprise par CNRS-G → invalide le MBSR → invente le MSFR
- 2008: le MSFR (CNRS-Grenoble) devient la référence MSR du GIF GIV
- 2009: Thorium En'y 1st conf
- 2011: lancemnt en Chine prgrme TMSR / 700p en 2015
- 2013: création Terrestrial Energy
- Etc...

Le MSR ↔ quadrature du cercle ?

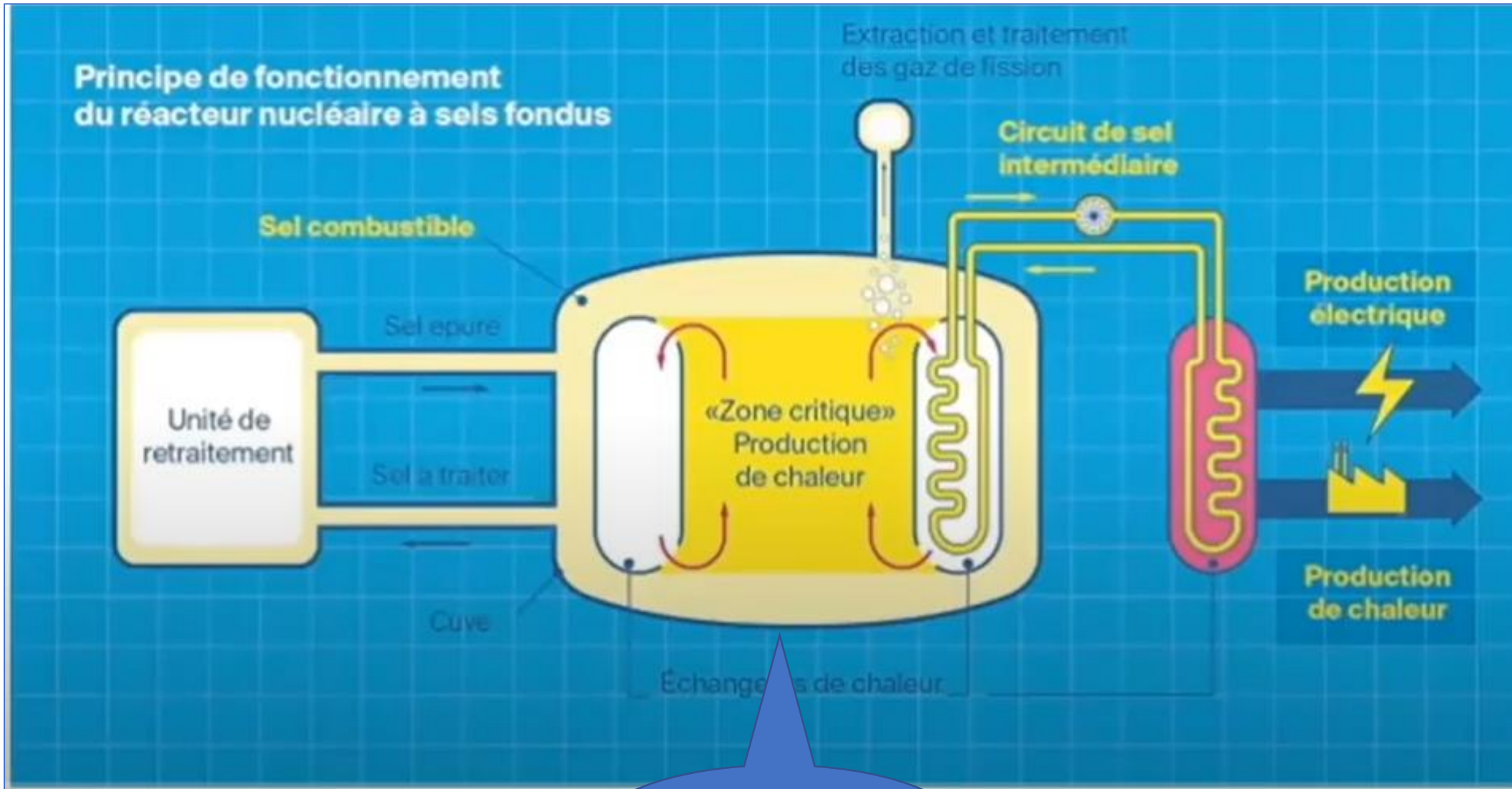
Conclusions 84: rapport CEA-EdF sur MSR

- « Le marasme actuel du nucléaire - que tous les spécialistes estiment passager - n'autorise pas à renoncer de promouvoir une relève véritablement révolutionnaire de la filière PWR
- « La conception et la réalisation de machines intrinsèquement sûres, associées à un cycle du combustible Intégré, interdisant la possibilité de prolifération tout en restant économiquement valable, ne peut aboutir sans la substitution du combustible liquide au combustible solide. »
- « La pause mondiale actuelle dans le développement du nucléaire pourrait être mise à profit pour faire le point, pour examiner les solutions de remplacement et analyser les potentialités des nouveaux systèmes émergents. »
- « En réalisant, puis en exploitant avec un total succès le MSRE, le Laboratoire National d'Oak Ridge a démontré voici déjà 15 ans la faisabilité des réacteurs à sels fondus. De nombreux éléments ont été rassemblés depuis lors qui doivent permettre de choisir un concept mieux adapté à la conjoncture et aux techniques actuelles. S'il est encore trop tôt pour engager la démonstration industrielle et le déploiement commercial, il est temps de faire la preuve de l'économie et de donner corps à un projet de réacteur expérimental de taille significative. »

Et après ?

- En gros:
 - On a continué sur la **filière REP** ss trop se poser de questions avec qq études avancées ici ou là:
 - CEA → est parti sur les surgénérateurs, **RNR-Na : R, Phx, S-Phx, ASTRID**
 - Mauvaise pioche: **on n'élimine pas le risque et le rejet sociétal**
 - Par contre **on retraite et brule les déchets** ce qui « fascina » les médias (cf arrêt ASTRID).
 - Cnrs Grenoble (D. Heuer) → a poursuivi sur la piste **MSR → MSFR**, avec un certain succès puisque c'est le MSR retenu par le GIV mais avec des moyens **« indignes »**
- Enfin arrive le regain d'intérêt:
 - Une nouvelle génération est là, à explorer !
 - **Effet qui est rejoint par l'irruption SMR** et qui va surfer sur cette vague (SMR)
 - **Les 1 ers GIV seront très certainement des SMR y/c les MSR**
 - Aujourd'hui qq dizaines de projets plus ou moins avancés ds le monde
 - Critère d'avancmt: Licensing et Validation ASN locale

Combustible LIQUIDE c'est bcp mieux: POURQUOI ?



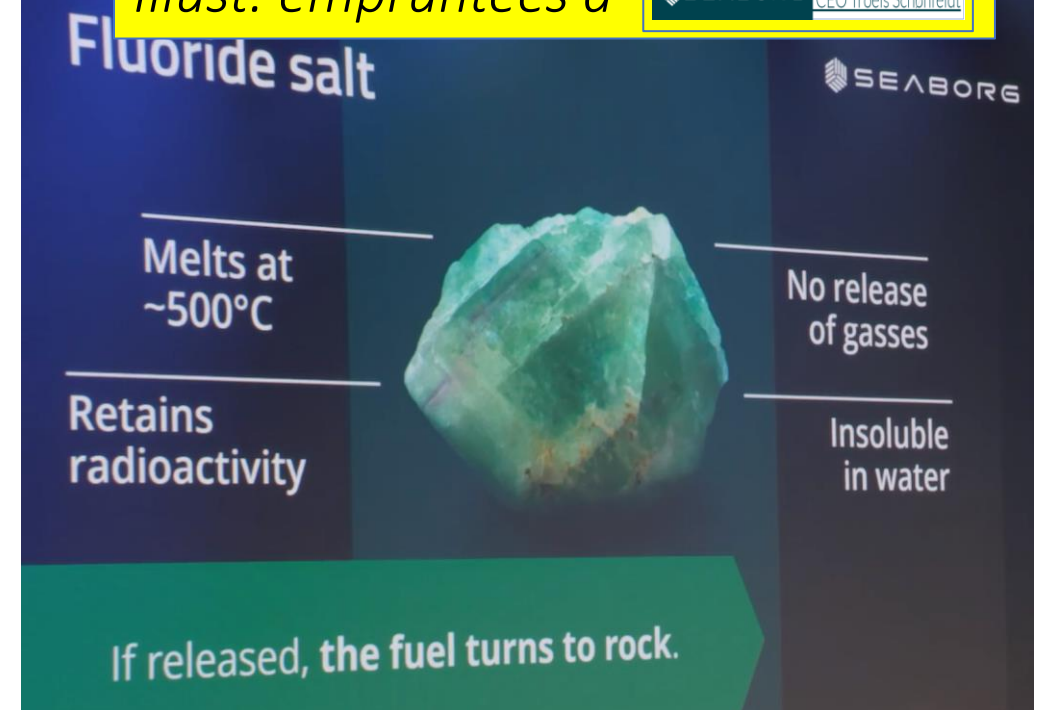
VIDANGE passive

L'ancien et le nouveau paradigme

Illust. empruntées à

SEABORG CEO Troels Schonfeldt

Safety by engineering



L'ANCIEN : A la base le syst est instable:

- Il présente des risques qu'il faut contrôler maîtriser
- On le veut de plus en plus sûr
- Donc de plus en plus complexe et cher
- Donc on monte en puissance pour amortir le cout supp. Etc...

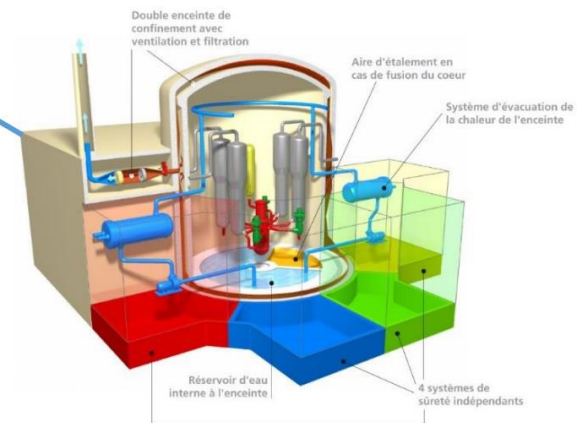
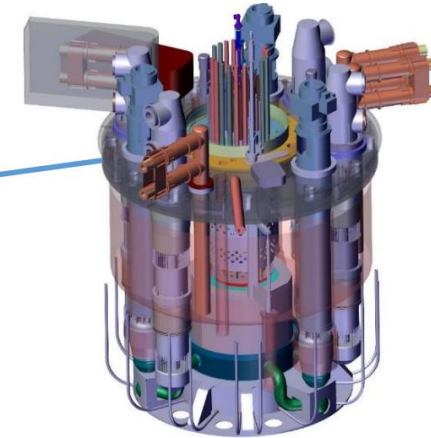
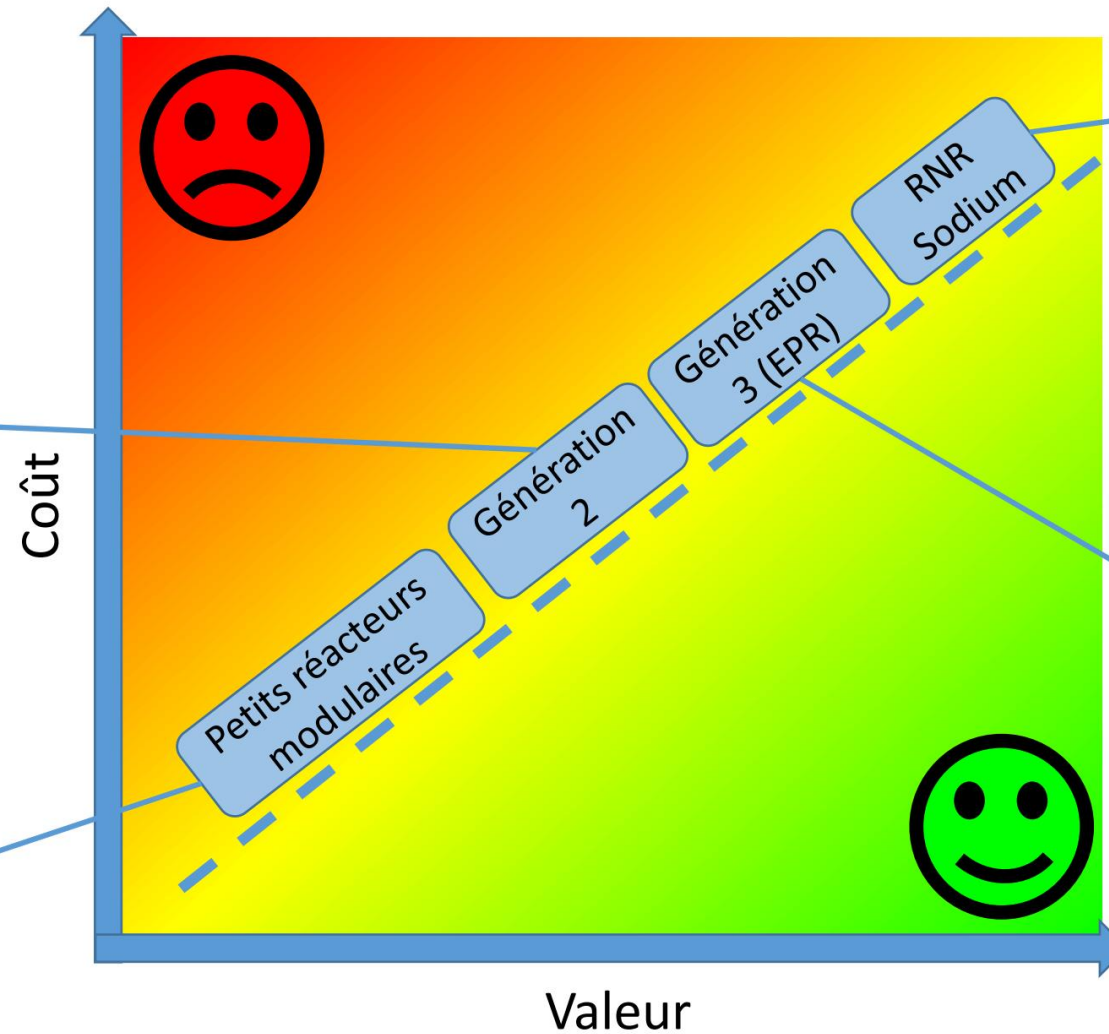
• L'EFFET MAJEUR de solutions réglant intrinsèqumt la sécurité:

- Ce qui était « gouvernemental » devient « business pour entrepreneur »

- Le NOUVEAU: « la sureté des sels fondus est « INTRINSEQUE » »
- Sont stables et auto-équilibrés
- + 2 points fondamentaux :
 - Ne rejettent pas de gaz
 - Sont insolubles et se solidifient
- Donc peuvent s'évacuer automatiquement
- Et se recycle après traitement

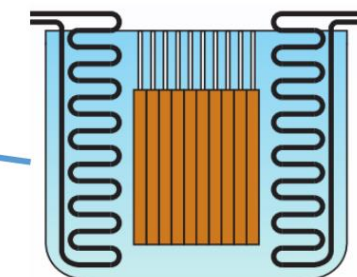
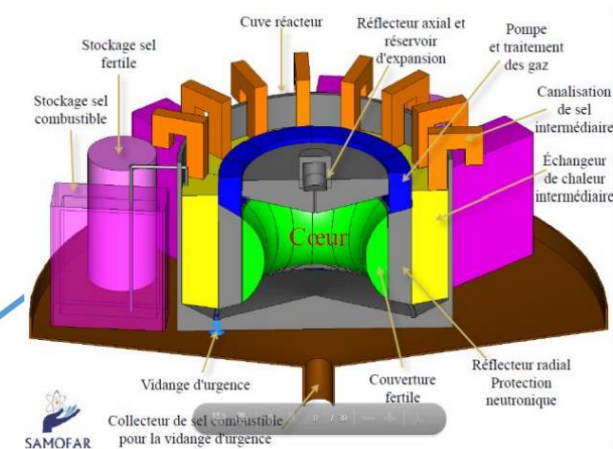
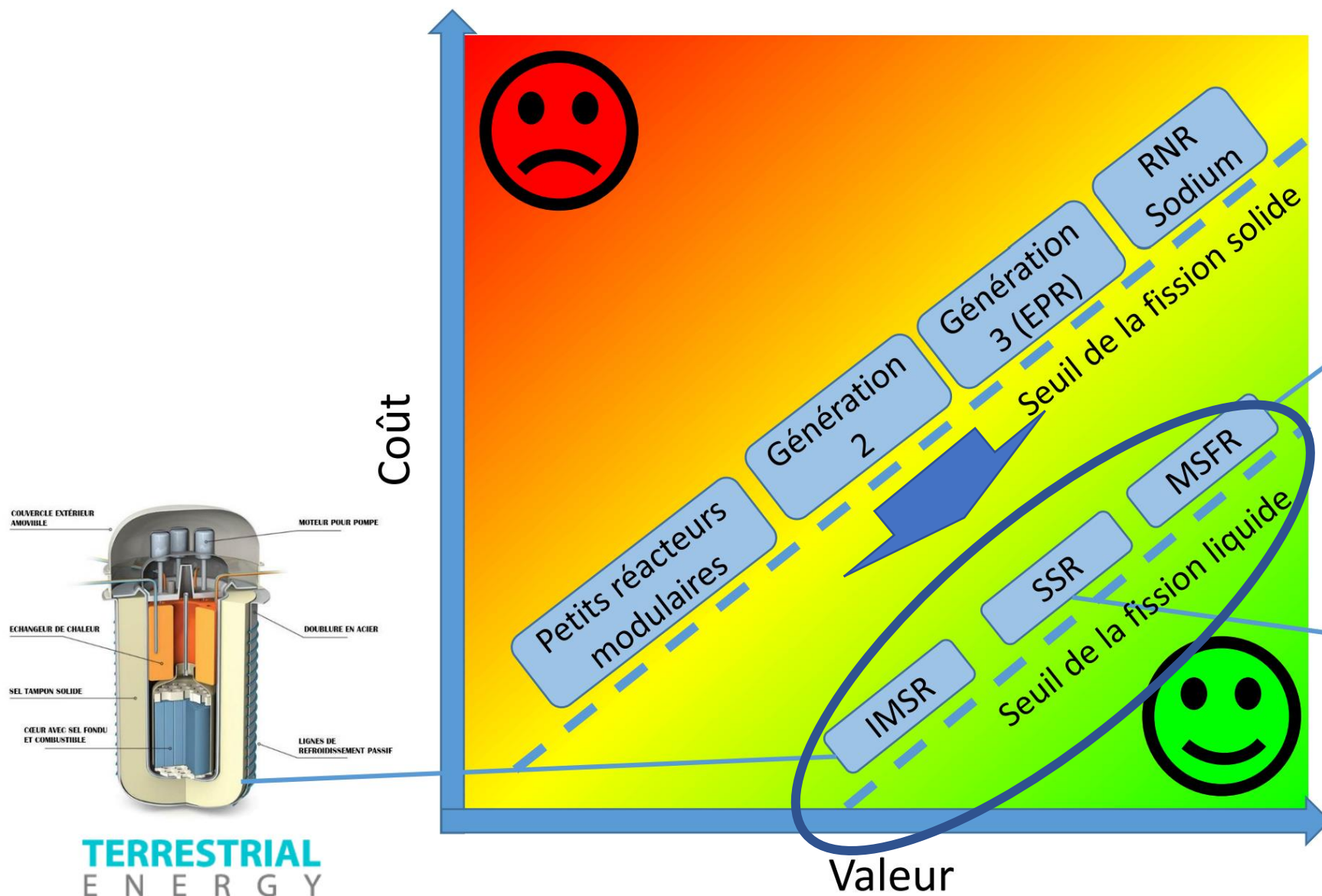
FISSION SOLIDE → Seuil

Qq slides empruntées
à John LEARY – FISSION LIQUIDE



FISSION LIQUIDE : rupture en coût/valeur

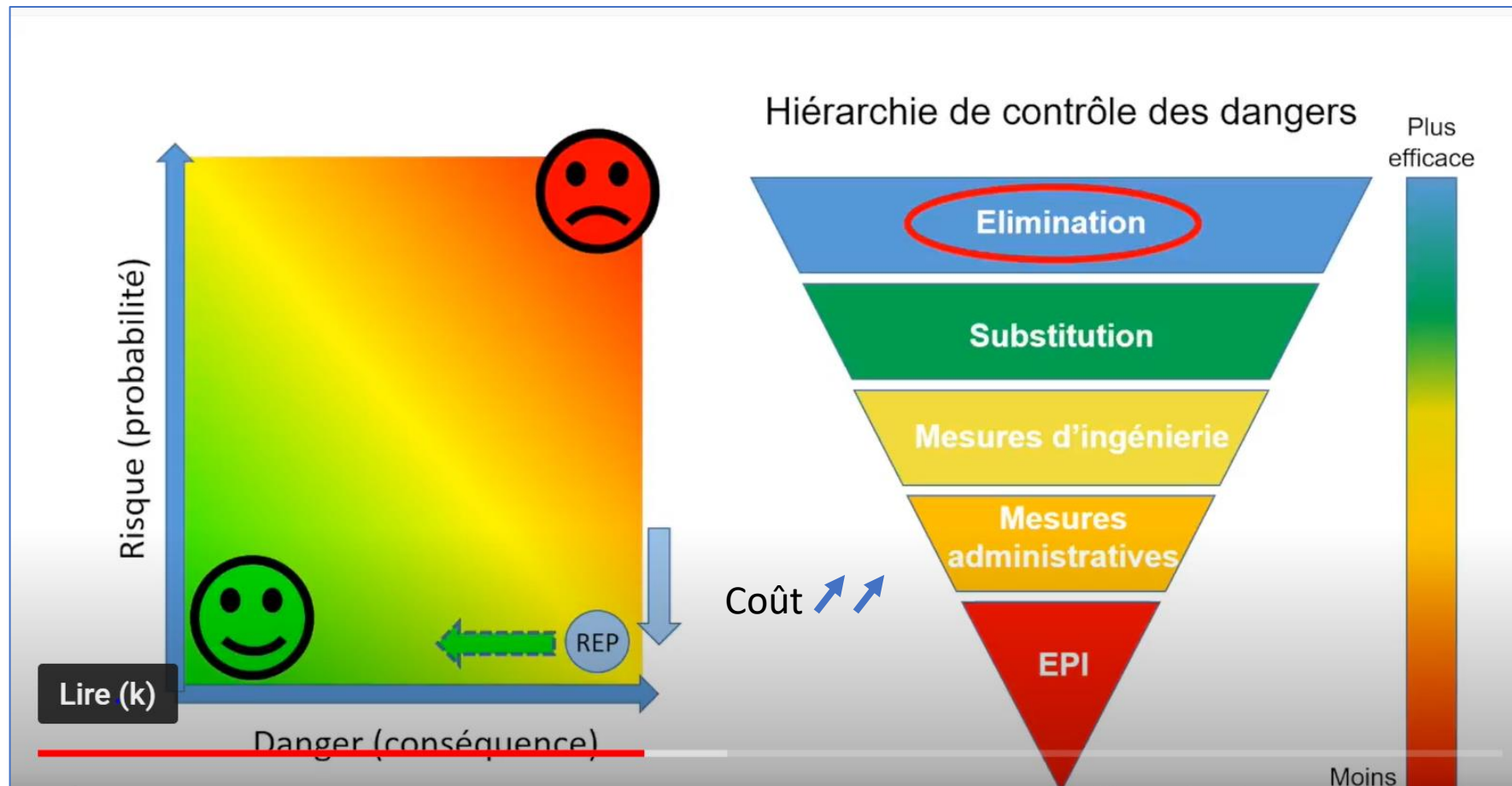
Qq slides empruntées
à John LEARY – FISSION LIQUIDE



moltex energy
safer, cheaper, nuclear

RISQUES-DANGER : éliminer le danger vs réduire les risques

Vers un nucléaire « socialement acceptable »



MSR= Une rupture en Coûts/ Valeur

- Valeur : 
 - Sécurité passive: risque $\rightarrow 0$; conséquences =0
 - Fonctionnement / opérations
 - chargement / retraitement / maintenance
 - CAPEX :1-2 vs 7-10Md€
 - Modularité $\leftrightarrow$ adaptabilité/ transportabilité
 - Transmutation: cycle du combust.
- Coût :  Simplicité du design (pompes, tuyauteries,)
 - Simplicité = couts réduits, time to market réduit
 - Sécurité passive intrinsèque du combustible
 - Si en plus modulaires, en SMR ou nSMR ou SSR , gains supplémentaires de couts 
 - Fabriqué en série
 - Fabriqué en usine
 - Livré prêt à fonctionner pas ou très peu d'assemblage sur site

Les PLUS

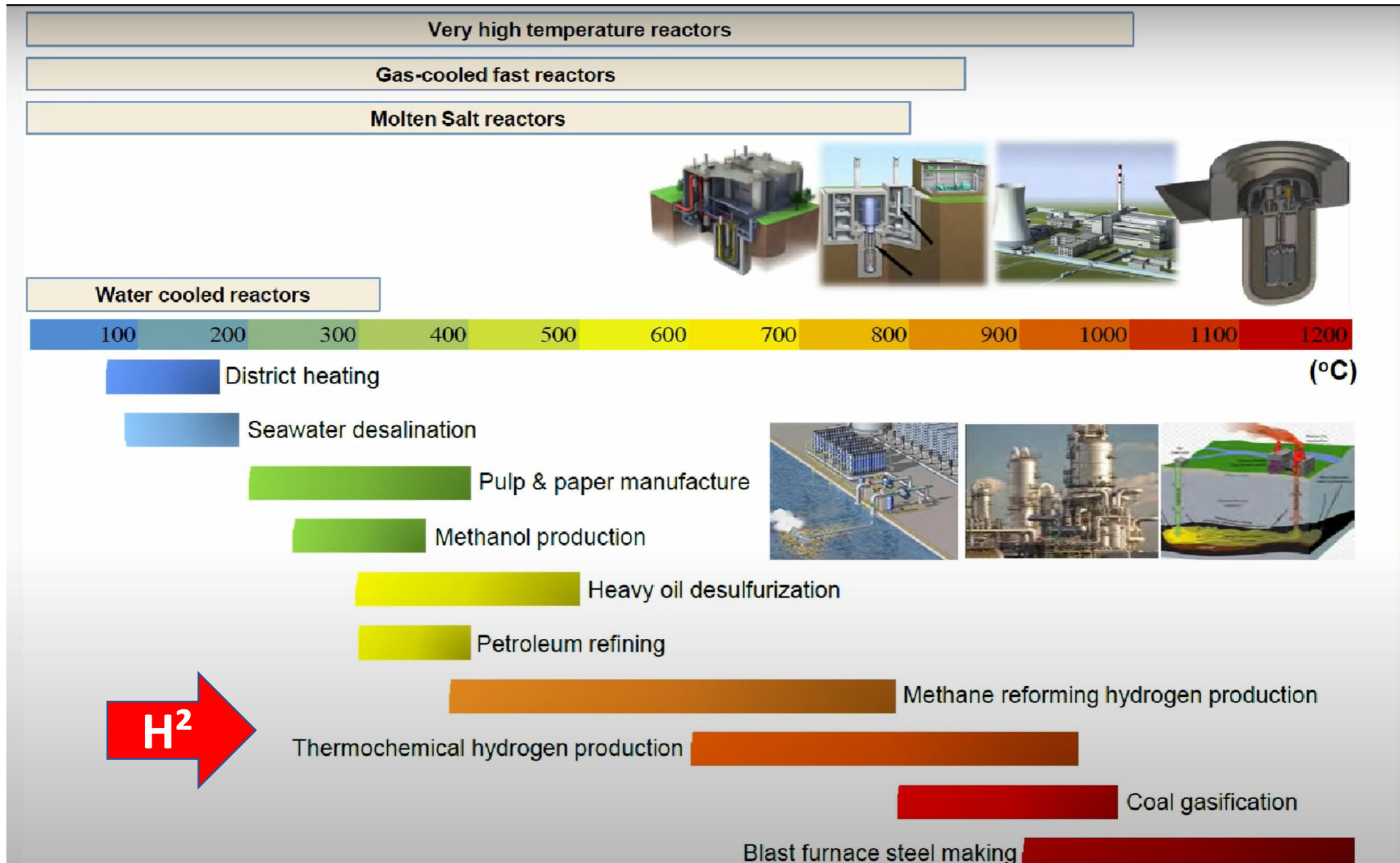
- Combustible liquide: **homogénéité**, facilité d'utilisation
 - **Rechargement sans arrêter**,
 - **Retraitement sans arrêter en prélevant chaque jour**
- Caloporteur = combustible, simplification:
 - Chaleur produite directement ds le caloporteur
 - **Sécurité passive intrinsèque par vidange et solidification + coeff de contre-réaction tous $\ll 0$**
- Sels fondus: **Stables thermiquement**, et rendement très $\gg$ eau, auto-stabilisants
 - Hte temp $600^\circ \rightarrow$ Rdmt 44% vs max 300° et 33% $\rightarrow +50\%$
 - $\rightarrow +50\%$ électricité produite, $+50\%$ revenus et $\ll$ Coûts réduits par MW
- **Moins de déchets + transmutation si nR**
- **Réactivité: Possibilité de pilotage à la mn et de reconfiguration quasi instantanée** par gravité $\rightarrow$ refroidissement-arret.
- Coûts réduits par **simplicité du design**
- **Basse Pression**: Simplicité de conception et d'opérations
 - Pas de risque d'explosion ss pression: pas de dispersion
 - Pas de barres de contrôle
- Versatilité:
 - **Les MSR peuvent tout brûler en entrée: $\rightarrow$ TRANSMUTATION**
 - **Et produire toutes sortes d'Eie en sortie:**
 - **élect mais aussi chaleur habitat, chaleur indust, stockage, etc..**



Les 4 points clés des MSR:

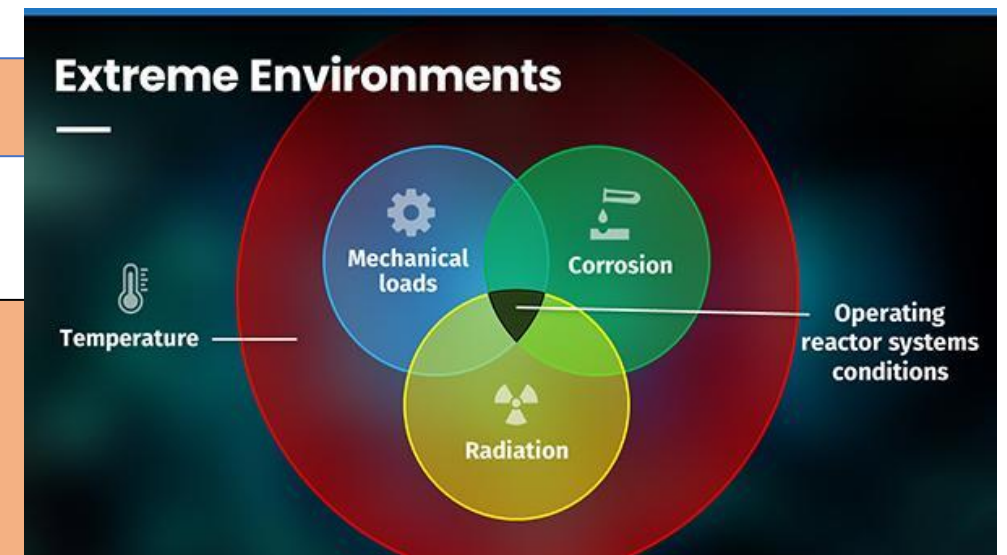
- **Sûreté intrinsèque**
 - **Se recharge/retraite en route**
 - **Court-circuite le Cycle combust.**
 - **Délivre toutes sortes d'énergies**
- 

Extension spectaculaire du domaine des usages



Les MOINS

- Métallurgie – chimie des sels
 - Tenue des matériaux
 - Sels à haute temp très corrosive et de plus bombardés par particules radioactives
 - REX d'Oak Ridge :
Hastelloy(nickel +...) : super-alliage
- REX limité encore des tests à faire



Des difficultés à résoudre

- **Métallurgiques:**
 - Corrosion de la cuve
 - Tenue à haute température
 - Irradiation neutronique élevée de la cuve qui est la première barrière
- Chimie du traitement du sel pour extraire les « déchets »
- **Sûreté**
 - Gestion des matières radioactives (PF)
 - Gestion des fuites
 - Procédures d'exploitation à créer
- Technologie bénéficiant de peu d'expérience

A suivre

Relance MSR en France

- 4-8/10/21: 1^{er} MSR bootcamp: initier une communauté MSR française
 - 100 p : CEA,Orano, Framatome, EDF, CNRS , +...
 - Partager les REX: RNR-Na, RHF (Inst Laue Langevin), La Hague,.. ↔ rupture techno



- Confirme les 2 pts forts: « *dans un MSR idéal le Pu et l'U appauvri seraient mis une fois pour toute ds le sel combust. et disparaîtraient au fur et à mesure sans avoir à les extraire ni manipuler en dehors. Idem pour Act-min laissés ds le réacteur et brulés en flux rapide* »
- Et l'écueil principal: gérer la chimie des sels fondus:
 - Chlorures ou fluorures → France , plutôt chlorures (compatib Orano- La Hague)



- Echange infos sur pano mondial: MCFR* (Terrapower), IMSR* (Terrestrial Engie), TMSR* (Chine), MOSART* (Russie), Pays-Bas –consortium MSR,

*Voir ci-après

Les projets à suivre

- *MCFR Molten Chloride Fast Reactor de TERRAPOWER (Bill GATES)
- *IMSR de Terrestrial Ey
- *TMSR de Chine – voir focus
- *Mosart de Russie : Molten Salt Actinide Recycler & Transmuter
 - Projet de réacteur de transmutation de tous actinides (Pu,Cm,Np,Am)
- *MSFR Grenoble → SAMOFAR

*décrits dans les SMR ci-après

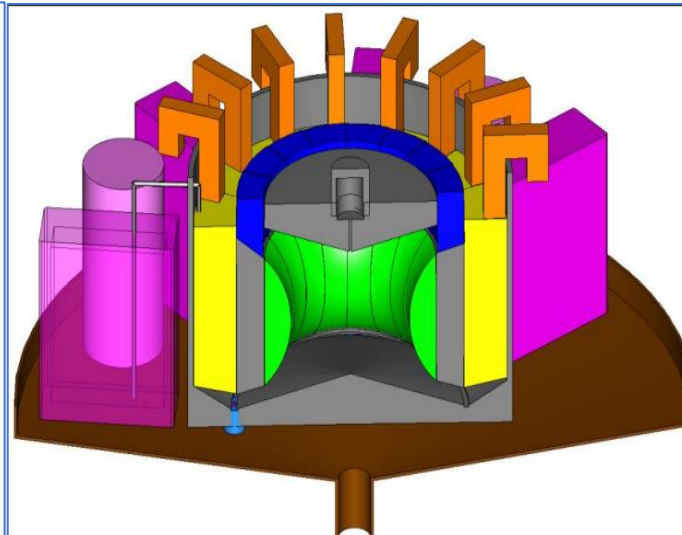
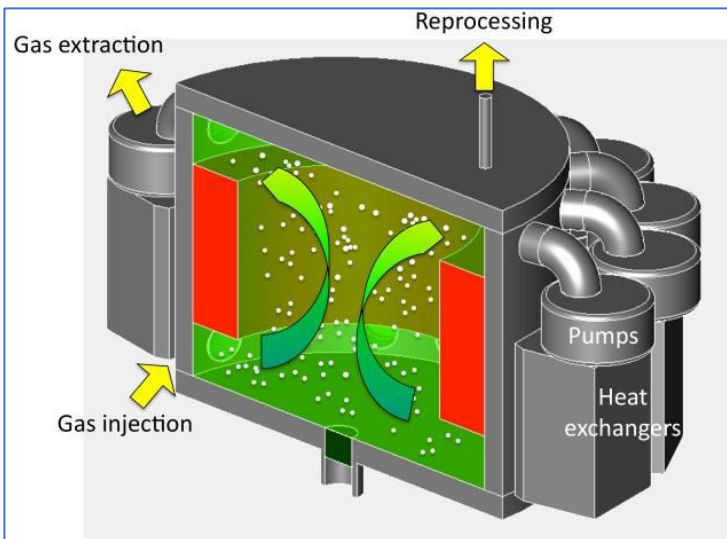
Focus-CHINE

- Les chinois mettent les moyens :
 - Un centre de recherche spécialisé à SHANGAI le SINAP >1000p
 - Un programme vaste et structuré :
 - Aborder tester toutes les technos
 - Sous tous les aspects : matériaux, technos, retraitement)
 - Les MSR bien sûr:
 - 1 ère étape une réplique du MSRE à 2MW ds le désert de GOBI
 - TMSR-LF1 2021- LF= liquid fuel-sels fondus démonstrateur cycle Th réplique du MSRE en 2MWe fluorures –Th-U: démarré en 12/21
 - TMSR-LF2 liquid fuel SMR suivra à 170 MW
 - Mais aussi:
 - TMSR-SF solid –fluid avec TRISO particles → voir TRISO
 - Le réacteur à neutrons rapides RnR-Na, CEFR (China Experimental Fast Reactor) op en 7/2011
 - Le réacteur à caloporteur gaz HTR-PM de type HTGR *(High Temperature Gas Reactor.) de 2x100 MWe qui a démarré en 9 et 11/2021. → export INDONESIE
 - Le projet de réacteur flottant pour 2022
 - Après avoir complètement « métabolisé » la techno REP
 - 52 réacteurs installés (54 Gwe) en 90-2010 (depuis 4-5/an base REP-III Hualong HPR 1000)

Focus-France – MSFR → Internat'al: SAMOFAR

**D. HEUER - CNRS Grenoble*

- Concept « trouvé un peu par hasard »
- Reprise du projet MSRE → MSBR avec nouvelles méthodes et moyens de calcul
- Etudes → MSBR ne tient pas la route
- Tombé « par hasard » sur ce concept (2004) : que des avantages → verif- contre vérif sur 1 an → OK aller +loin
- **Publié 2006, GFI-GIV le reconnaît en 2008 → 2015 SAMOFAR**



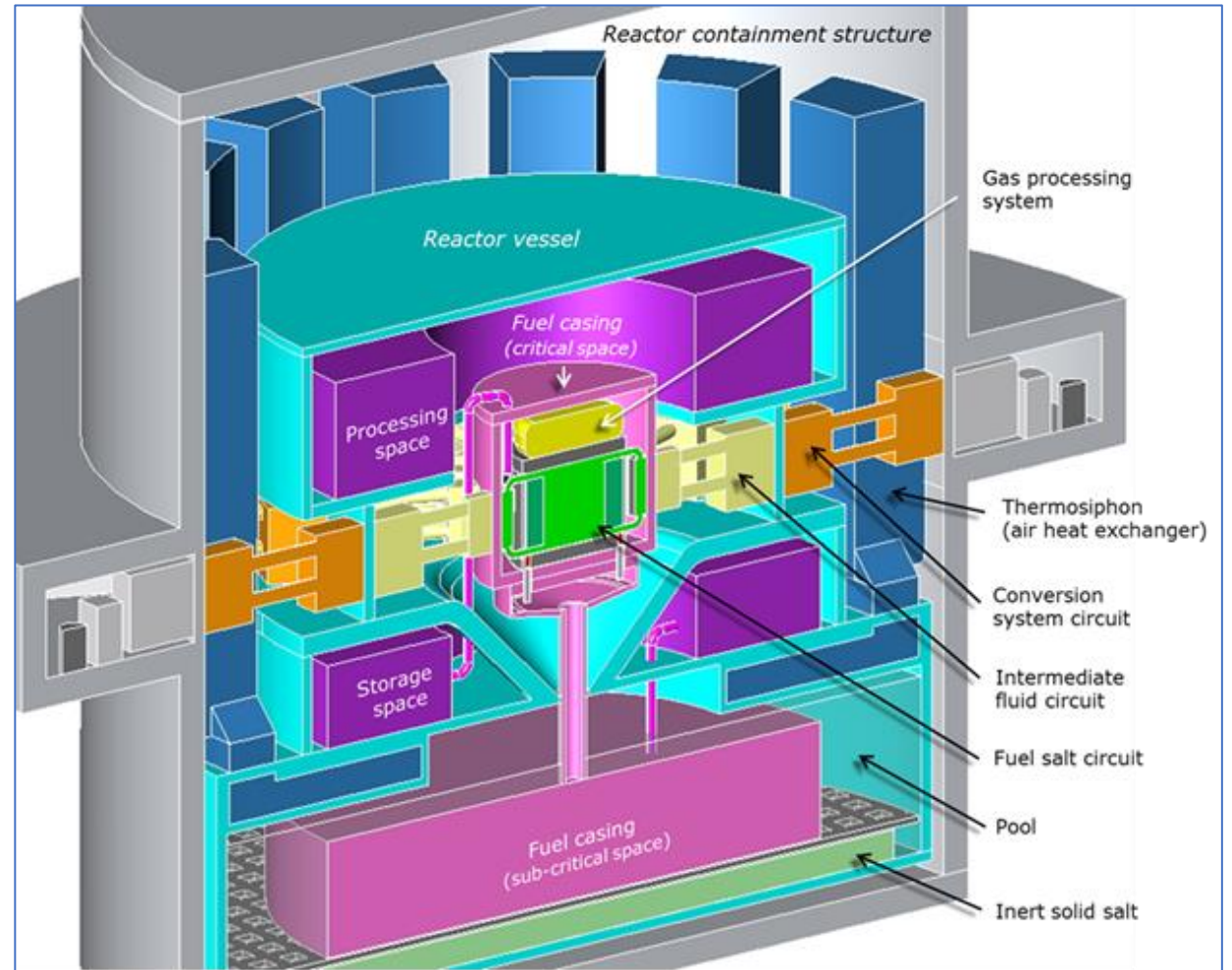
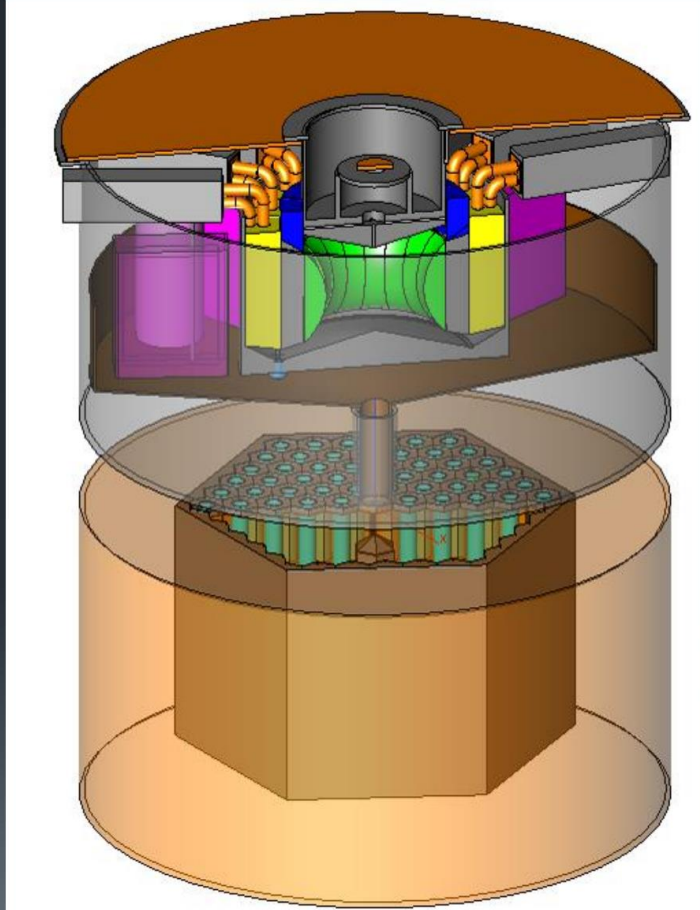
- Specs:
- **Cycle Th FERME rapide— ss modérateur**
- Cuve 2,25m alliage nickel
- Sel liq de F (18 m3) à pression atmo et 750°
- Couv avec Th
- Full range : from breeder to burner
- Extraction continue de sel pour extraire L & A
- 40 l/jr vs 4 m3/j en cycle thermique

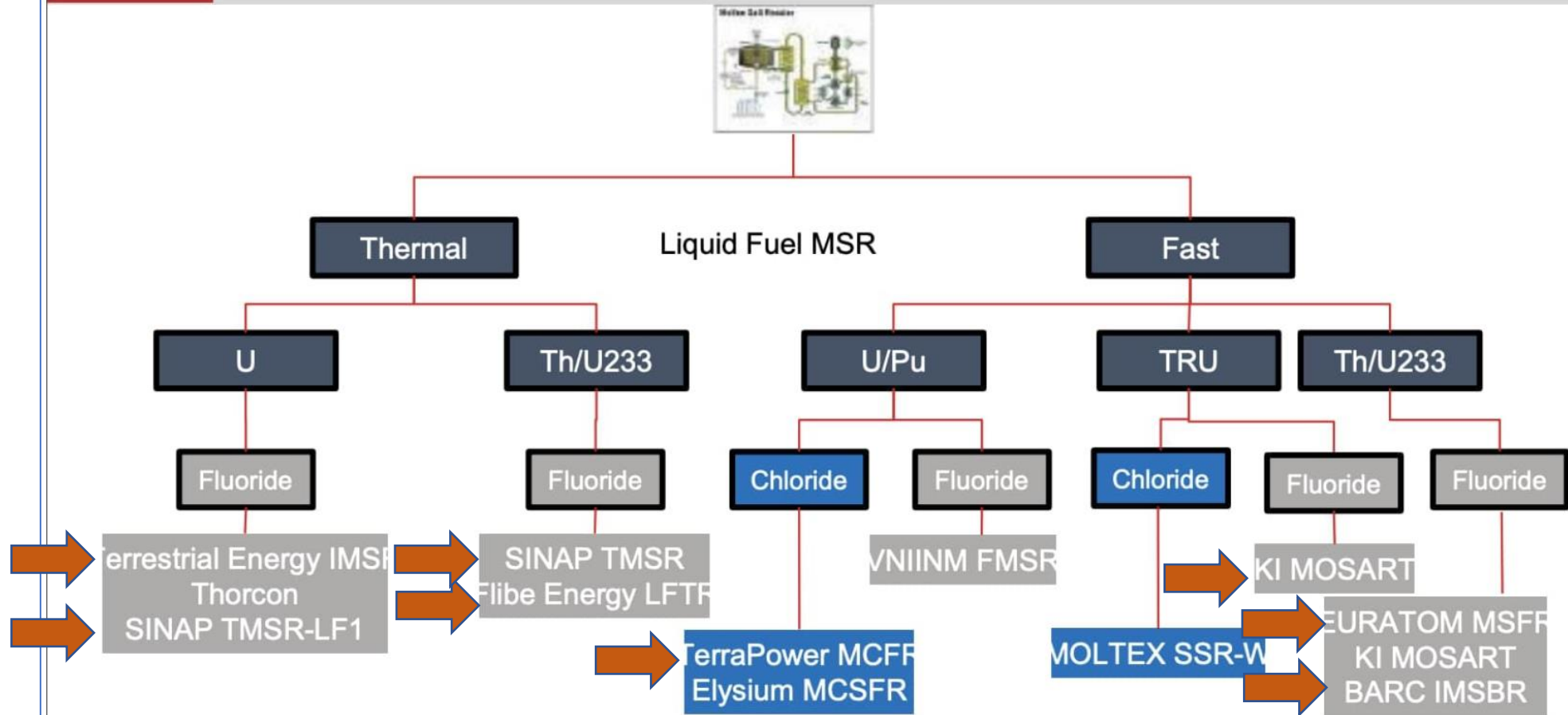
- SAMOFAR= Safety Assessment of Molten Salt Fast Reactor – Horizon 2020 Euratom programme
- Consortium 11 participants : un mix Univ-Labs (CNRS,JRC, CIRTEN, TU Delf, PSI) et de partenaires industriels (AREVA, KIT, EDF, SIMMER, CEA)
- Etablir une « proof of concept » validant les 2 point clés 1/ la sécurité passive absolue 2/ le recyclge/ transmutat.
- Etablir une « suite à donner » claire et un financement (proto, démonstrateur , ...)

- [Pétition · Lançons un consortium français pour commercialiser un réacteur à sels fondus avant 2030 · Change.org](#)

Focus-France – MSFR → Internat'al: SAMOFAR

Le MSFR





V - Focus sur les SMR

- Pourquoi les SMR ?
- Panorama International actuel
- Qq exemples des projets les plus significatifs en cours

Les SMR pourquoi ?

- AVANT:

- + c'est gros → + c'est efficace → moins ça coûte au KWh (voir + loin)
- Mais + c'est gros → + le risque est élevé → plus intervient le principe de précaution → plus la sécurité revient chère
 - En complexifiant l'ensemble par redondance de toutes sortes
 - En élevant les niveaux d'exigence
 - En allongeant les délais d'autorisation de certification
 - En allongeant les délais de construction
- Les coûts et donc l'investissement deviennent dissuasifs si de plus la « roadmap » nuke n'est pas politiquement claire voire anti-nuke → d'où le trou d'air de qq 10-15 ans

- DEPUIS PEU

- A émergé le concept SMR avec tous les atouts décrits:
 - Soudain un vrai marché est là, à prendre aux plans nationx et internationx
 - → Ruée des Start Up (70 projets +/- avancés)

- ATTENTION: Tout ceci sous réserve d'harmonisations réglementaires internationales → AEIA déjà en action.

- A défaut → la part de marché fera le/les STD/STDs
- Les 1ers GIV seront des SMR



Pourquoi les SMR ? En 1^{er}: « SMALL is BEAUTIFUL »

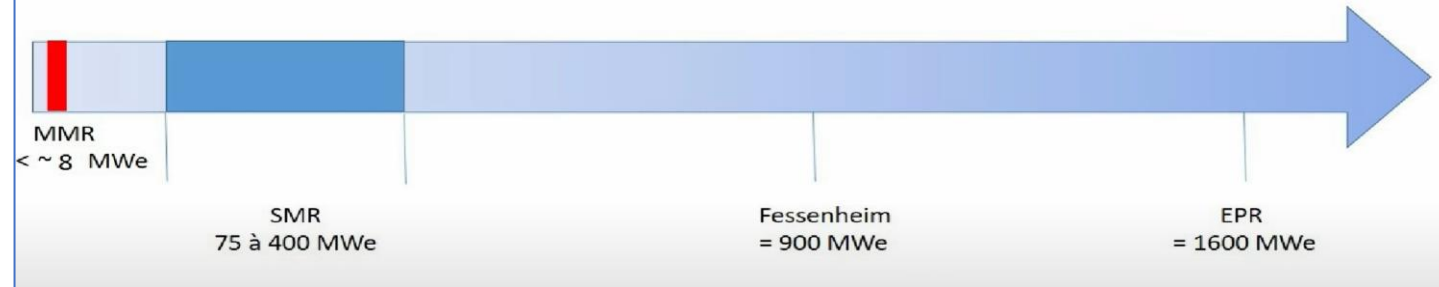
SÛR

- **Sécurité** $\leftrightarrow$ fusion du cœur
 - Pas besoin d'évacuer la puissance résiduelle
 - Design simplifié: pas de pompes, etc...

- **Sécurité passive** :
 - Gravité
 - Dilatation
 - Conduction thermique

PROPRE

- Peu de déchets $\rightarrow$ **0 déchets à vie longue**
- Les SMR possibles à n-rapides en MSR
 - **Transmutation**:
 - Déchets radioactifs à vie longue (x100 000 ans) ramenés à 2/300 ans



Puissance thermique dégagée avant et après l'arrêt du réacteur

	en %	REP 900	REP 1300
Avant l'arrêt	100 %	2 700 MW	3 900 MW
Après 1 seconde	7 %	190 MW	270 MW
Après 1 minute	5 %	135 MW	195 MW
Après 1 heure	1,5 %	40 MW	58 MW
Après 1 jour	0,6 %	16 MW	24 MW
Après 1 semaine	0,3 %	8 MW	12 MW
Après 1 mois	0,15 %	4 MW	6 MW

1 300 MWe

1s après
248 MWth

1h après
57 MWth

SMR
200 MWth

1s après
13 MWth

Pourquoi les SMR ?

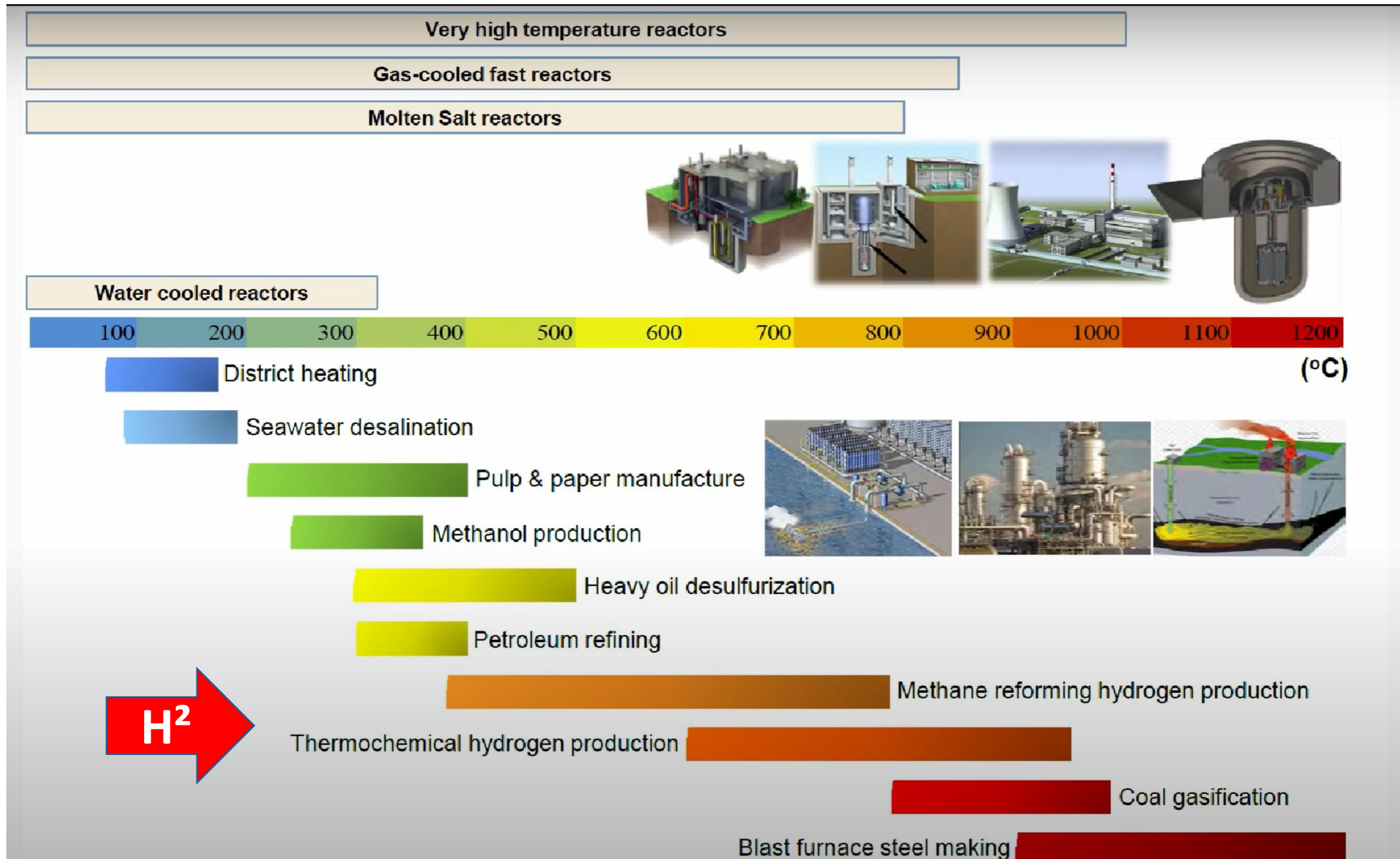
La solution de rupture
qui va changer la donne :
en quoi ?

- On n'en parlait pas ou peu il y a 10 ans:
- **Parce qu'elle rend le nuke:**
 - **Bcp plus sûr** : sécurité passive même pour des filières solides
 - **Bcp plus simple** → donc: moins cher
 - Susceptible → **en série** en usine en sous ensemble facilement transportables simplement assemblés sur site.
 - Moins chère en **CAPEX** → Bcp plus abordable financièrement : 1-2-3 Md€ vs 10-12 Md€ (frais fi)
 - Ds un **délai de construction** bcp plus court et donc un retour sur Inv. moins pénalisant
 - Moins chère en **opérations** (maintenance réduite)
 - **Modulaire** : Couplage de 2,4,6 unités → ajustable en fct des besoins
 - **S'intégrant ds les réseaux de transport existants** sans pb (vs éolien, marin)
 - y/c ds des pays en voie de D ou des régions peu irriguées car ne crée pas un déséquilibre
 - **Remplaçant idéal de centrales à charbon**
 - **Complément idéal des ENR intermittentes**
 - **Transportable sur barge, ou par camion/train sur place près du besoin**
 - **Bénéficiant du traitement existant du cycle du combustible**
- **Sans préjuger de la technologie: SMR-GIII ou SMR-GIV**
 - Les GIII seront les 1ers

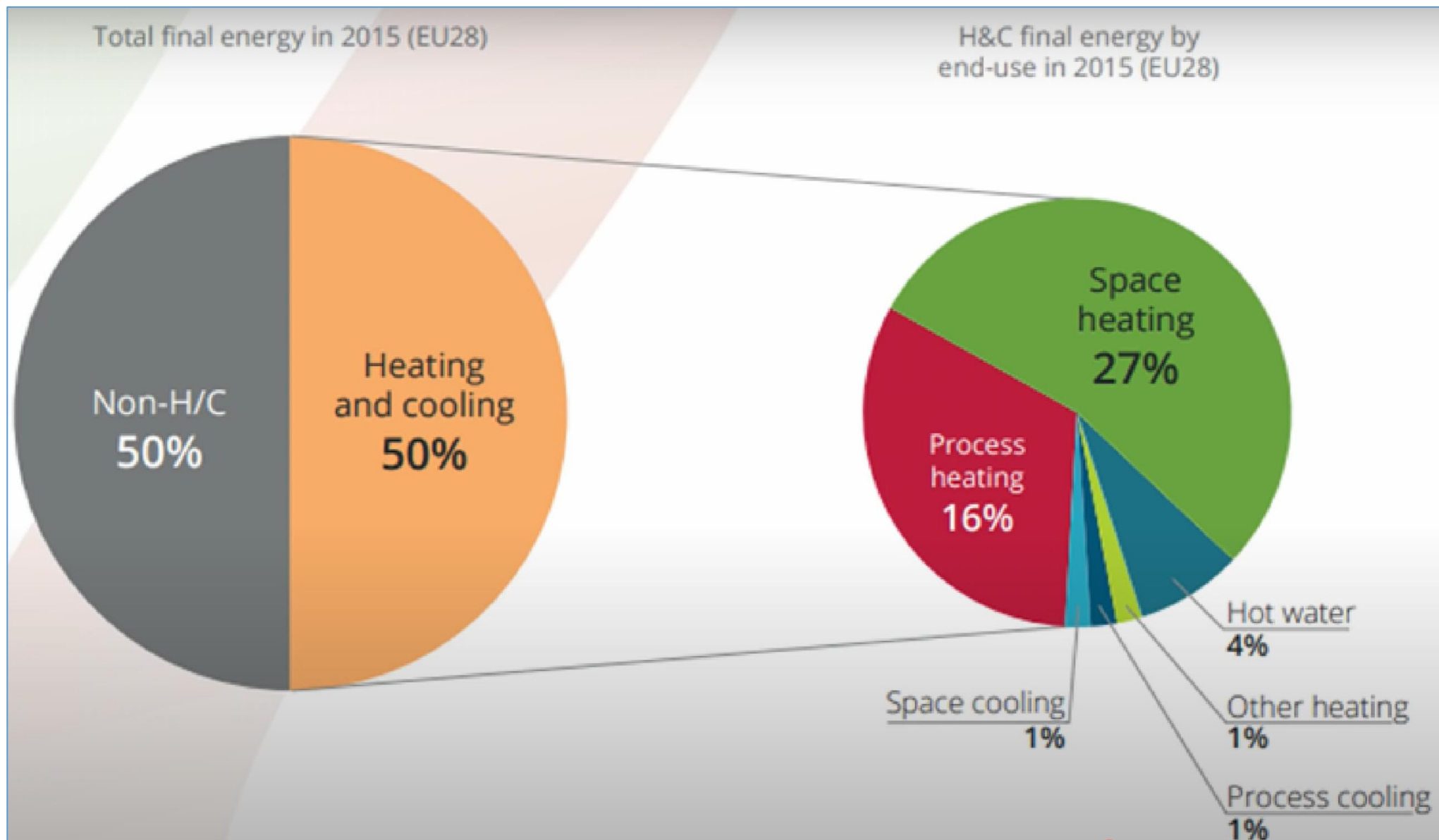
Pourquoi les SMR ? Résumé:

1. C'est sûr à #100% (sécurité passive)
2. C'est multi-usages (ci-après)
3. C'est adaptable au besoin (grappe de 2-4-6-8 réacteurs en partage)
4. C'est intégrable au réseau ou pas
5. C'est local : proche du besoin (agglomérations, mines, cimenteries, raffineries, autres industries, désalinisation, ...)
6. Ca flotte !
7. Ca fonctionne sans s'arrêter pour rechargement ou retraitement
8. C'est « clean » : de moins de déchets à 0 déchet VL par transmutation
9. C'est souple : complément ENR par stockage-restitution

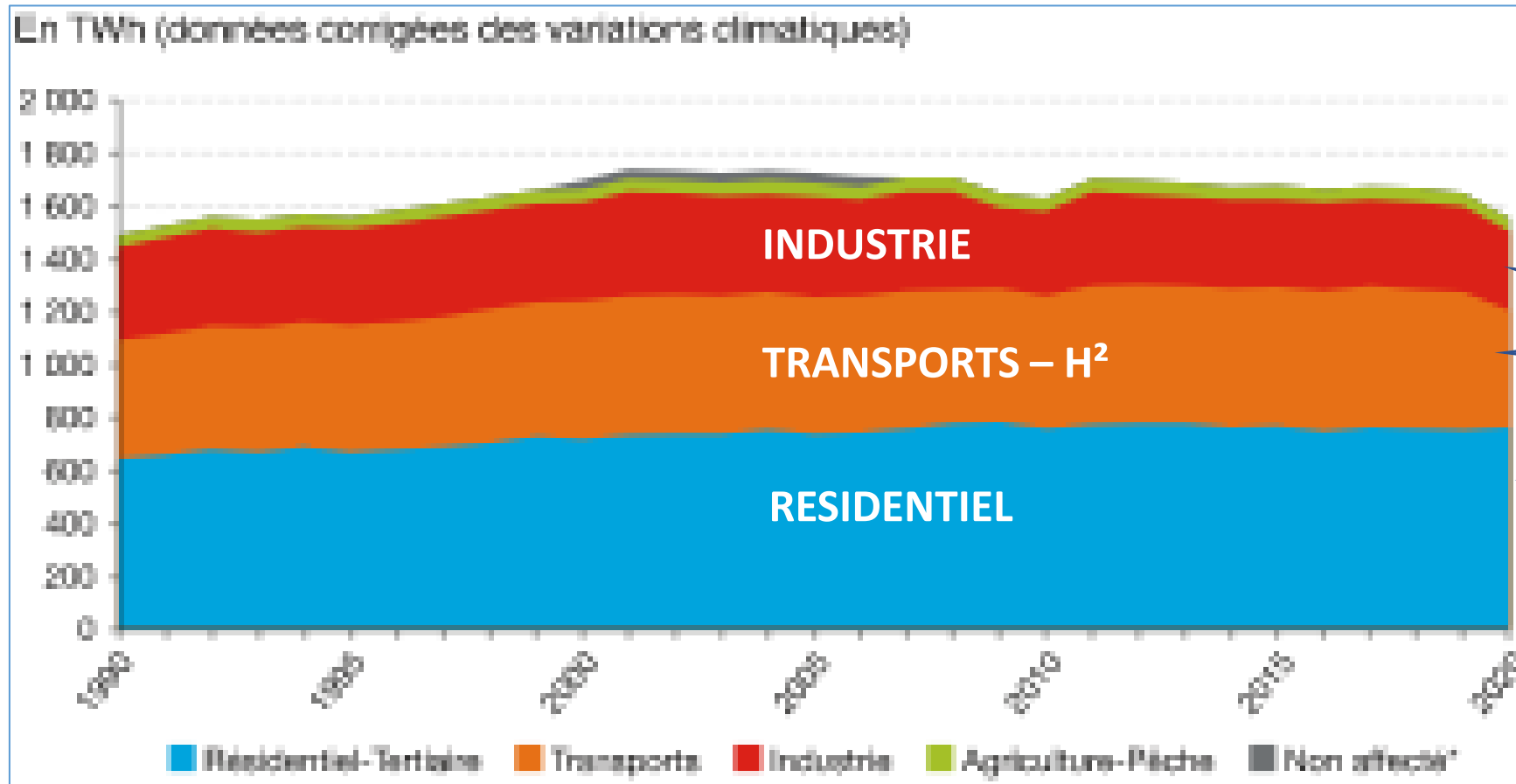
Extension spectaculaire du domaine des usages



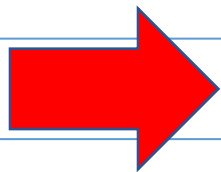
La chaleur → sur place



Energie multi-usage



SMR



Une réponse potentielle à # tous nos pbs d'énergie ?

L'électricité, une importance vitale pour la compétitivité de notre économie, ne pas s'embarquer dans des choix non compétitifs

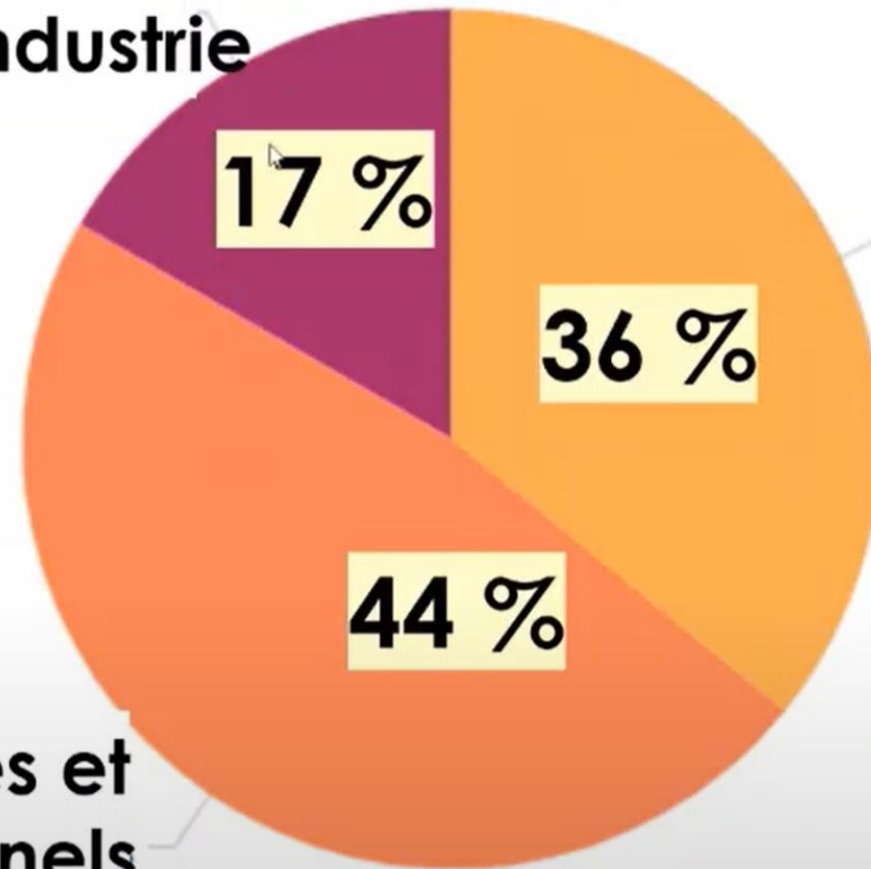
- 64 % pour le secteur économique
- 36 % pour le secteur résidentiel

**En 2100
le vecteur
électrique
pourrait
véhiculer 80 %
de notre
énergie (AIE)**

Grande industrie

Entreprises et
professionnels

Résidentiel



<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-de-lenergie-edition-2020-0>

SFEN JP Pervès

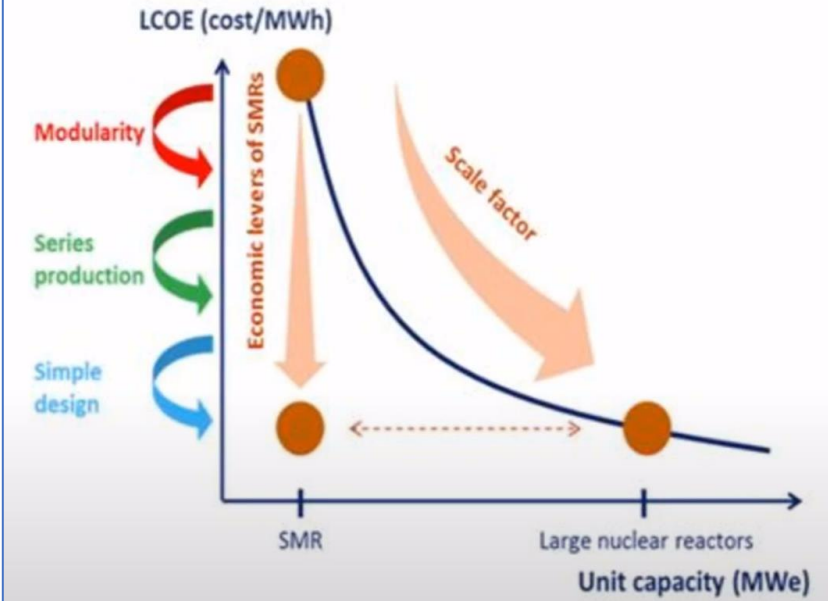
SMR = Small Modular reactors : être compétitif ?!



Cout du kWh nucléaire

- Une réalité incontournable : le prix du kWh produit décroît avec la puissance
- Une conséquence : augmentation continue des puissances installées
- Cas de la France: du 900 MW au 1300 MW puis au 1600 MW
- Exemple de l'AP 600 devenu AP 1000
- Etc...

Trois clés : modularité, effet de série et simplification



- Grd nbre de coûts fixes: coût du site; coûts de conception; coûts des procédures (autorisation, certificat,...)
- EPR- 1650-5,5m vs 1300-5 -> +30%
- Les équipes
- Planning construction : pas de gain

- Ex NuScale: "The advanced design of the NPM eliminates the need for two-thirds of the safety systems and components found in today's large commercial reactors..."

- CECI reste actuellement un pari tant que la demo/preuve n'aura été faite du bien fondé de l'hypothèse

PANORAMA des SMR ds le monde

- Chine
- Russie
- Canada/ USA/ UK : tableau ci-après
- France

MARCHE US

	Entreprise	Réacteur	Type	Puissance (MWe)	Pays d'Origine	NRC Certification (6 phases)	CNSC Vendor Design Review (3 phases)
→	NuScale	NuScale	REP	60	États-Unis	Phase 5	Phase 2
→	GE-Hitachi	BWRX-300	REB	300	États-Unis	Phase 1	Phase 2
	Holtec	SMR-160	REP	160	États-Unis	Pré-Application	Phase 2
→	Terrestrial Energy	IMSR	RSF-F	190	Canada	Pré-Application	Phase 2
	Advanced Reactor Concepts	ARC-100	RNR-Na	100	États-Unis	Pas de demande	Phase 1
→	X-energy	Xe-100	HTGR TRISO	75	États-Unis	Pré-Application	Phase 2
→	SNC-Lavalin	CANDU-SMR	Eau Lourde	300	Canada	Pas de demande	Application à venir
	Moltex Energy	SSR	RSF-F Dual	150	Royaume-Uni	Pas de demande	Phase 1
→	Kairos Power	KP-FHR	RSF-F TRISO	140	États-Unis	Pré-Application	Pas d'application
→	TerraPower	MCFR	RSF-C	Variable	États-Unis	Pré-Application	Pas d'application
→	TerraPower & GEH	Natrium	RNR-Na	345	États-Unis	Pré-Application à venir	Pas d'application

Revue de qq Top-SMR

- VOYGR- (USA: NuScale*)
- IMSR –(Canada: TERRESTRIAL)
- MCFR-(USA: SOUTHERN-Co & TERRAPOWER (B.G
- NATRIUM- (USA: TERRAPOWER)
- NUWARD- (France: CEA-TA-EdF-Naval Group)

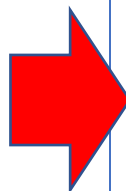
*Le plus avancé actuellement



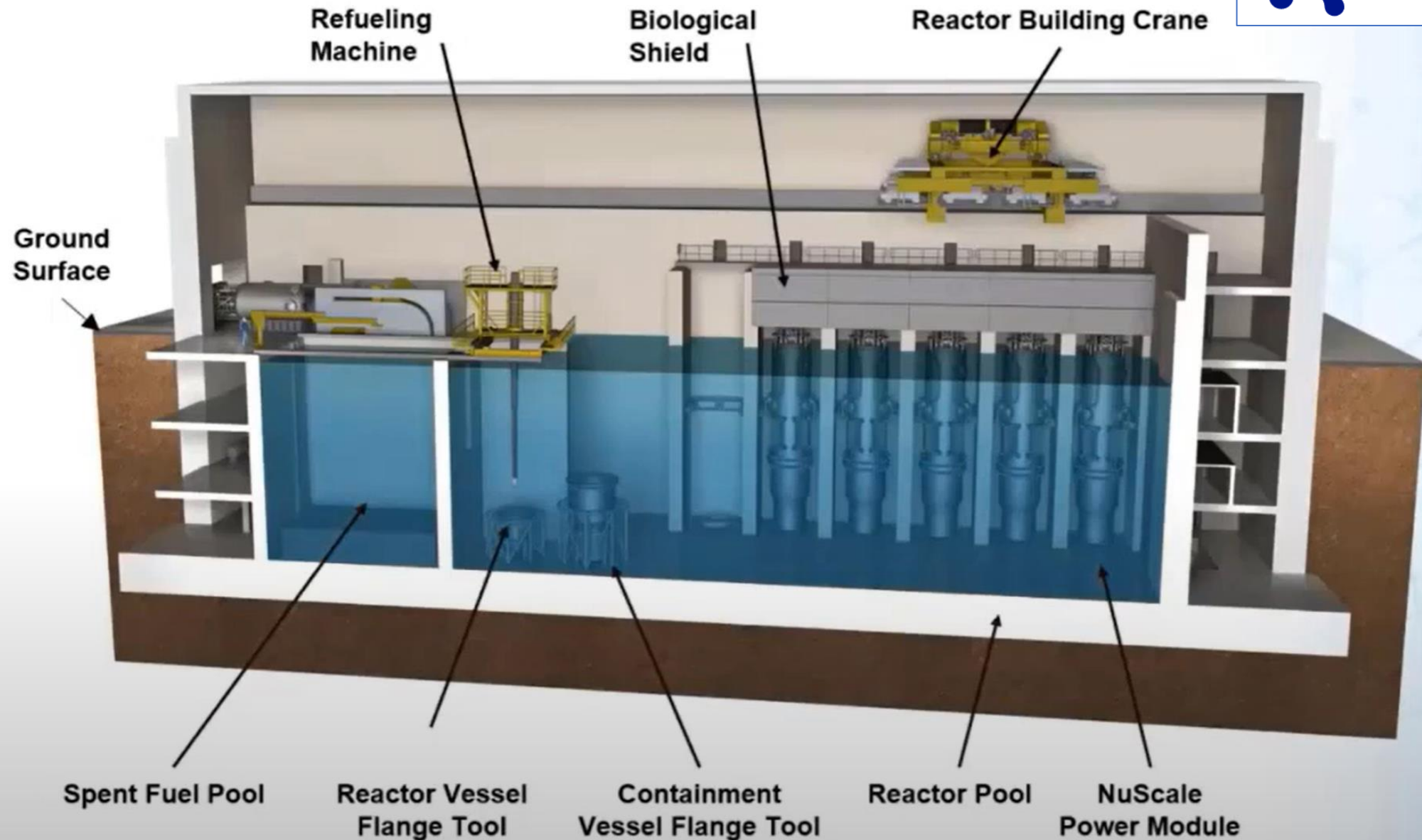
Techno tradi : NuScale- VOYGR = REP/PWR



- DOE funding / Utah Ass Municipal syst UMMPS/XCEL Energy
- NPM (NuScale Power Module): 77 Mwe PWR/REP
- Circulat par gravité (normal et shutdown)
- Assemblé usine et livré (3 segmts) clé en main par camion, rail, barge
- VOYGR peut accommoder
 - 12 NPM → 924 MWe / 6 NPM → 462 / 4 NPM → 308
- Site : Idaho Nat Lab
- Date 2030. « In 2020 1st SMR to receive Std Design Approval (NRC) »
- Sécurité passive absolue
 - «The reactors will safely shut down and self-cool, indefinitely, and do so with no need for operator or computer action, AC or DC power, or the addition of water—a first for light water reactor technology”.
- Simplicité “The advanced design of the NPM eliminates the need for two-thirds of the safety systems and components found in today’s large commercial reactors,..”



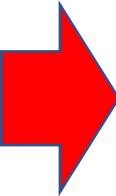
Techno tradi : NuScale- VOYGR = REP/PWR



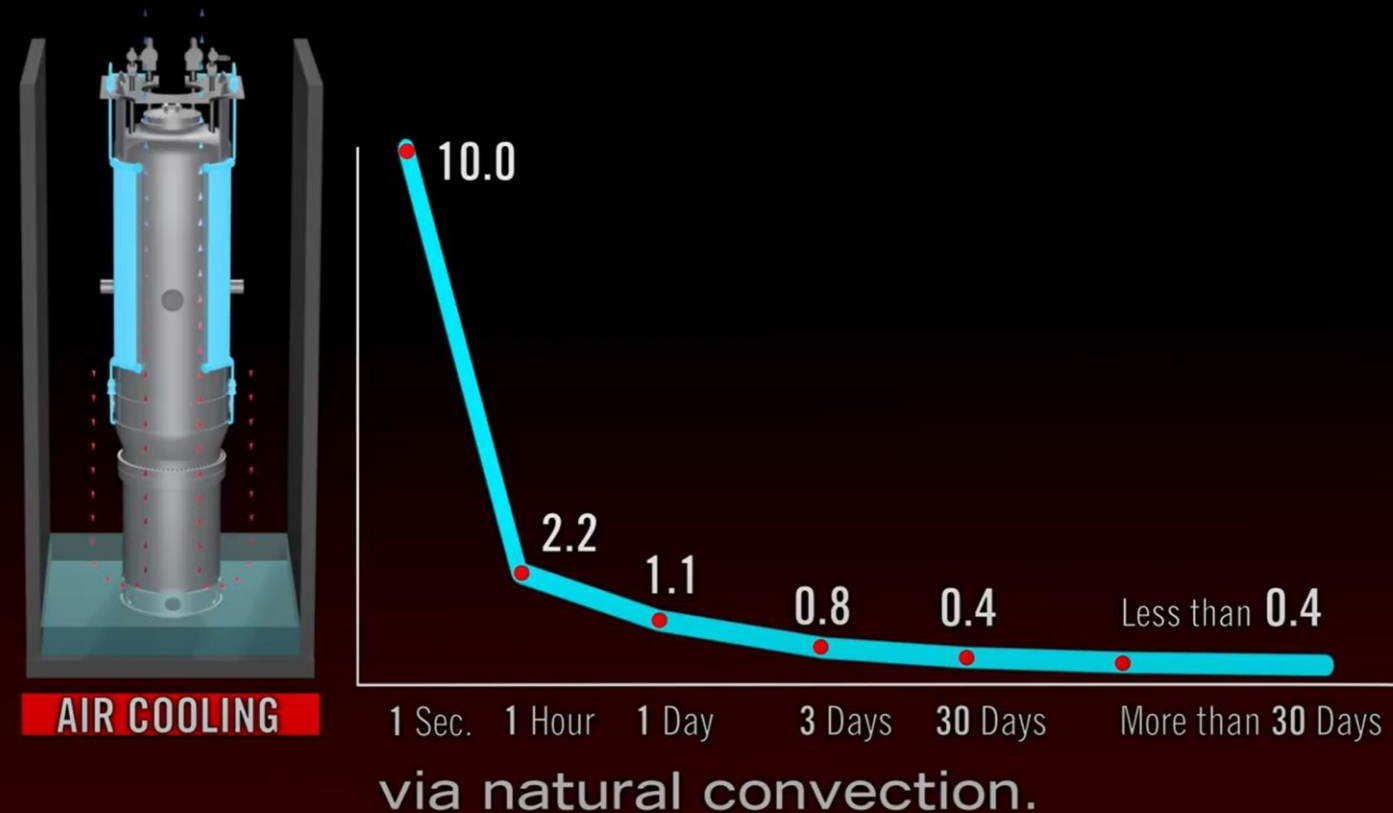
Techno tradi : NuScale- VOYGR = REP/PWR



«The reactors will safely shut down and self-cool, indefinitely, and do so with no need for operator or computer action, AC or DC power, or the addition of water—a first for light water reactor technology”.

- 
1. Refroidissmt par l'eau-cuve
3jrs → 0.8Mw
 2. 3 jrs : l'eau bout et s'évapore
après 30jrs
 3. Refroidissmt air suffisant

Prolonged Station Blackout



Techno tradi : réacteur à eau bouillante de



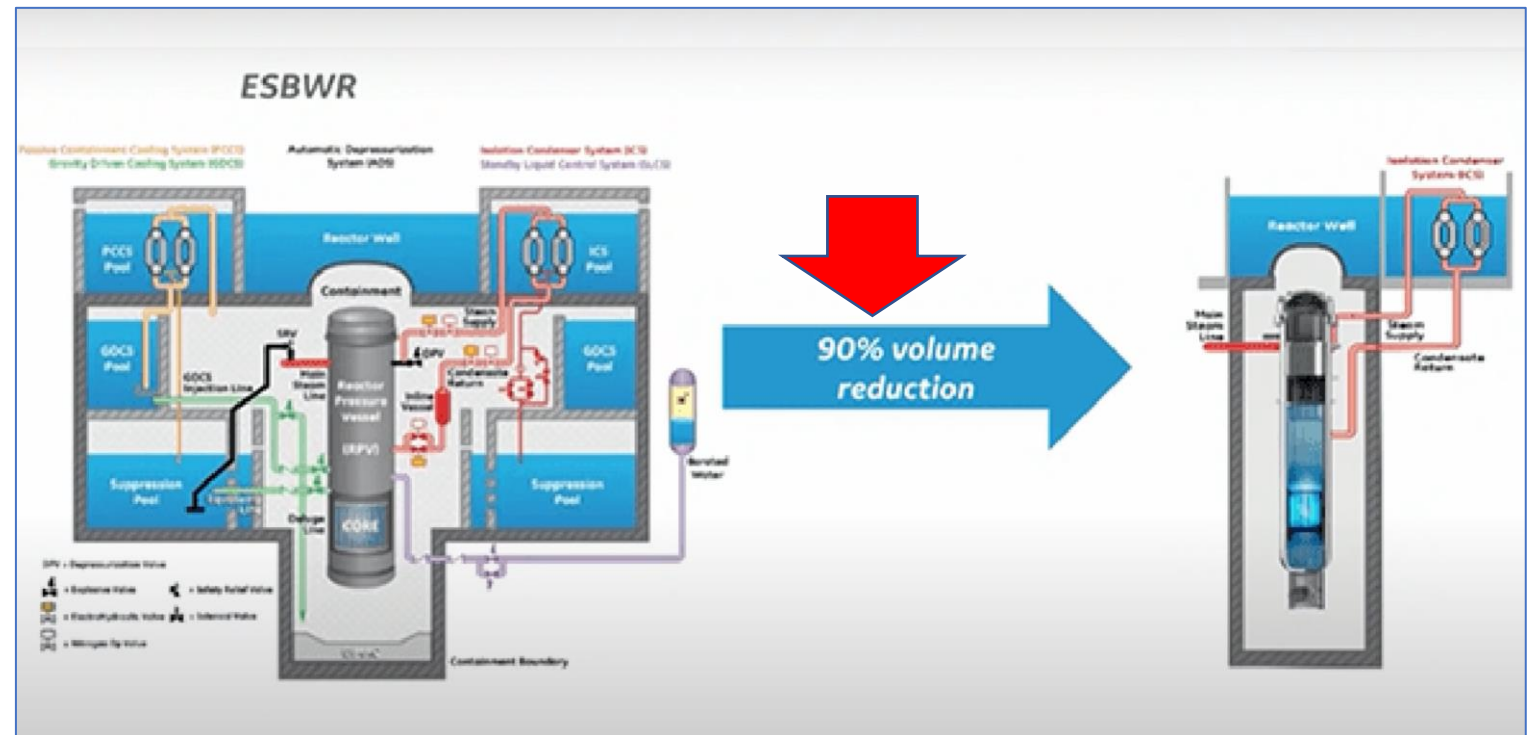
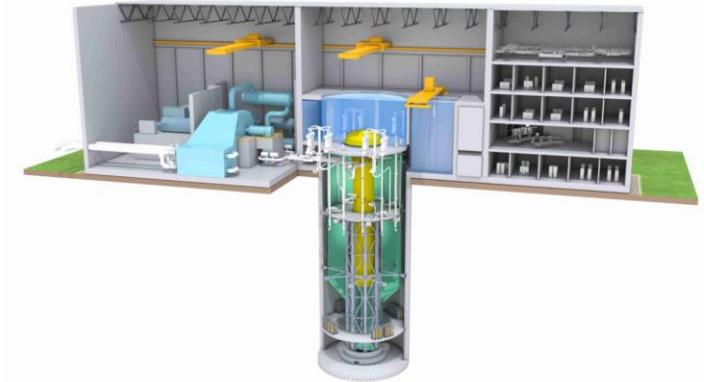
HITACHI

Key advantages

- World-class safety
- Designed to be cost-competitive with gas
- Up to 60% capital cost reduction per MW
- Scaled from the licensed ESBWR design
- Mitigates large LOCAs
- 7 days of passive standby cooling
- Utilizes common construction techniques
- Requires only limited on-site staff and security

BWRX300

10 ème évolution du GE-ESBWR



Nouvelles technos - US

Advanced Reactor Development

Paving a Path to Commercialization

1 DEMONSTRATION

GOAL: Test, license and build operational reactors within 5 - 7 years.



Sodium Reactor

Sodium-cooled fast reactor + molten salt energy storage system

TERRAPOWER



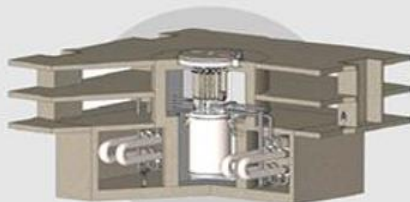
Xe-100

High-temperature gas reactor

X-ENERGY

2 RISK REDUCTION

GOAL: Solve technical, operational and regulatory challenges to support demonstration within 10 - 14 years.



KP-FHR

Fluoride salt-cooled high-temperature reactor

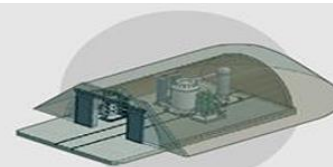
KAIROS POWER



eVinci

Heat pipe-cooled microreactor

WESTINGHOUSE NUCLEAR



BWXT Advanced Nuclear Reactor (BANR)

High-temperature gas-cooled microreactor

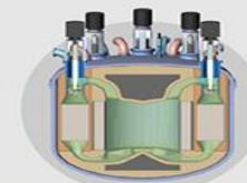
BWX TECHNOLOGIES



SMR-160

Advanced light-water small modular reactor

HOLTEC INTERNATIONAL



Molten Chloride Fast Reactor

SOUTHERN COMPANY

3 CONCEPT DEVELOPMENT

GOAL: Solidify concept to mature technology for potential demonstration by mid-2030s.



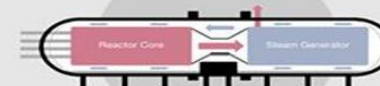
Advanced Sodium-Cooled Reactor Facility

ADVANCED REACTOR CONCEPTS



Fast Modular Reactor

GENERAL ATOMICS



Horizontal Compact High-Temperature Gas Reactor

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Advanced Reactor Development

Paving a Path to Commercialization

1 DEMONSTRATION

GOAL: Test, license and build operational reactors within 5 - 7 years.



Sodium Reactor

Sodium-cooled fast reactor + molten salt
energy storage system
TERRAPOWER



Xe-100

High-temperature gas reactor
X-ENERGY

- **Xe-100 :**
- Reacteur à Gaz (He) à très Hte Tre
- TRISO particles en boucle
- **200 MW** ...Thermal Output
- **80 MW** ...Electric Output
- **750°C** ...Helium Temperature
- **6 MPa** ...Helium Pressure
- 220,000 Graphite Pebbles with TRISO
- Designed for a 60-year operational life
- Online refueling (95% plant availability))

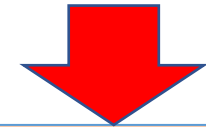
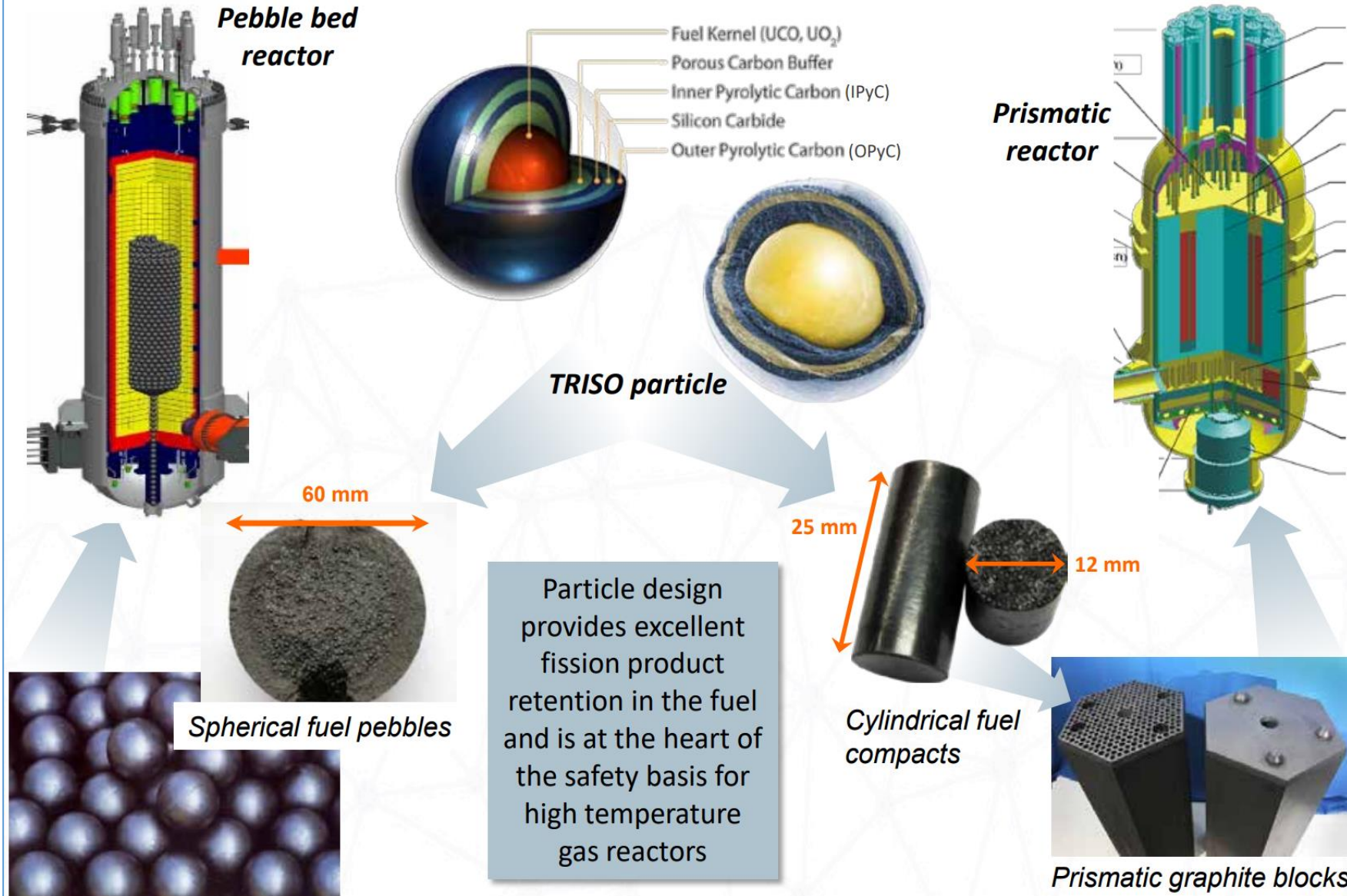
**TRISO Particles: The Most Robust Nuclear
Fuel on Earth**



Office of
NUCLEAR ENERGY

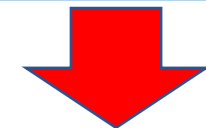


Tristructural Isotropic (TRISO) Coated Particle Fuel



Ne peut pas fondre !
La particule EST la cuve

Par contre : pas de
retraitement → trou ds
le désert !



• Gestion du cycle ? On s'en

NATRIUM

TerraPower
A Nuclear Innovation Company

From TerraPower

The Natrium Project is Underway

May 19, 2022

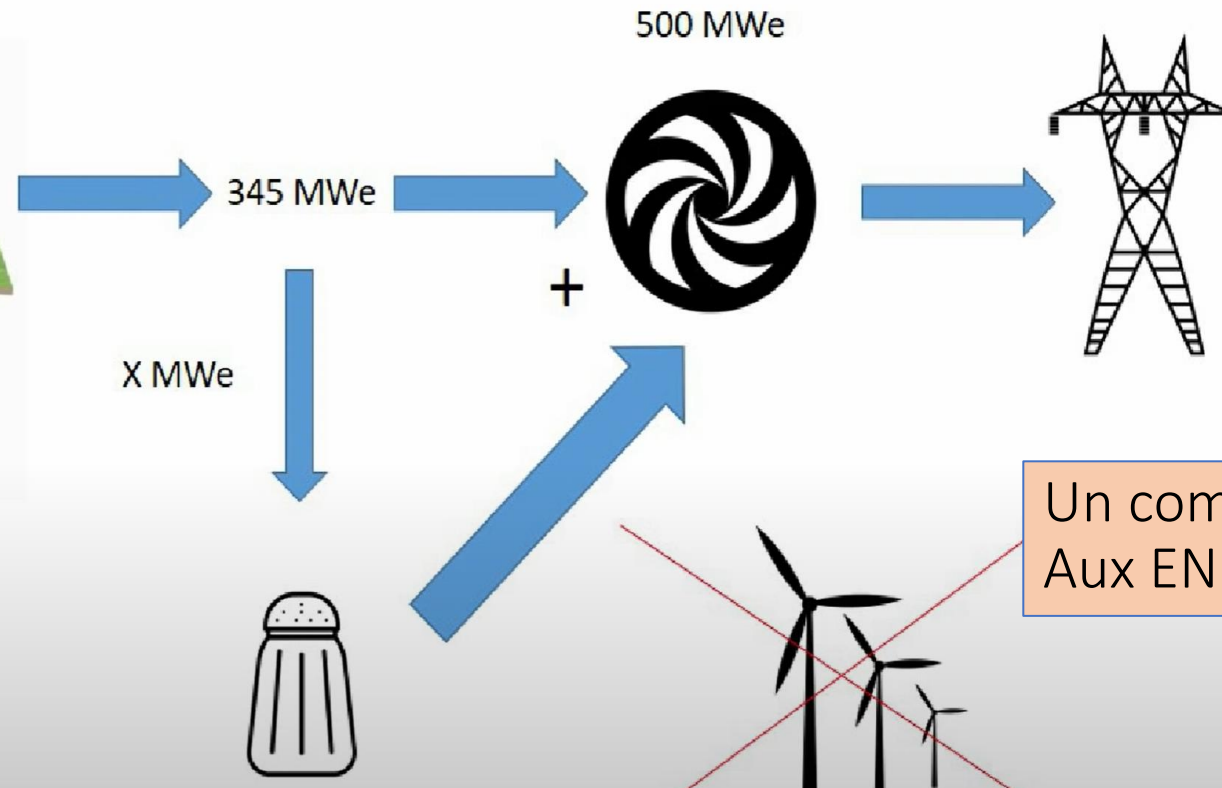
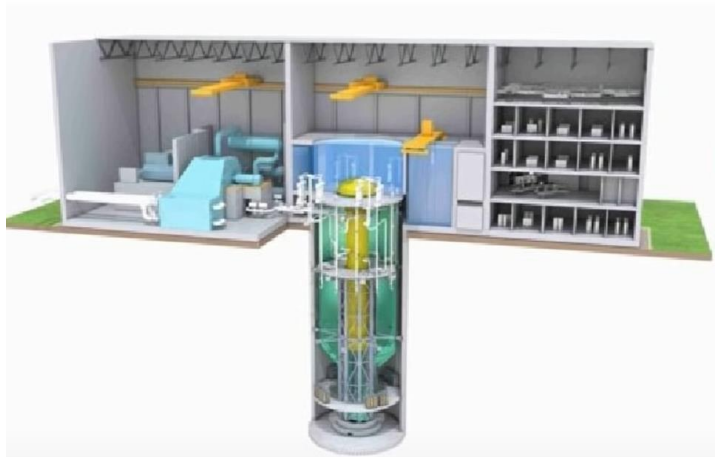


NATrIUM



Natrium

- Un RNR-Na⁺ stockage de TERRAPOWER-GE-HITACHI
- 345 MWe sodium fast reactor and gigawatt-hour-scale, molten salt energy storage.
- The storage can boost output to 500 MWe of power for more than five and a half hours when needed.
- Cost competitive
- Avail : late 20's
- DOE Adv React Demo Progr award funding partnership



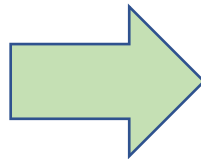
Un complement indispensable
Aux ENR intermittentes

From TerraPower

The Natrium Project is Underway

May 19, 2022

- **DATES:**
- 2021: choix de Kemmerer Wyoming
- **Joint Techno w/GE Hitachi:** 345 Mwe SFR + energy storage → 500 MWe
- 3-ans design et autorisat. (U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC
- 600 engineers sur le projet.
- Plus des équipes preparation du site: fin 7/22
- Début de construction 2024



Natrium « awarded » DOE Advanced Reactor Demonstration Program

NATRIUM

- 345 MWe reactor
- Gigawatt-hour-scale energy storage (capacity of 500 MWe output for 5.5+ hours)
- Cost-competitive, flexible technology that supports load following, energy storage and industrial process heat applications

www.NatriumPower.com



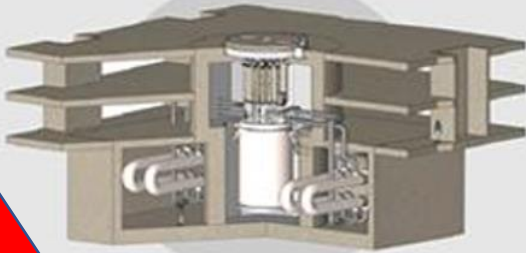
- Fonds attribués par le DOE –ARDP Oct 2020
- Public-private partnership
- Disponibilité visée fin 2020
- Combinaison reacteur + stockage → réseaux avec ENR

Advanced Reactor Development

Paving a Path to Commercialization

2 RISK REDUCTION

GOAL: Solve technical, operational and regulatory challenges to support demonstration within 10 - 14 years.



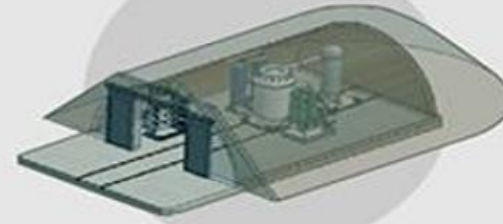
KP-FHR

Fluoride salt-cooled high-temperature reactor
KAIROS POWER



eVinci

Heat pipe-cooled microreactor
WESTINGHOUSE NUCLEAR



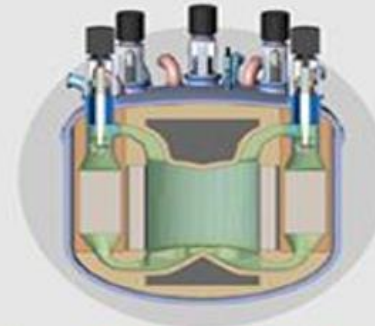
BWXT Advanced Nuclear Reactor (BANR)

High-temperature gas-cooled microreactor
BWXT TECHNOLOGIES



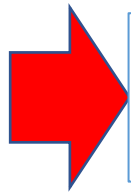
SMR-160

Advanced light-water small modular reactor
HOLTEC INTERNATIONAL



Molten Chloride Fast Reactor

SOUTHERN COMPANY

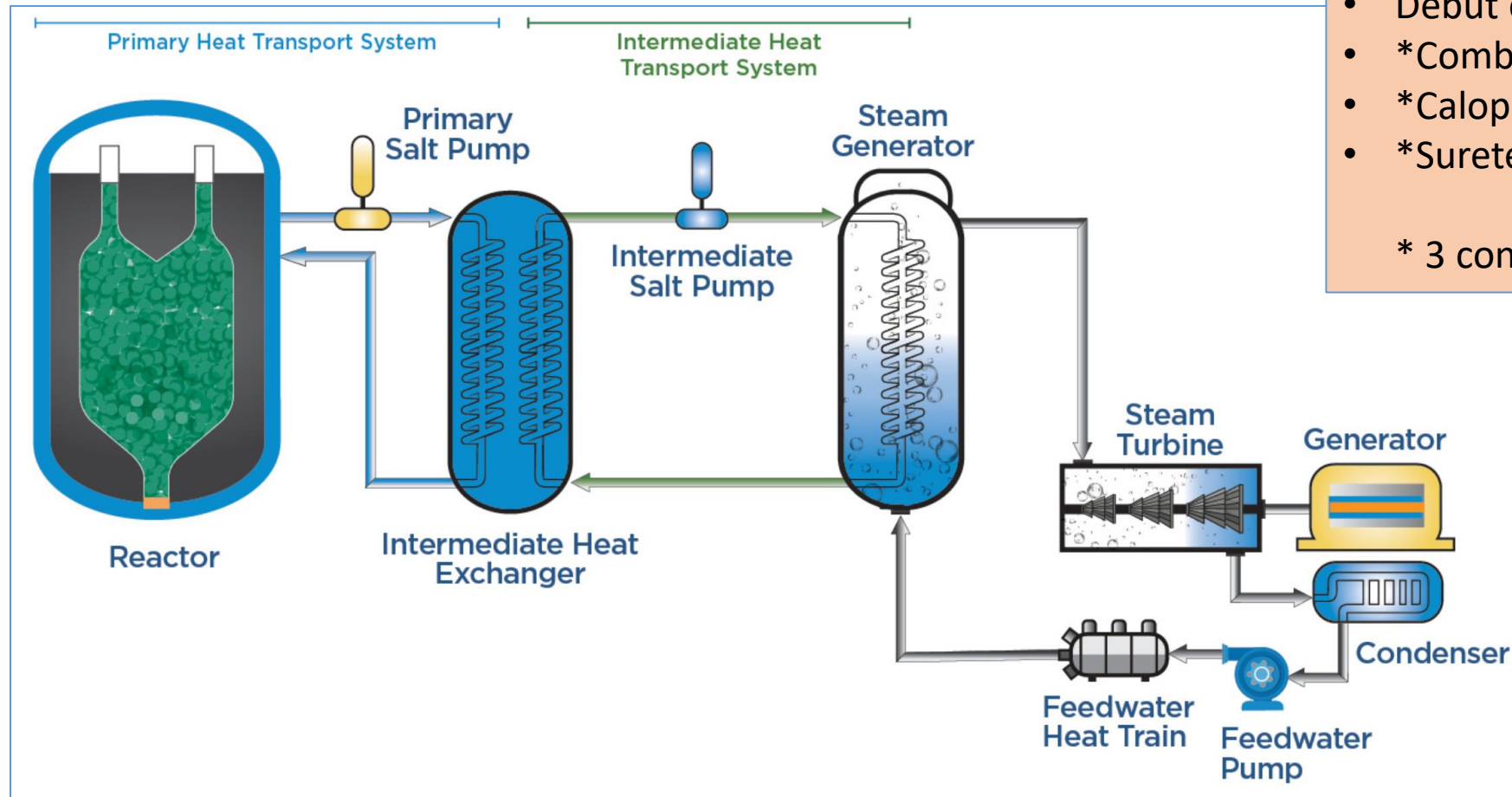


Kairos Power

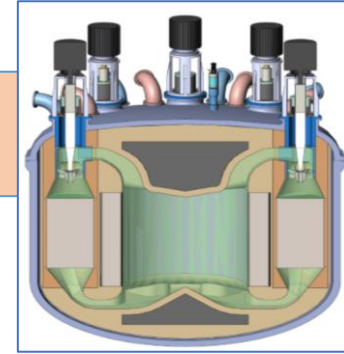
Kairos KP-FHR

TRISO en sels fondus

- Puiss. 140 Mwe
 - Rdmt net 45%
 - Pression # atmo
 - Tre sortie 650°C
 - Début const 12/2020 -> #Oak Ridge
 - *Combust = TRISO (THG)
 - *Caloport = FLiBe (← MSRE)
 - *Sûreté: passive automatic (Na)
- * 3 concepts de filières différentes



MCFR/MCRE - TERRAPOWER

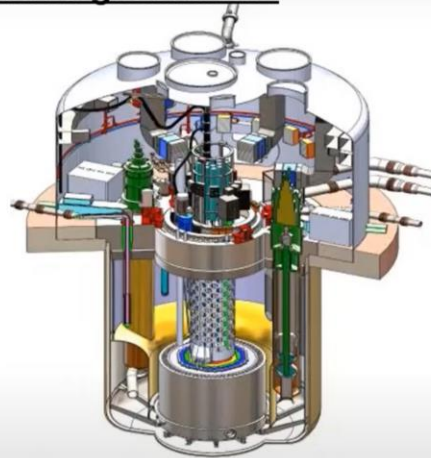
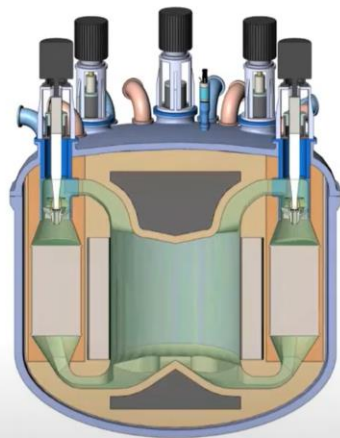


MOLTEN CHLORIDE FAST REACTOR / MOLTEN CHORIDE REACTOR EXPERIMENT

Fait partie des « RISKS REDUCTION » du ARDP

- Jan 2016: Subvention DOE sur 5 ans, \$40M poursuivre projet MCFR → partenariat P/P:
 - TerraPower, Southern Cy, Oak Ridge Nat Lab, the Electric Power Research Inst, Vanderbilt U.
- Juil 2019: 1000h de tests en boucle : pompes, valve de vidange, échangeurs, brides → circuit complet du sel
- Dec 2020: MCRE choisi par DOE comme chemin de risque mini ds le cadre du ARDP-Advanced Reactor Demo Progrme
- 2022: Mise en place de l'IET-Integrated Effects Test à Everett(WA) pour tester la techno à échelle de commercialisation

Les réacteurs à sel fondu surgénérateurs



Molten chloride fast reactor (Bill Gates)

TERRAPOWER (Bill Gates)

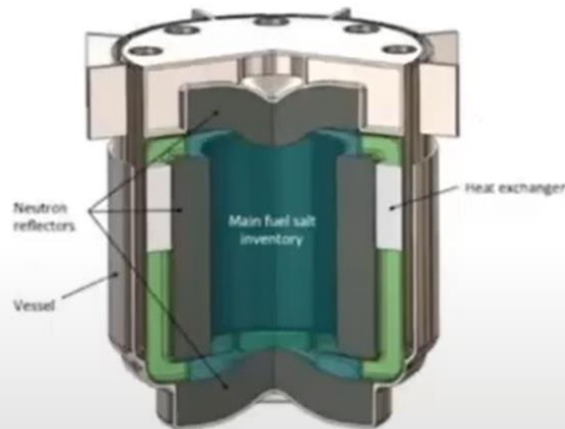


30 MWth (test reactor)

Liquid fuel

Fast
(Breeder or
burner)

Molten chloride
U/Pu cycle (LEU or SNF)
(could use thorium)

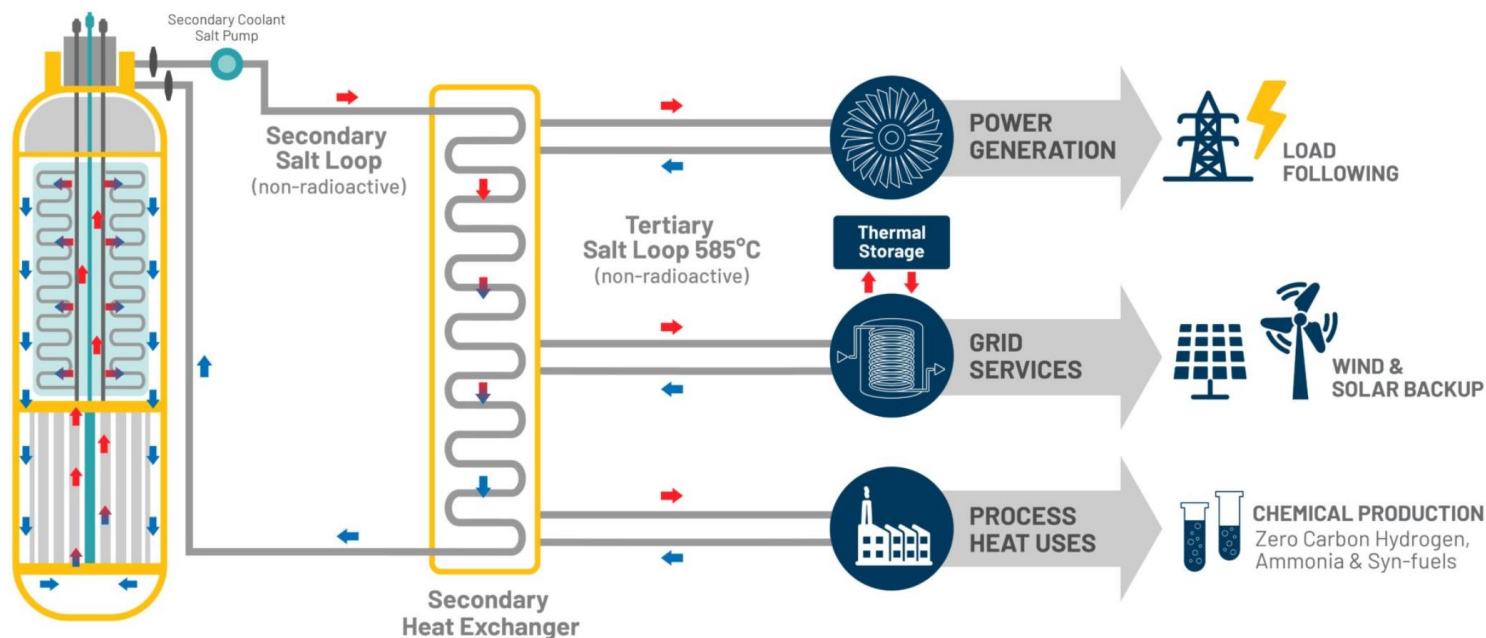


Terrapower (Bill Gates) investit de plus en plus sur son MCFR, devenu MCRE avec Southern en parallèle de leur projet de SFR. Options intéressantes car proche du contexte français (U/Pu, chlorures, rapide) Maquette critique en cours de design soutenu par DOE

- Un réacteur nucléaire pensé pour décarboner l'industrie
- Alors que les premiers travaux sur ce réacteur nucléaire nouvelle génération remontent à 2015, il pourrait **prendre du service en 2026**. À l'époque, les deux sociétés avaient perçu une subvention de 40 millions de dollars de la part du ministère de l'Énergie. Un tel réacteur pourrait, selon TerraPower, être **une solution pour produire de l'électricité décarbonée** à destination de l'industrie.
- Un élément clé dans la de lutte contre le changement climatique. En effet, **l'industrie est responsable de près d'un quart de toutes les émissions de gaz à effet de serre aux États-Unis**, selon l'Agence de protection de l'environnement. **L'acier est à lui seul responsable d'environ 9% des émissions mondiales...**



IMSR* Integral MSR



The Replaceable IMSR® Core-unit

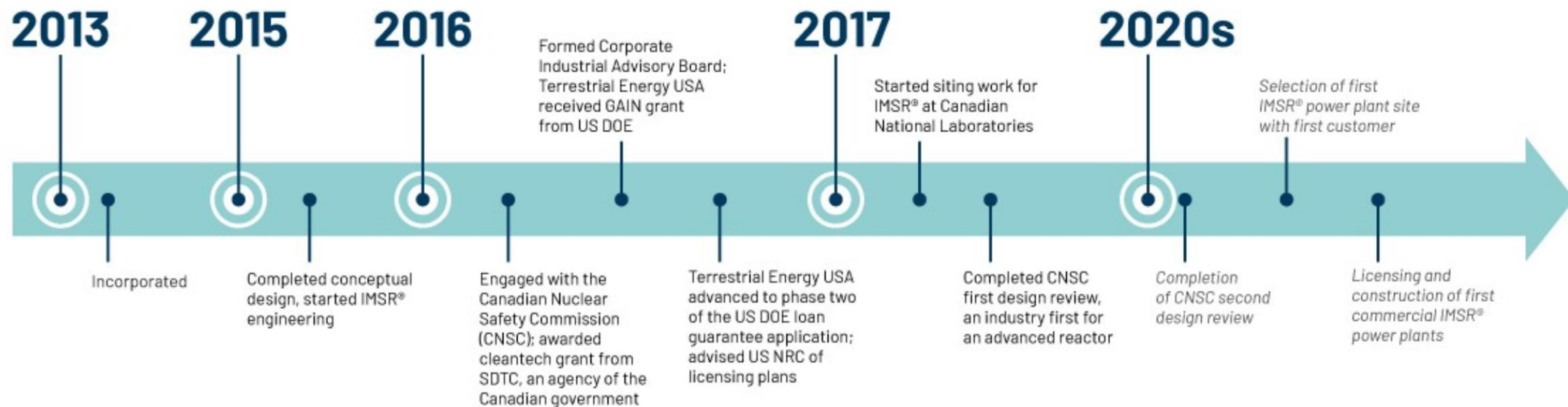
The key challenge to MSR commercialisation has been graphite's limited lifetime in a reactor core. Replacing the graphite moderator is difficult to do safely and economically in a commercial setting.

The IMSR® patented innovation solves this problem by integrating the primary reactor components, including the graphite moderator, into a sealed and replaceable reactor core – called the “IMSR® Core-unit.” This has an operating lifetime of seven years, and it is simple and safe to replace.

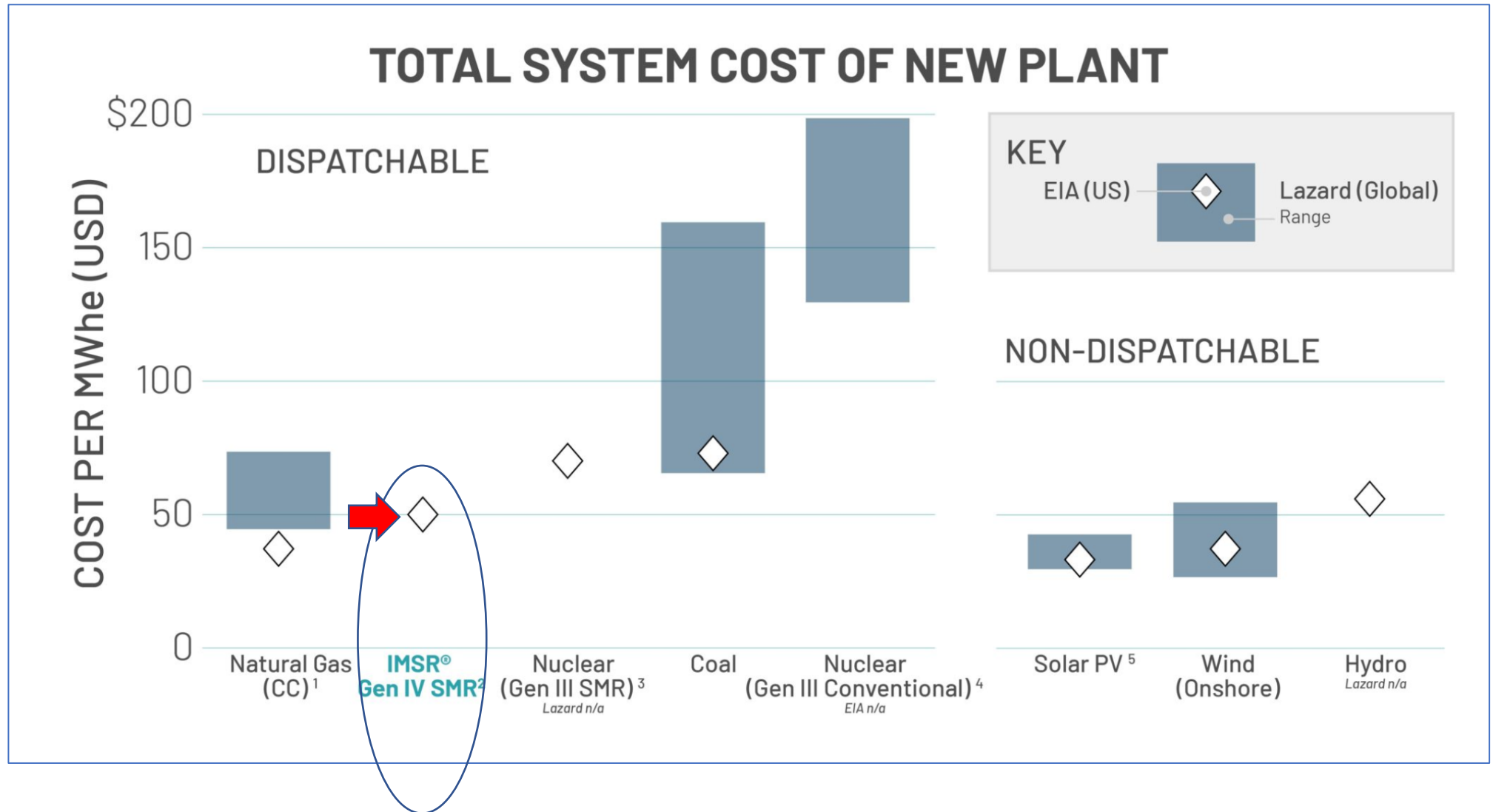
- MSR cycle U utilise U235 à 5%
- Support DOE 3M\$ pour licensing & commercialisation
- 400MWe Rdmt = 44%
- Coeur remplaçable à 7 ans

Calendrier

TERRESTRIAL
E N E R G Y



TERRESTRIAL ENERGY IMSR



NUWARD (France: EDF-CEA-TA-NG)

- Objectif : remplacer les centrales à énergies fossiles.
- Consortium EDF, TA, Naval Group, CEA , projet lancé en sep 2017
- Soutien Etat 50M€
- REP type ss-marins nuke (TA) +compact + innovations (sécurité passive,simpl. Exploitation
- 2x170MWe
- Export essentielmt mais «démonstrateur en France? À conf. »
- Timing:
 - 4/2021 1^{er} design
 - 2022: dossier sécurité à l'ASN
 - 2026 fin design détaillé complet

NEWARD: un projet français de réacteur de moyenne puissance: 2x170 MWe

Plan de relance 2020 50 M€ - Plan France 2030 500 M€



REP Gen 3+ destiné à remplacer les centrales à combustibles fossiles à l'export

Conception optimisée (technologies éprouvées et innovations spécifiques) et avec une part de sûreté passive

Conception simple, modulaire et standardisée → compétitivité

Adapté aux besoins d'un réseau électrique de taille modérée

Adaptable à la cogénération, à la production d'hydrogène, à la désalinisation, à la capture et à la valorisation du CO₂.



NUWARD™ Planning de développement

- 4/2021 1^{er} design
- 2022: dossier sécurité à l'ASN
- 2026 fin design détaillé complet

Study of feasibility 2012-2015



Pre-Conceptual Design 2017-2019



Conceptual Design 2019-2022

nuward

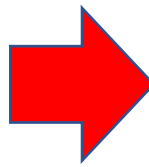
Basic Design + pre-licencing

nuward

Detailed Design + licensing

nuward

Mise sur le marché du produit NUWARD™ à l'horizon 2030



The Power Barge

Turnkey floating power plant

- 2014 Copenhagen
- PhD dense
- #100 p
- CMSR:
 - MSR
 - Avec modérateur
 - Sel fluorure
 - 250MWt-100MWe
 - 12 ans autonomie
 - Partenariat Corée du sud
 - Samsung
 - Marché SE asiatique
 - Alt à la recarbonation
 - Au prix du charbon

The CMSR

Next-generation nuclear reactor

Our Compact Molten Salt Reactor, the CMSR, is safe, significantly smaller, better for the environment, and inexpensive even compared to fossil fuels.



Project timeline

Our path to commercialization

Initial modeling

Design & verification

Detailed design & validation

Commercial prototypes

Power Barge serial production

2015

2020

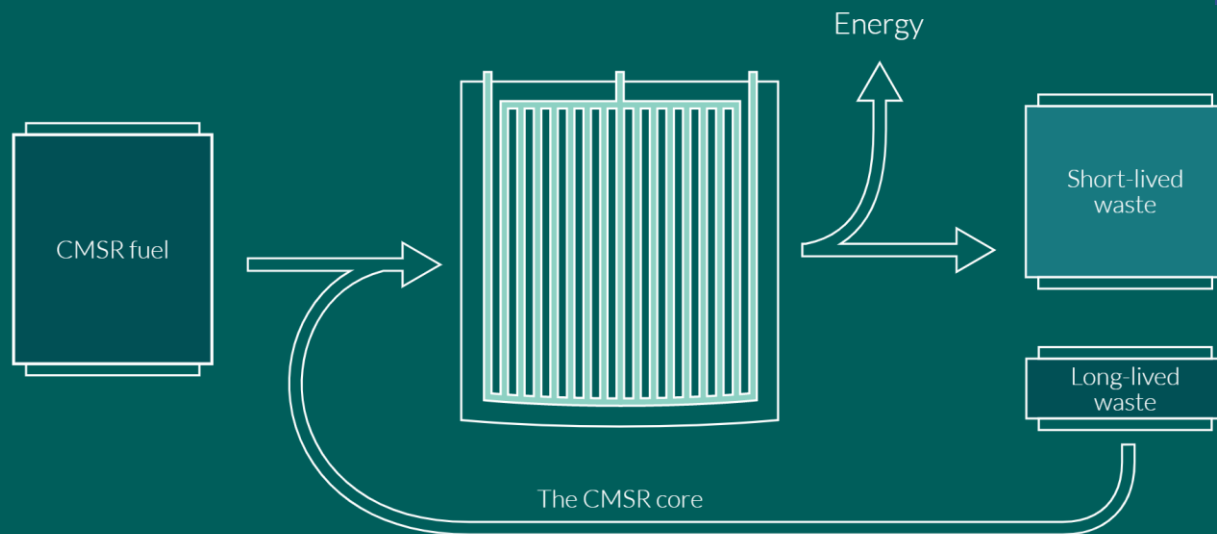
2023

2024

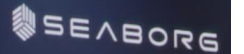
2026



THE GOAL FOR SEABORG IS TO REUSE OUR OWN WASTE WITH THE AMBITION TO CLOSE OUR FUEL CYCLE



**One billion people
- a unique opportunity**



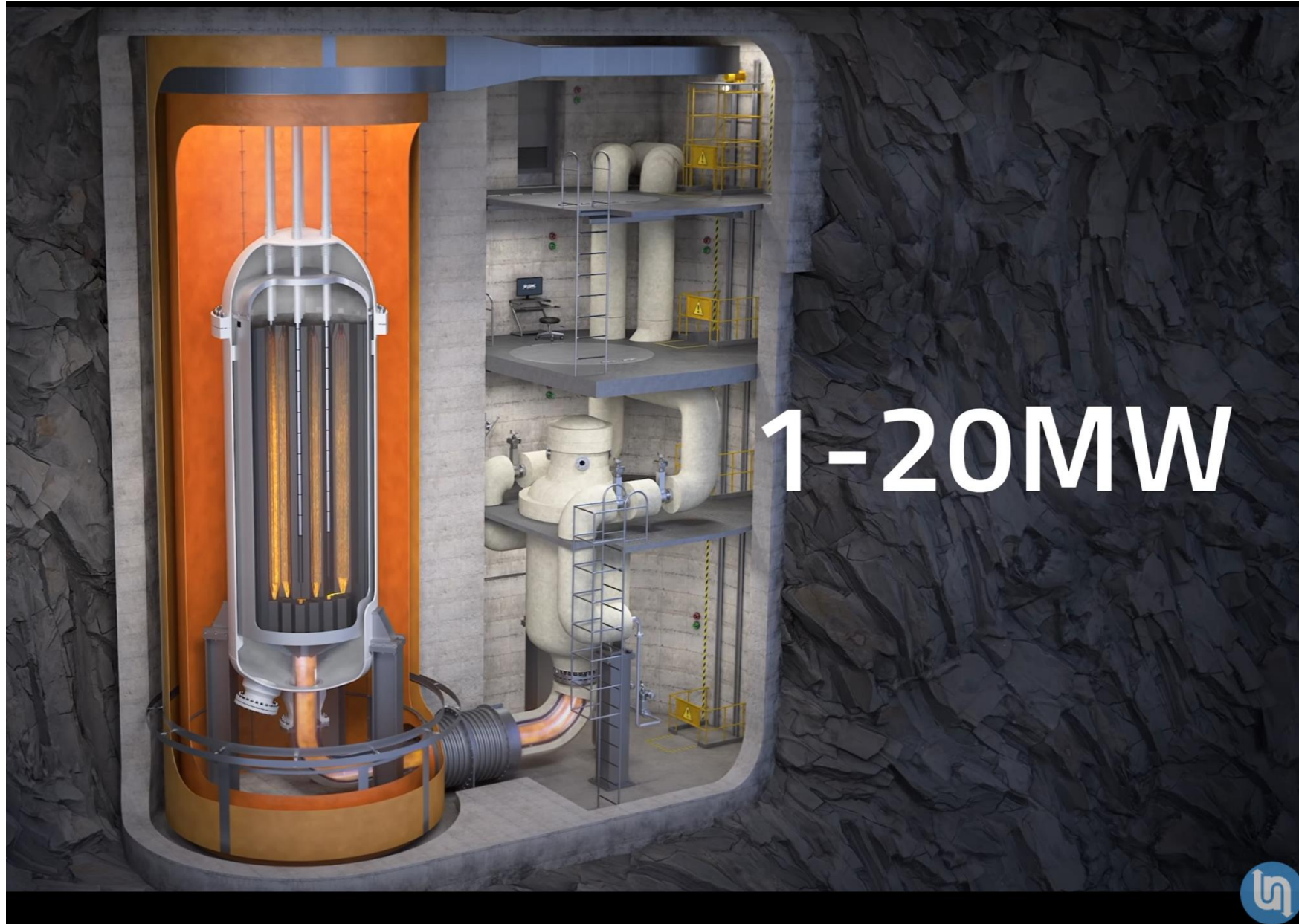
Develop in Denmark

Build in South Korea

Power South East Asia

**7,500 CMSRs
by 2040**

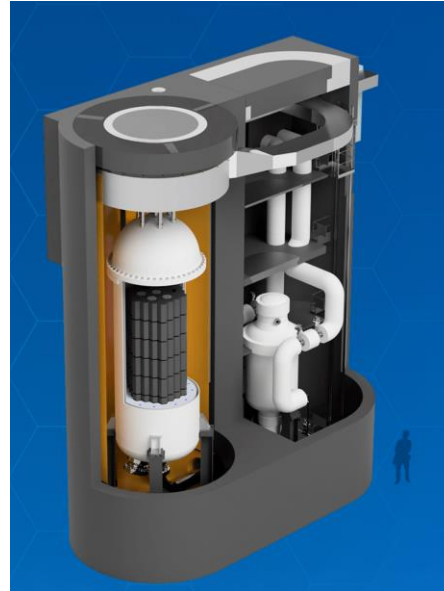
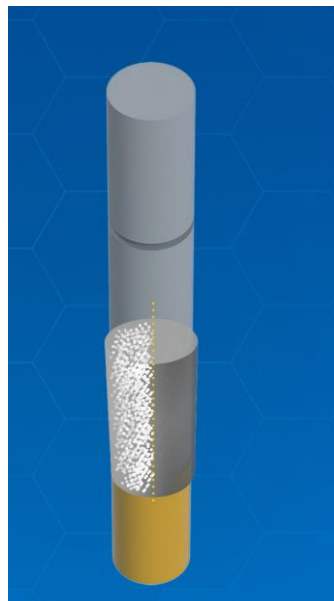
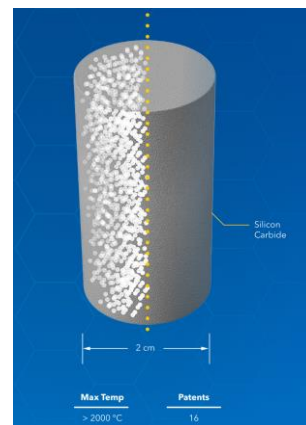
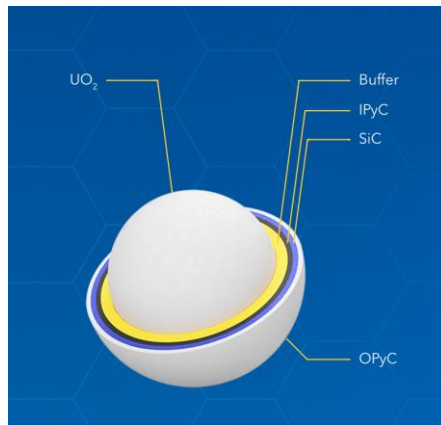
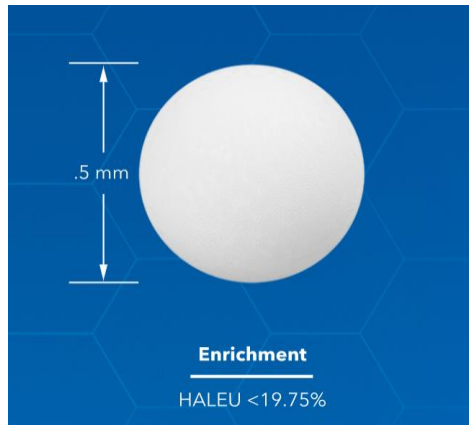
SMR c'est bien → Oubliez les SMR ! → Bienvenue aux MMR



MMR de USNC



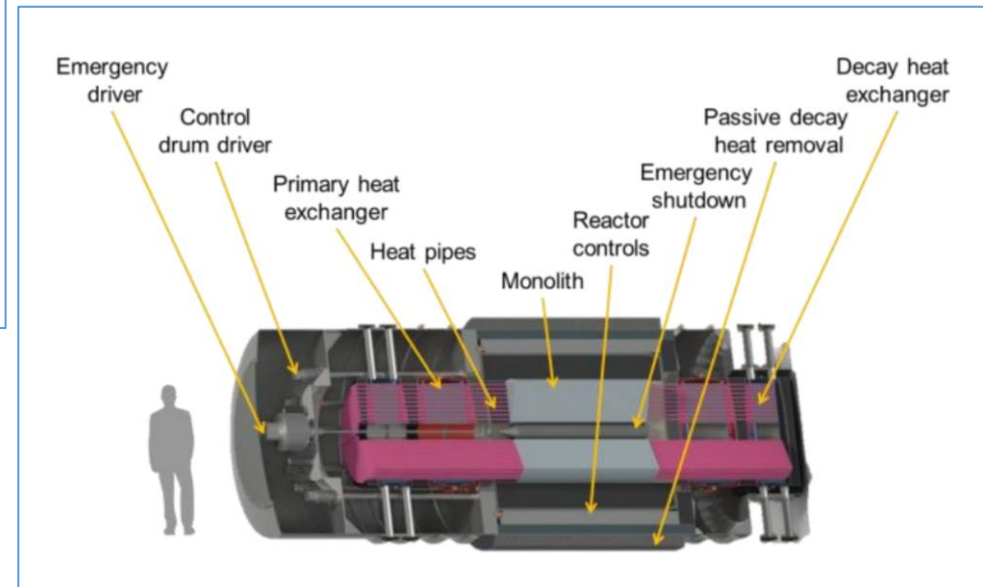
ULTRA SAFE NUCLEAR



- 5 Mwe
- Combust TRISO ds FCM
- Modérateur Graphite
- Caloport He
- Sécurité 100% passive
- PF retenus ds les TRISO part
- Stockage chaleur → Molten Salt Tanks
- Pas besoin d'eau
- Disponibilité 99%
- Pas de rechargement : durée 20 ans
- Après chgmt « éventuel » des cartouches
- Marché: mines, collectivités isolées (désert, forêt tropic, base antarctique,...), industries sur site lointains, etc..

Westinghouse: eVinci™ Micro-Reactor

- **Transportable** energy generator
- **Fully factory built, fueled and assembled**
- Delivers combined heat and power – **5 MWe** and up to 13MWt
- **8+ years of full power operation prior to refueling**
- Target less than **30 days onsite installation**
- High speed load following capability
- High reliability and minimal moving parts
- Capable of **autonomous operation**
- Near zero Emergency Planning Zone with small site footprint
- **No spent fuel or waste storage on site**
- **Simplified decommissioning and remediation**
- **DOE award & funding**



En route vers le → Concept de « FISSION BATTERY »

Fission Battery Initiative

Research and Development Plan

Vivek Agarwal, Youssef A. Ballout, and Jess C. Gehin
Idaho National Laboratory

January 2021

Idaho National Laboratory
Nuclear Science and Technology Directorate
Idaho Falls, Idaho 83415

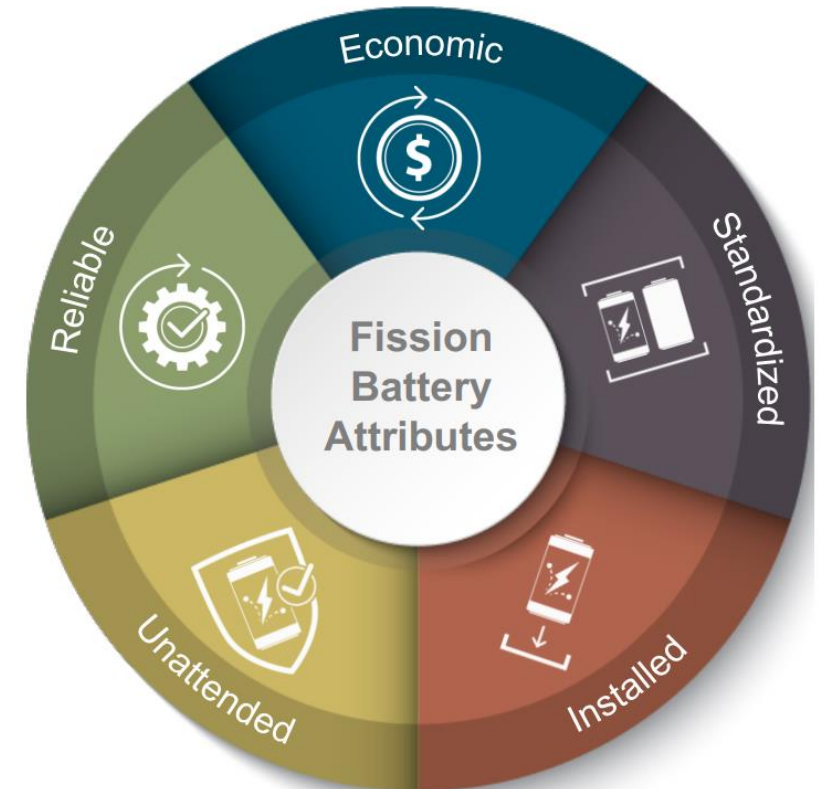
<http://www.inl.gov>

Prepared for the
U.S. Department of Energy
Office of Nuclear Energy
Under DOE Idaho Operations Office
Contract DE-AC07-05ID14517

The initiative envisions developing technologies that enable nuclear reactor systems to function as batteries.....

These reactors would be able to operate reliably on their own, without onsite personnel and operators, and autonomously adjust to application demand

Le « nuke »
PLUG & PLAY !!



Pré - CONCLUSION

- ➔ • On parle bien de « nouveaux nucléaires »
 - La « sécurité passive » en est la clé de voute → elle débloque tout: le nuke n'est plus « une affaire d'état » mais un « business pour entrepreneurs » avec un marché mondial gigantesque
- ➔ • Le concept de production d'énergie « distribuée » va s'imposer
 - Produire là où on utilise
- ➔ • On a bien un chgmt de paradigme complet qui remet en cause toute la chaine de production d'énergie
 - On pourrait s'interroger sur EPR II
 - Voire même sur ITER et la fusion ? Est-ce bien là qu'il faut engloutir des Mds € ? Compte tenu de l'URGENCE ?
- ➔ • C'est devant ces perspectives que l'urgence d'une véritable mobilisation générale sera décisive
 - Orientations, financement, partenariats
 - Des démonstrateurs à financer dès que possible en GIV
- ➔ • Ne pas lâcher la proie pour l'ombre
 - Les REP ont fait leur preuve → transition ss pb vers GIV

V- FOCUS EPR II

La saga EPR

- Un **désamour** entretenu à l'égard du nuke qui a découragé et éloigné les **compétences**

- Une **organisation non adaptée**

- Des **engagements « intenables »** (temps/prix) pris par une **gouvernance « folle »**

- Une **perte de maîtrise industrielle** (cf TAISHAN en comparaison)

- Les points d'achoppement ne sont pas de nature nucléaire, mais de nature grds trvx BTP et métallurgique – soudure
- **La filière REP est saine techniquement**

- La maîtrise du projet n'a pas compris qu'il y avait **chgmt d'échelle** prp aux REP précédents et donc complexité très accrue sans préparation

- Enfin et pour parachever le tout :

- Quand le **principe de précaution** révèle ses limitesl'ASN est sans doute la plus exigeante....

- **EPR de Flamanville décision 2006 -> un FIASCO ABSOLU**
 - *coût 3,2 Md€2005 (3,8 Md€2015) une mise en service 2012, MWh: 43 €2005/MWh.*
 - *Auj EDF : chgmnt combust mi2023, coût total à terminaison d'environ 12,7 Md€2015 + 4,2 Md€ d'intérêts + etc → le coût global de 19 Md€2015*

*L'AP1000 de Westinghouse : pas tout rose non plus !
Le premier AP1000 connecté au réseau, Sanmen-
Chine, le 30 juin 2018 (début certif 2004 début const
en 2008), En 2019, quatre réacteurs AP1000 en Chine
vs 2 EPR TAISHAN 1,2 → Taishan 1: 6 juin 2018*



La question: EdF pourra-t-il tenir l'engagmt EPR-II ?

EPR II: RAPPORT 22/2/22 <https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapport/pdf/283885.pdf>

- Les défaillances EPR – F
 - défaut d'organisation au sein d'EDF,
 - Un niveau de préparation des études
 - et une politique d'achats et de surveillance inadaptés à la complexité accrue du réacteur EPR
 - un défaut de maîtrise industrielle chez Framatome, désormais intégrée au Groupe EDF.
 - Le retour d'expérience ne permet pas de conclure à un manque de maîtrise plus largement répandu au sein du tissu industriel français

- EPR II = EPR-F + REX (Flamanville 3, Taishan 1 et 2, Hinkley Point C 1 et 2 et Olkiluoto 3) + Fuku + simplification → réduire son coût et ses délais de construction.

- Date couplage : 2037=2035+ marge2+ ss réserve tenue des calendriers adminisT.
- (décision, consultation, autorisation)
- COUT :
 - 2 audits ext 19-21
 - 3 paires d'EPR II= 51,7 Md€ h/ financmt= 43,1+1,7(démantelmt+déchets)+6,9(incert)
 - Evaluation qualifiée de « prudente et robuste »
- Au MWh / taux fin: 40€/1%--60€/4%--100€/7%

- Challenge d'importance : 6x2 EPRII+ EXPORT + grds carénages des existants + les SMR
- EdF ? Banco (plan Excell, audits, etc..) id –Framatome → à suivre de près

A la question: EdF pourra-t-il tenir l'engagmt EPR-II ? S'ajoute: A-t-on encore besoin d'EPR II ?

A la question: EdF pourra-t-il tenir l'engagmt EPR-II ? S'ajoute: A-t-on encore besoin d'EPR II ?

- Les PLUS:

- ➡ • Filière prouvée installée ds le tissu industriel
- ➡ • Cycle complet est en place et fctnne
- ➡ • Know how à retrouver sur des aspects plutôt « non-nucléaires »: Grds Trvx, Métallurgie
- ➡ • Les professionnels y croient → PLAN EXCELL
- ➡ • Les gros réacteurs= épine dorsale du Réseau, les SMR/MMR → appoint excentré/export
- Des « références » T1(6/18)-2(9/19), OLKI 3 (3/22)

- Les MOINS:

- ➡ • Lourdeur admin et tenu des délais (« entrisme anti-nuke » sce CEA)
 - Accompagnement
 - ➡ • Gouvernemental
 - ➡ • Régions
 - ➡ • ASN
- ➡ • Image à restaurer (MEDIAS, Polit, éducation/enseignmt, ...)
- ➡ • Communauté à re-motiver/ accompagner

VI- CONCLUSION

A
DISCUTER



- La transition se fera sans doute plus tôt que prévue
 - Il faut tenir jusqu'à ce biseau
 - 8 EPR suffiront peut-être alors
 - Avec des SMR de taille C-charbon en appoint et en urbain
 - Et peut-être qq MMR ici ou là en industriel (à recenser)
 - Avant de basculer sur des GIV de puissance

Ça se
DISCUTE,
MERCI

ANNEXES

Selon la Police vs selon les organisations syndicales

- ***Le saviez-vous ?***
- Le bilan de l'accident nucléaire de Tchernobyl reste difficile à établir. Le comité scientifique de l'Organisation des Nations unies (ONU) ne reconnaît pas plus d'une trentaine de morts directs. D'autres experts scientifiques annoncent plusieurs dizaines de milliers de morts par des cancers dus aux radiations. D'autres encore, relayés par le réseau « *Sortir du nucléaire* », estiment qu'environ un million de décès à travers le monde sont attribuables aux retombées de Tchernobyl.
- Les bilans officiels de l'accident nucléaire de Fukushima ne font état que d'un seul mort direct par irradiation. Et les scientifiques restent partagés quant à une possible augmentation du nombre de cancers déclarés dans la région. Toutefois, quelque 2.300 personnes vivant dans les environs au moment de l'accident et mortes prématurément sont considérées comme des victimes potentielles — liées non aux radiations, mais à une désorganisation des structures médicales et à des conditions de vie difficiles. Le séisme et le tsunami à l'origine de l'accident ont, eux, fait plus de 22.500 victimes.

S'ce: FUTURA SCIENCES

Le thorium présenté comme le combustible miracle de demain fait le buzz depuis 2016 ...

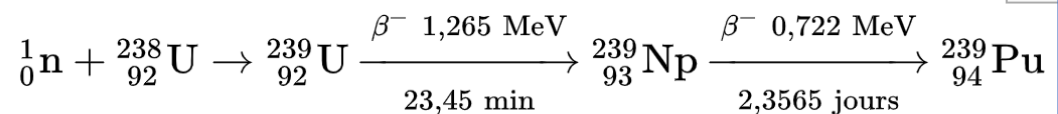
Le MSR est souvent associé à tort au cycle utilisant le thorium (cycle Th/U233)

Le MSR peut utiliser n'importe quel fertile ou fissile, en mode thermique ou rapide suivant les objectifs

Le thorium est un fertile. Le MSR a besoin de fissile pour être critique. Ce fissile peut être l'U235, le Pu voire des actinides mineurs.

En fertile, on a environ 300 000 t d'uranium appauvri disponible en France

Le cycle TH/U233 ne présente pas d'avantages particuliers, sauf pour les pays qui ont du thorium disponible . Il demande par contre de gros travaux de développement



PAS BESOIN en FRANCE...
On a tout l'U238 nécessaire
Pour tenir qq 1000 ans...

Compléments Th à rajouter

- Le Th est « théoriquement » meilleur :
facteur de repro de 2,29 vs 2,06 → surgé possible en nth mais il y a bcp de MAIS:
- Les technologies attachées à l'Uranium/Thorium sont globalement **beaucoup plus compliquées** que celles permettant d'exploiter l'Uranium/Plutonium, que ce soit pour la productions d'énergie ou surtout pour le **retraitement du combustible** (et on a besoin des deux pour faire fonctionner un réacteur à sels fondus)
- Les scénarios de développement de la filière (présentés par D HEUER) se situent dans plusieurs dizaines d'années, non seulement pour réussir **les nombreux et difficiles développements technologiques nécessaires** (Peu de REX), mais également pour **accumuler suffisamment de combustibles fsissile** (produire **l'U233 à partir du thorium**) pour le démarrage.
- C'est tout une nouvelle filière à mettre en place → qq 10x d'années car bcp de changements
- Enfin: on a su faire des surgé en nR
- [Thorium: le mythe du nucléaire durable et propre - Transitions & Energies \(transitionsenergies.com\)](http://transitionsenergies.com)

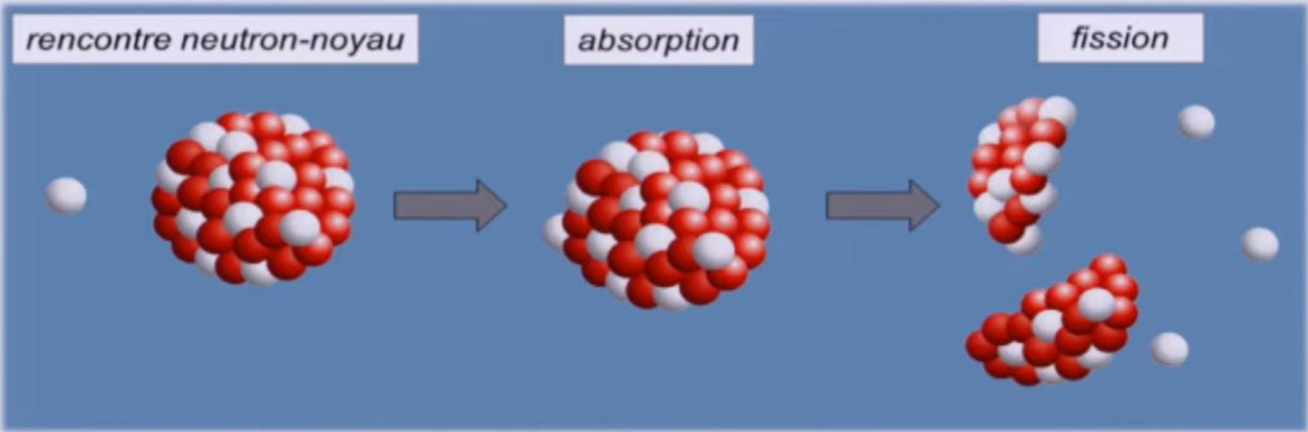
- Autrement dit :
 - Cycle U-Pu → chlorures
 - Cycle Th-U → fluorures

- ▶ Les taux de solubilité du Pu dans les fluorures est trop faible en particulier dans les basses températures de fonctionnement. Donc dès qu'on parle d'un cycle utilisant du Pu, on bascule généralement sur les chlorures
- ▶ L'avantage des fluorures est la possibilité d'utiliser le REX du MSRE, en particulier dans des filières Thorium
- ▶ L'avantage/ Désavantage des chlorures est d'avoir un spectre plus rapide donc plus efficace pour la disparition des actinides mineurs. Par contre il faut des protections plus importantes pour les matériaux.
- ▶ En termes de retraitement, l'avantage, au moins en France, est de pouvoir facilement dissoudre dans l'eau les chlorures. Cela facilite aussi le lavage des composants après extraction.
- ▶ Dans les deux cas, une séparation isotopique pour le Lithium ou le Na Cl est nécessaire (en CL 37 pour éviter le CL 36)

Les bases: qq rappels empruntés (principiplt au CEA)

Energie nucléaire est 1million de fois
supérieure à masse égale au enerie trad (gaz , pétrole)

cea LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES : la fission



The diagram illustrates the three stages of nuclear fission: 1. *rencontre neutron-noyau*: A small white sphere (neutron) approaches a large red and white sphere (uranium nucleus). 2. *absorption*: The neutron is absorbed by the nucleus, forming a more unstable, vibrating nucleus. 3. *fission*: The nucleus splits into two smaller fission products, releasing energy and additional neutrons.

- 1938 : mise en évidence de la **FISSION** de l'uranium
- La fission d'un noyau libère
200 millions d'électrons-volts (eV)
- Les réactions chimiques ne libèrent que
quelques eV par atome

© CEA

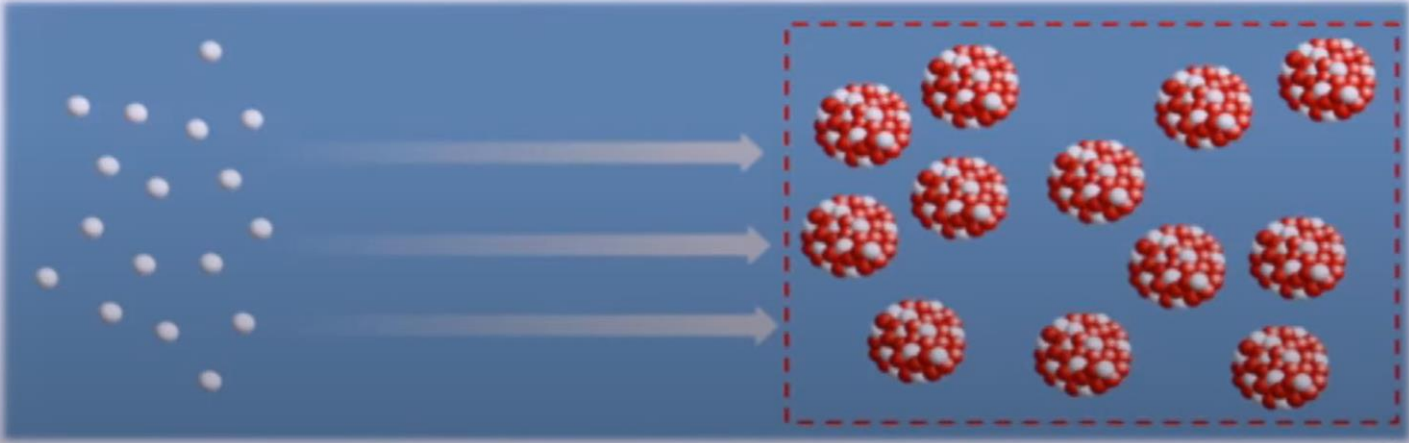
Peut-on raisonblmt
S'en passer ?

Les bases: qq rappels empruntés (principiplt au CEA)

cea LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES : la fission

■ Plusieurs facteurs influent sur l'occurrence des fissions :

- 1- le **flux de neutrons** incident
- 2- la **vitesse (énergie)** des neutrons
- 3- la **concentration** des noyaux fissiles
- 4- la **nature des noyaux**



Neutron « lent » $\approx$ quelques km / s
Neutron « rapide » $\approx$ 10 000 km / s

© CEA

Les bases: qq rappels empruntés (principiplt au CEA)



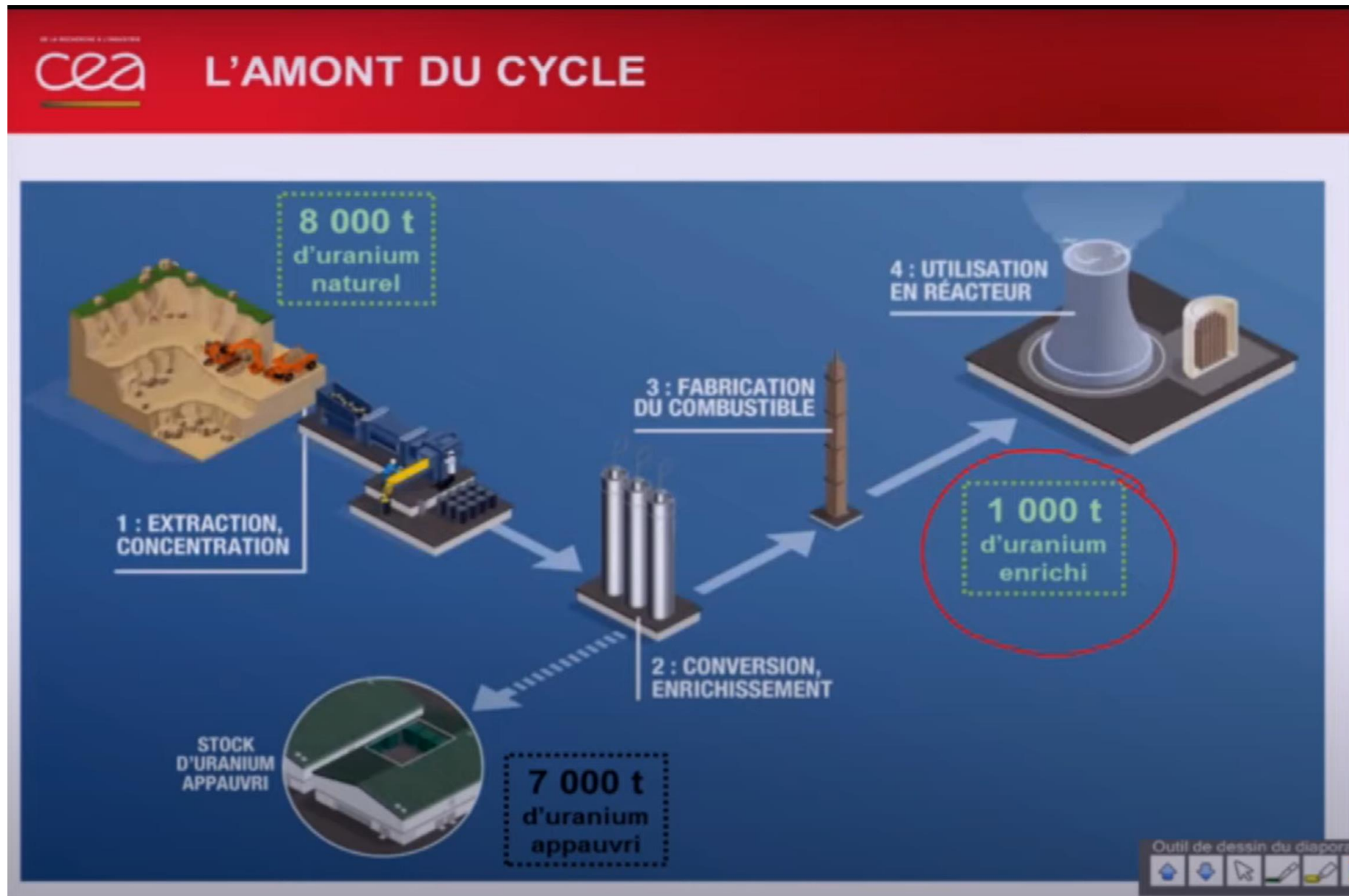
LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES : la fission

■ Fréquence des absorptions et des fissions pour différents noyaux

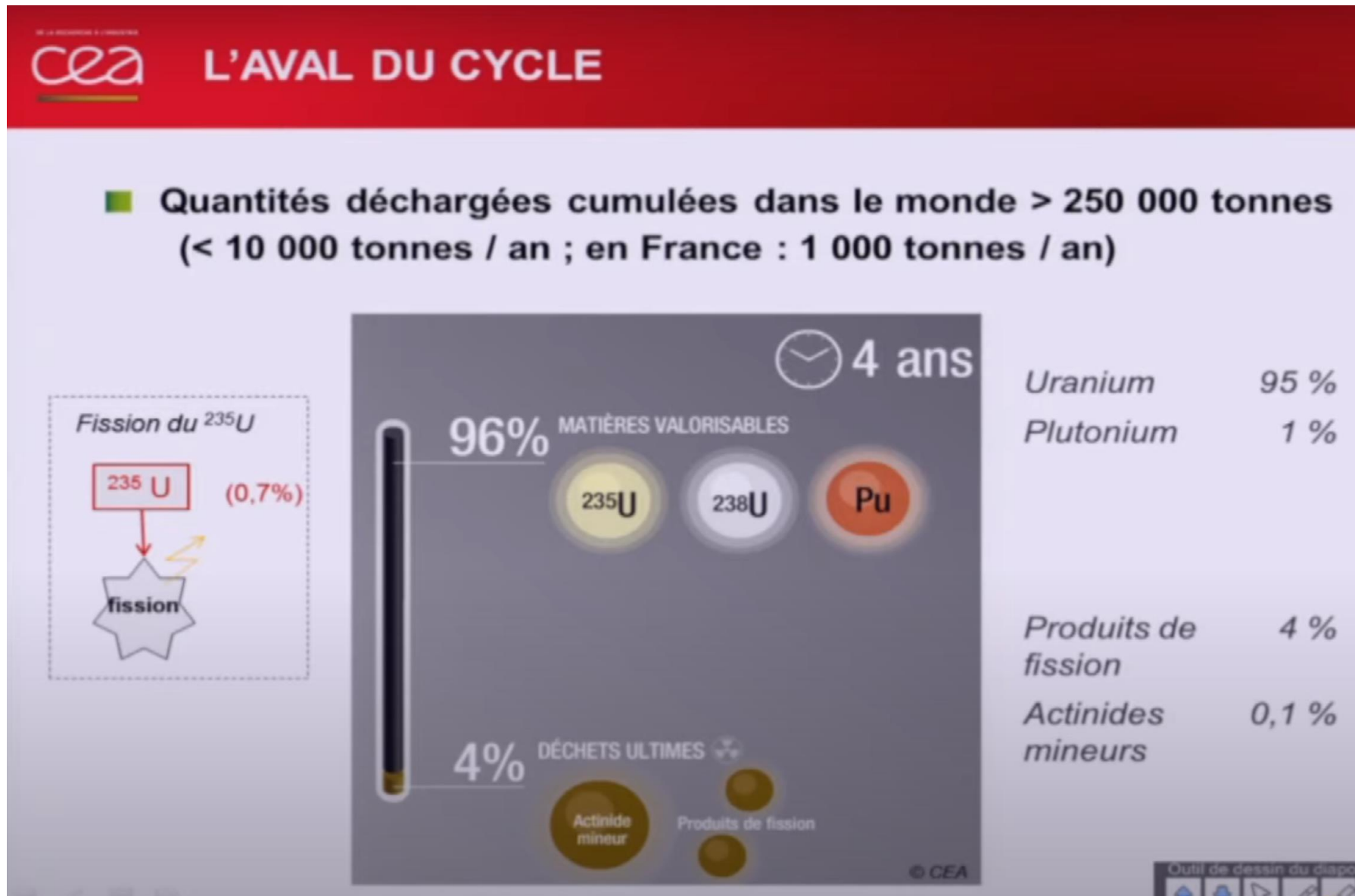
(valeurs pour un flux de neutrons « lents » : $2,2 \text{ km} / \text{s}$)

Noyau	Absorption	Fission	
^1H	0,3	0	Noyaux « légers »
^{10}B	3 844	0	
^{232}Th	7,4	0	Noyaux « lourds » naturels
^{235}U	681	582	
^{238}U	2,7	0,000012	
^{239}Pu	1017	747	Noyau artificiel

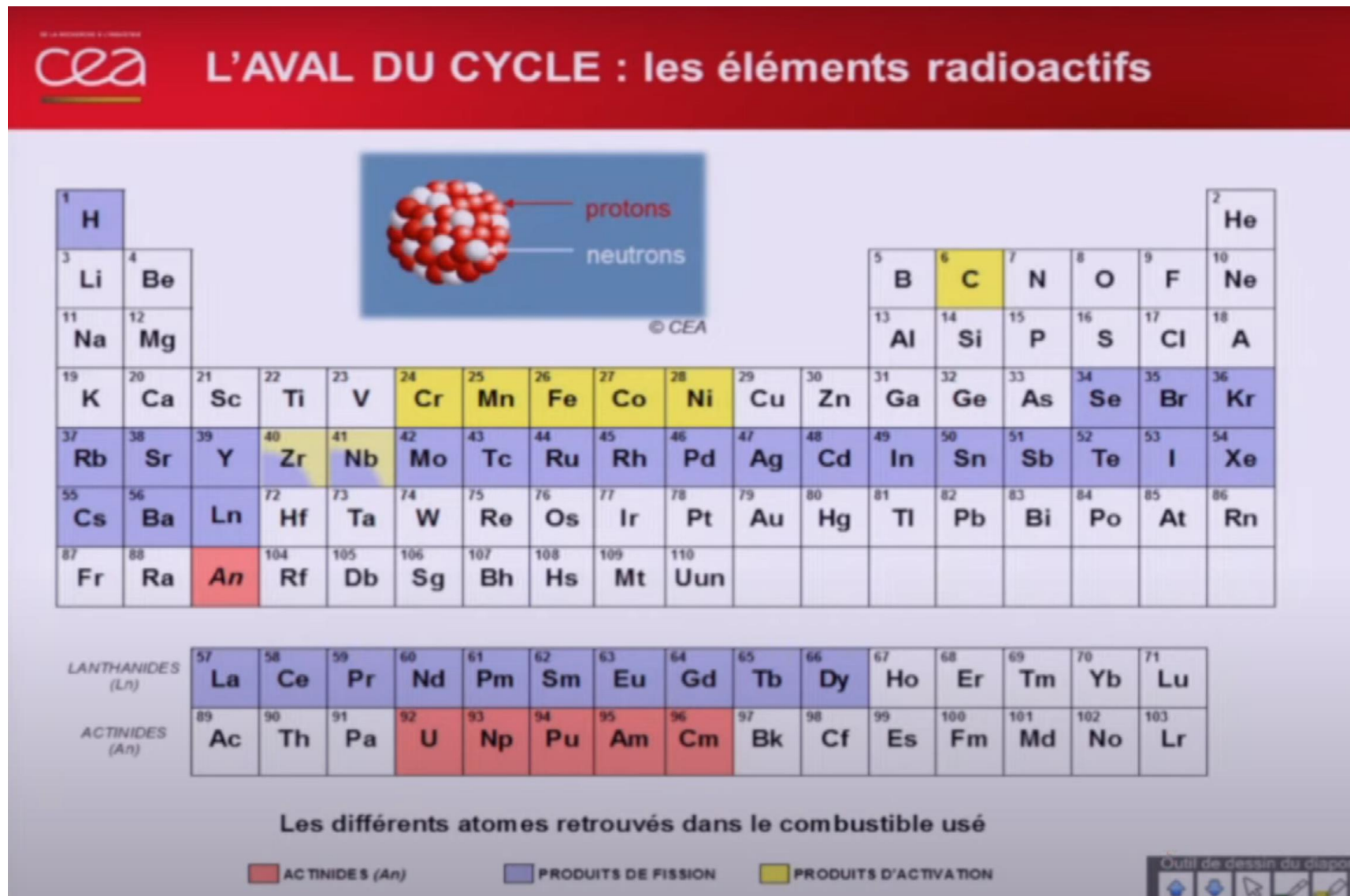
Les bases, qq rappels empruntés: le CYCLE du combust.



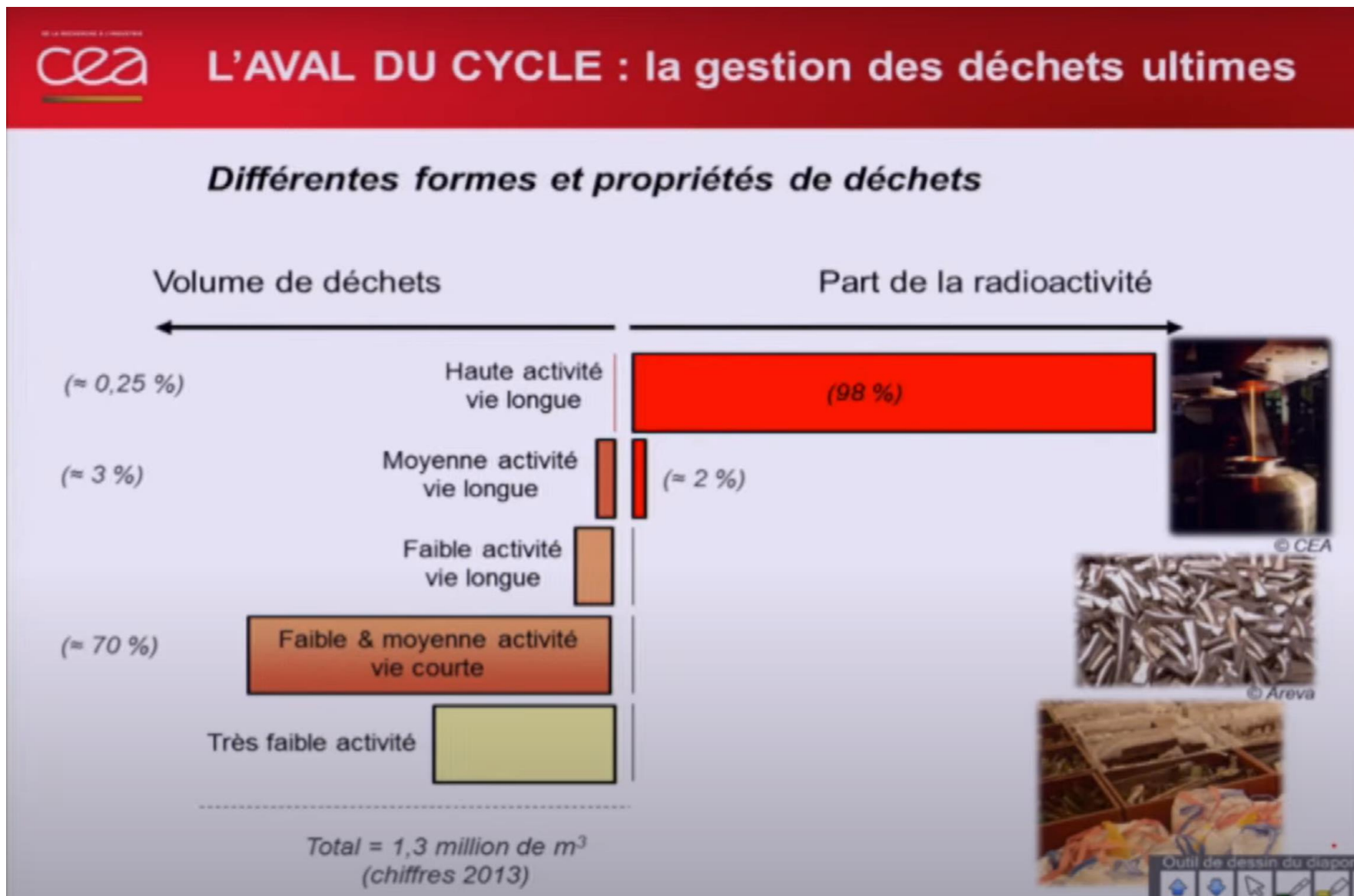
Les bases, qq rappels empruntés: le CYCLE du combust.



Les bases, qq rappels empruntés: le CYCLE du combust.



Les bases, qq rappels empruntés: le CYCLE du combust.



Les bases, qq rappels empruntés: gestion ressources/ cycle fermé

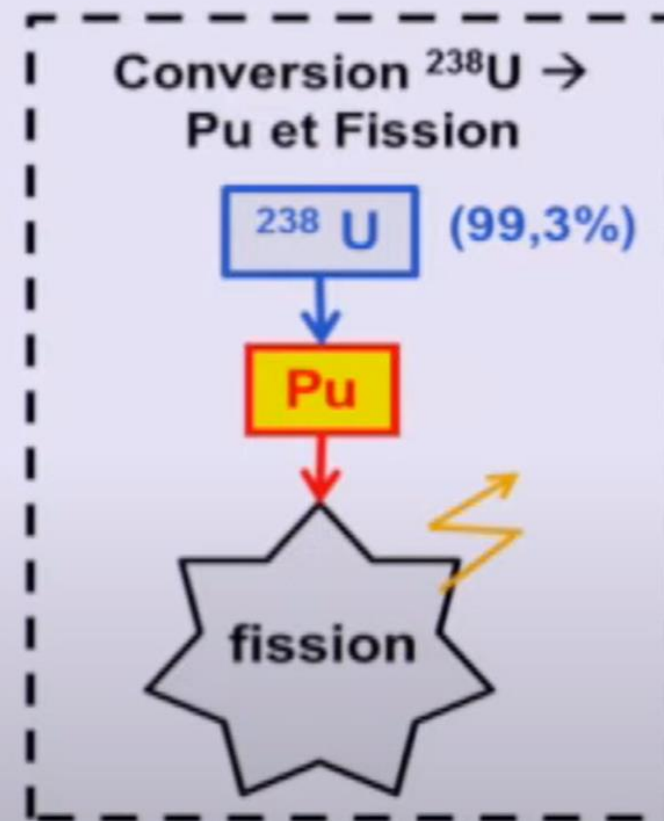
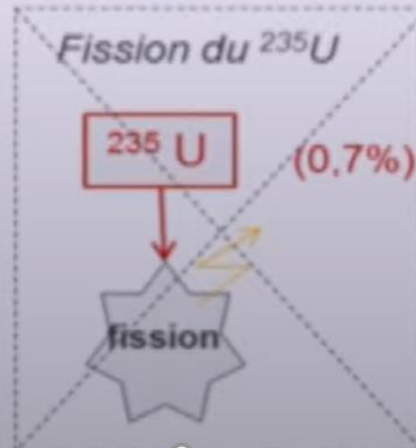
Les réacteurs neutrons rapides

■ Le combustible est **le plutonium**

■ Il est :

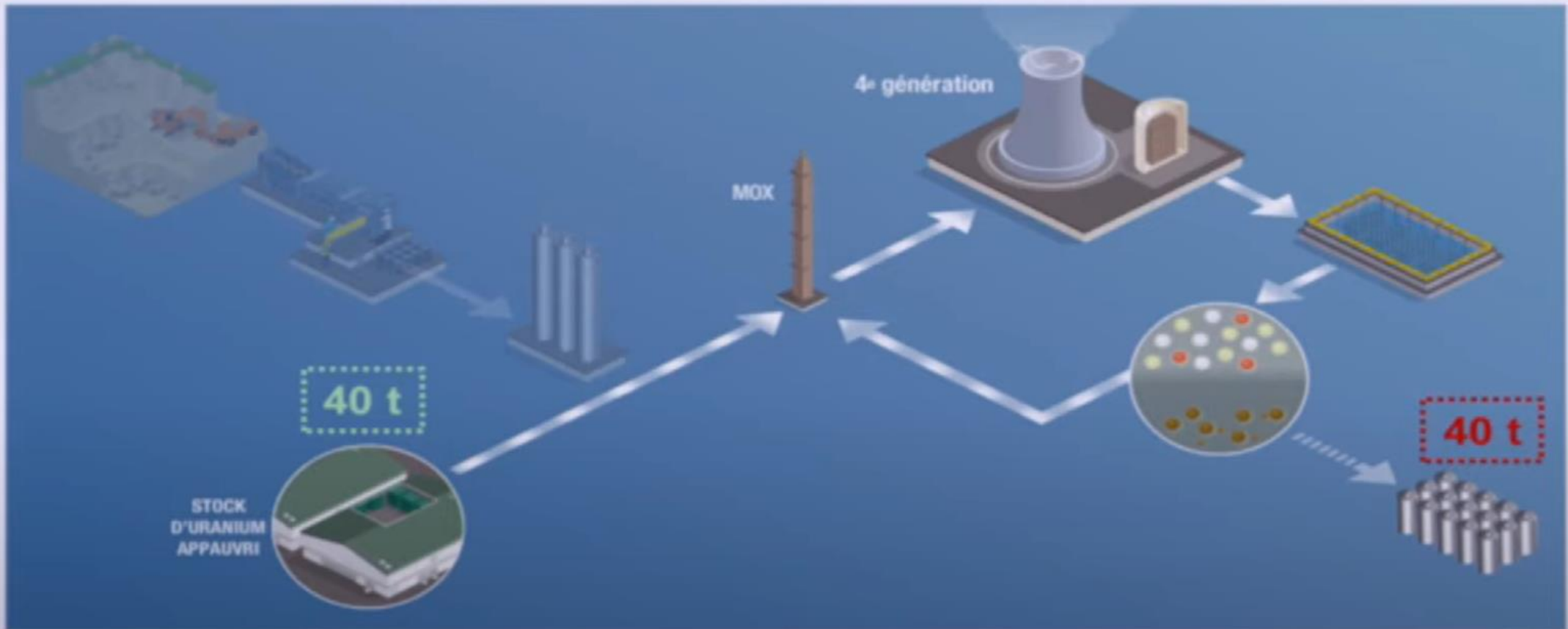
- efficacement formé à partir de ^{238}U
- efficacement fissionné

→ valorisation de plus de 90 % de la ressource en uranium

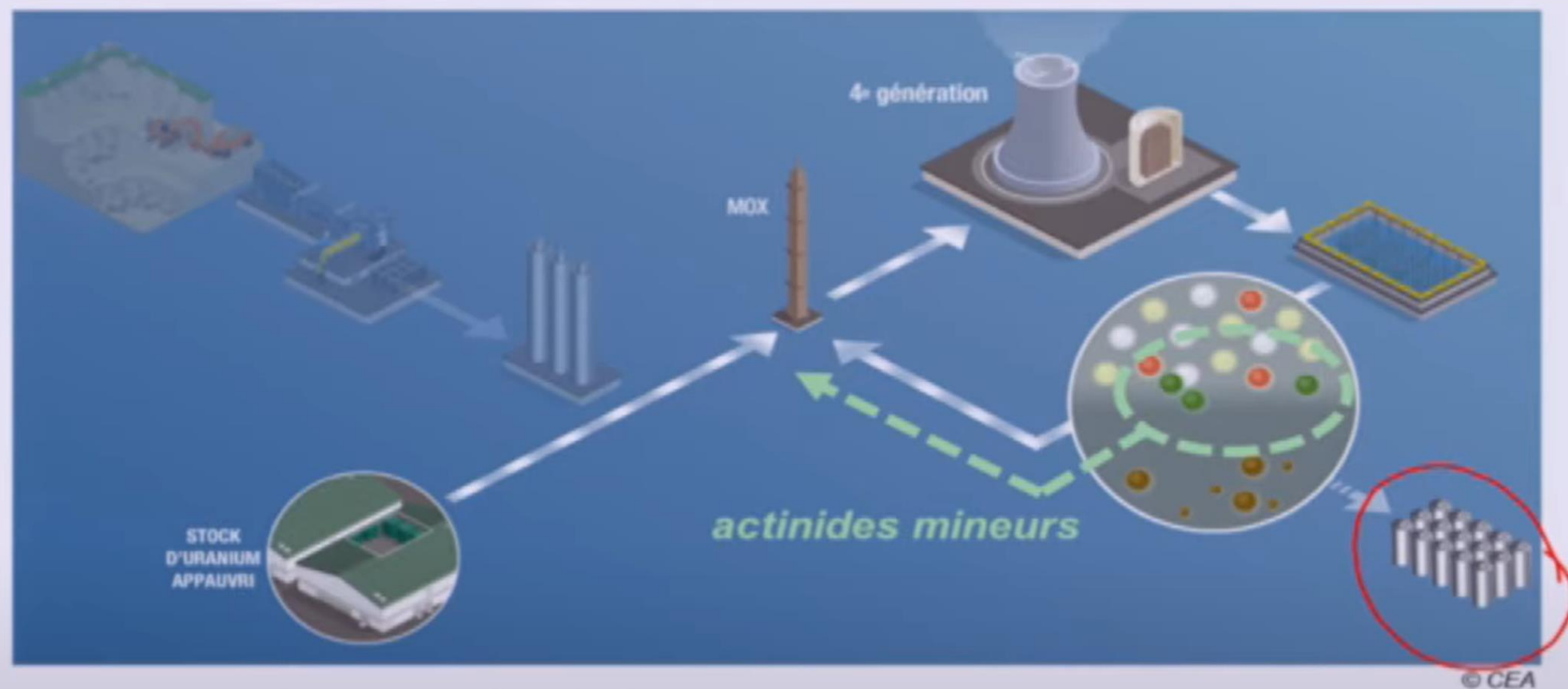


Les bases, qq rappels empruntés: le CYCLE du combust.

Les réacteurs neutrons rapides



- Multirecycler le Pu
- Valoriser le ^{238}U



- Multirecycler le Pu
- Valoriser le ^{238}U
- Recycler (transmuter) les actinides mineurs ?

3 slides empruntées à D. HEUER

- Comment en partant du projet MSBR et en refaisant les calculs ils ont :
 - 1/ Invalidé le MSBR : pas viable industriellement
 - 2/ Abouti « par hasard » au concept MSFR qui « coche toutes les cases »

Tous les paramètres deviennent
Bons lorsqu'on passe en nR – sans graphite mod. !!

Le CNRS et les réacteurs à sels fondus

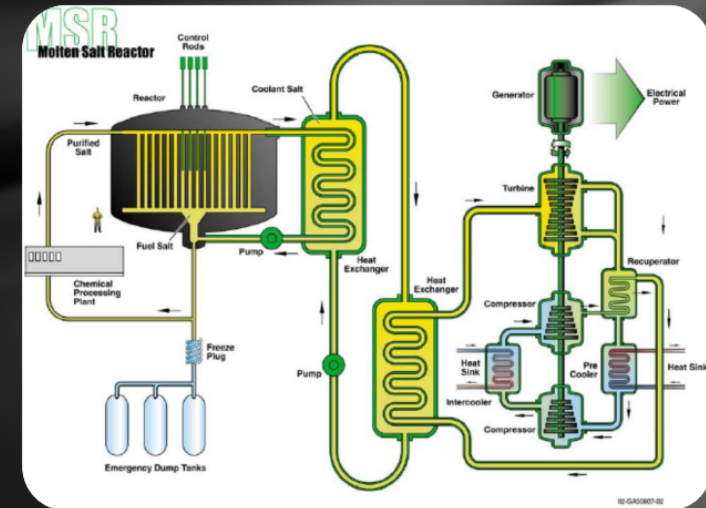
Participation au projet TIER-1 de C. Bowman (1998)

Réévaluation du MSBR de 1999 à 2002

- Réacteur producteur d'énergie en cycle Thorium
 - Utilisation de codes Monte Carlo pour la neutronique (MCNP)
 - Couplage à un code d'évolution des matériaux (REM)
 - Mise en évidence de problèmes inhérents au MSBR
 - Coefficient de contre réaction global nul, voire positif
 - Coefficient de vide positif
 - Retraitement peu réaliste ($4 \text{ m}^3/\text{j}$)
 - Présence de graphite en cœur
 - durée de vie limitée (2 à 5 ans)
 - difficultés de retraitement ou de stockage
 - risques d'incendie

Globalement le MSBR n'a pas les capacités à devenir un réacteur industriel

Les experts avaient conclu que ce réacteur n'était pas pertinent et ils avaient raison !



Les avantages intrinsèques d'un combustible liquide restent pourtant très attrayants

Le cycle thorium et les combustibles liquides

Quelles sont les contraintes sur le type de liquide ?

- Température de fusion pas trop élevée
- Température d'ébullition suffisamment élevée
- Tension de vapeur faible
- Bonnes propriétés thermiques et hydrauliques
- Stabilité du liquide sous irradiation
- Solubilité des éléments fissiles et fertiles suffisante
- Pas de production de radio-isotopes difficilement gérables
- Possibilité d'un retraitement du combustible

Au final seuls les fluorures de Lithium sont possibles

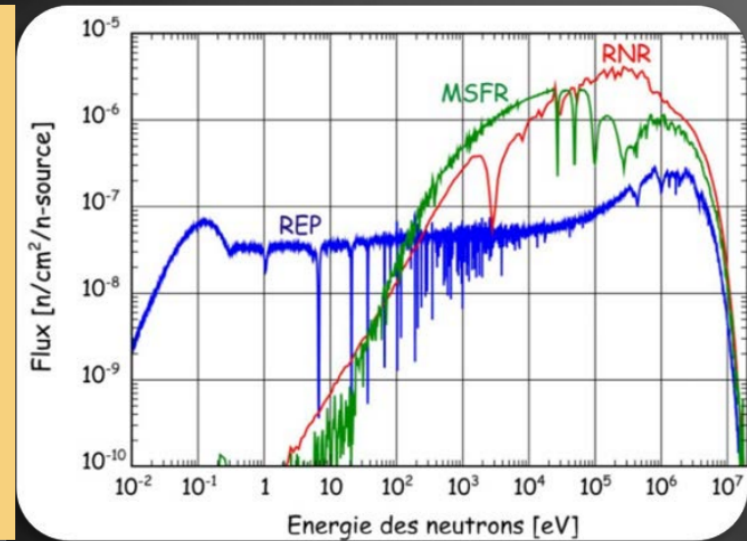
Réacteurs à sels fondus

Les propriétés neutroniques du fluor et la solubilité du Pu dans les fluorures sont défavorables au cycle uranium/plutonium

Cycle Thorium

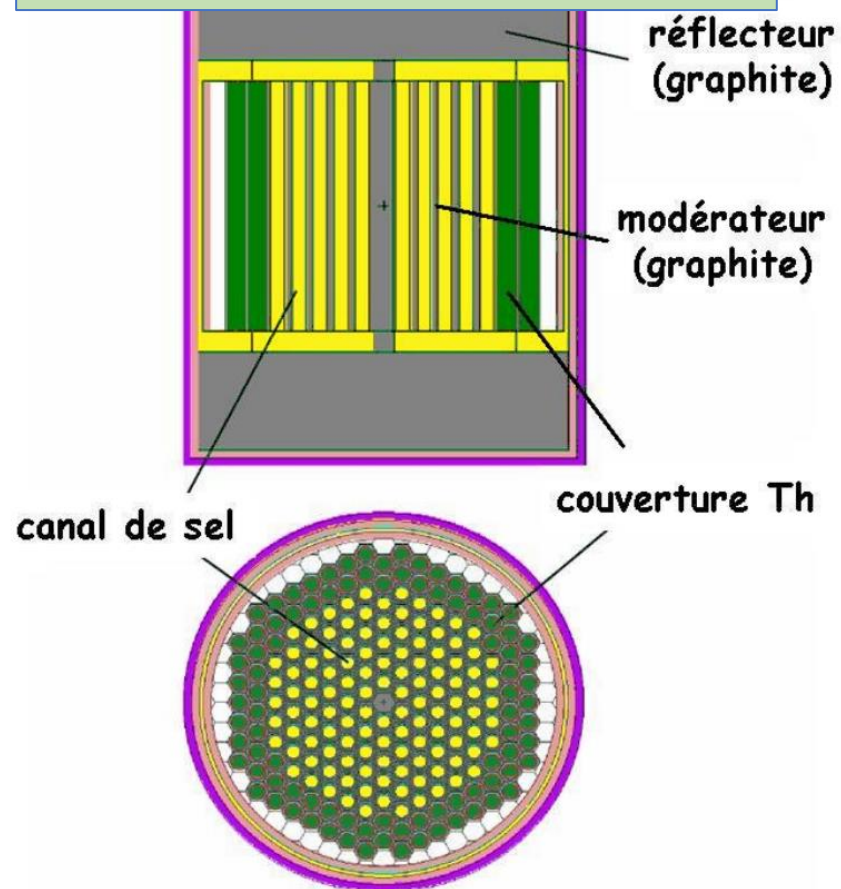
Quels sont les avantages d'un combustible liquide ?

- Homogénéité du combustible (pas de plan de chargement)
- Chaleur produite directement dans le caloporteur
- Possibilité de reconfigurer le cœur en quelques minutes
 - Une première configuration permet d'optimiser la production d'énergie en gérant le risque de criticité
 - Une deuxième configuration permet un stockage avec refroidissement passif
- Possibilité de retraiter le combustible sans arrêter le réacteur
 - Pas de réserve de réactivité
 - Meilleure gestion des produits de fission neutrophages
 - Besoin d'un seul inventaire fissile initial

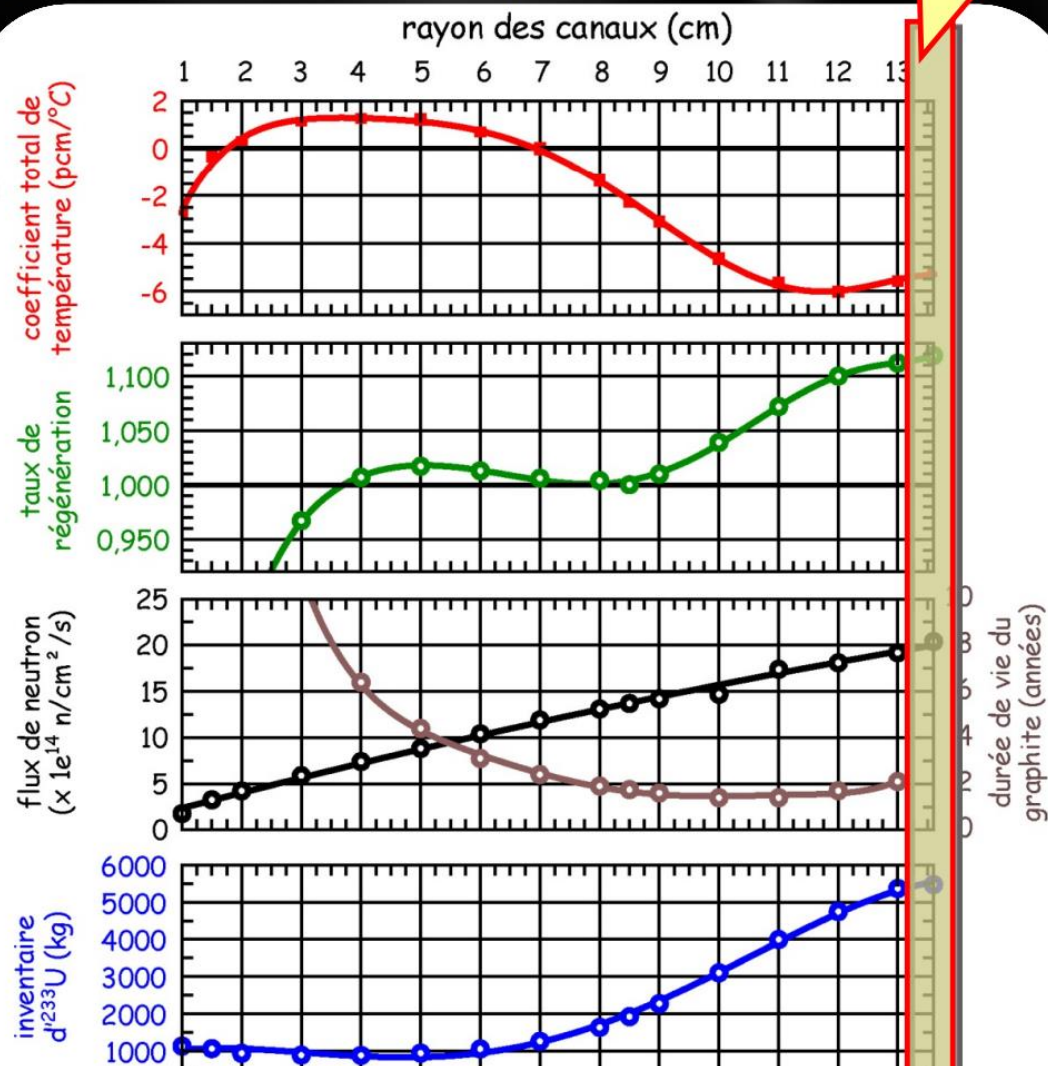


Du MSBR (Molten Salt Breeder Reactor) au MSFR (Molten Salt Fast Reactor)

Tous les paramètres deviennent bons lorsqu'on élargit les canaux et qu'on passe en nR – sans graphite mod. !!



Le MSFR



FIN