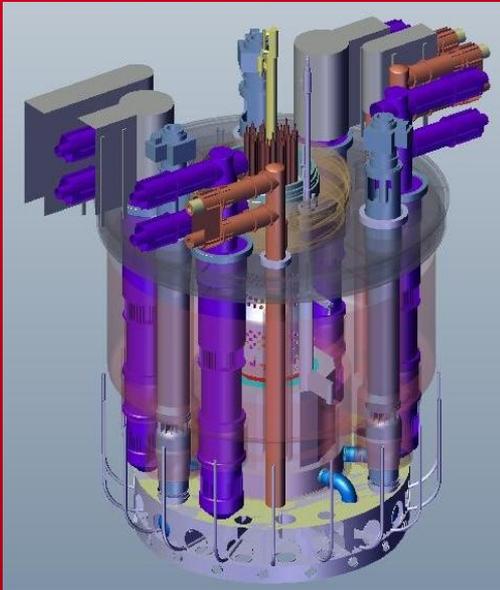


DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



www.cea.fr

Le projet ASTRID

(ADVANCED SODIUM TECHNOLOGICAL
REACTOR FOR INDUSTRIAL
DEMONSTRATION)

Nicolas DEVICTOR

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

Direction de l'énergie nucléaire

Chef de programme « Réacteurs de 4^{ème} génération »

nicolas.devictor@cea.fr

LE CYCLE DU COMBUSTIBLE POUR UNE ÉNERGIE NUCLÉAIRE DURABLE

1980 2000 2020 2040 2060 2080 2100
Dates indicatives

Une durabilité croissante

Gen. II & III *Monorecyclage du Pu*

Monorecyclage du Pu

- cycle à 2 passages
- Réacteurs à eau légère
- Recyclage dans le MOX

Rupture → réacteur
⇒ *Projet ASTRID*

Gen. IV *Multirecyclage du Pu*

Multirecyclage Pu

- plusieurs passages
- Réacteurs à neutrons rapides

Rupture → cycle du combustible

Gen. IV ...+ recyclage des AM

Multirecyclage Pu +
incinération des
actinides mineurs

Principales motivations

- 1^{er} pas pour économiser les ressources U

Principales motivations

- Économie des ressources
- Indépendance énergétique
- Stabilité économique

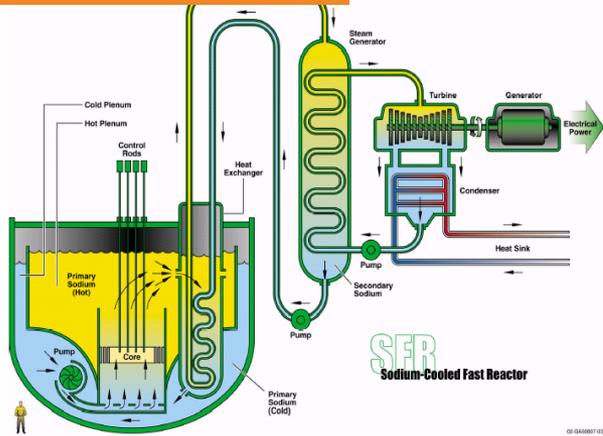
Principales motivations

- Réduction de la quantité de déchets
- Optimisation des stockages
- Acceptabilité par le public

Voir exposé de B. Boullis pour les aspects cycle

LES SYSTÈMES ÉTUDIÉS AU SEIN DU FORUM INTERNATIONAL GÉNÉRATION IV

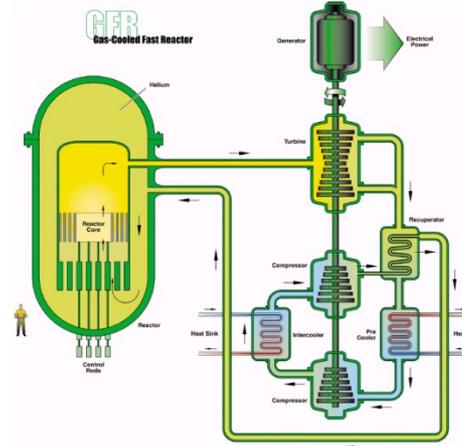
Cycle fermé



SFR

Sodium-cooled fast reactor

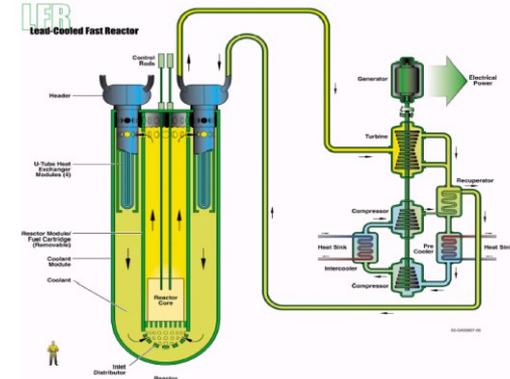
Cycle fermé



GFR

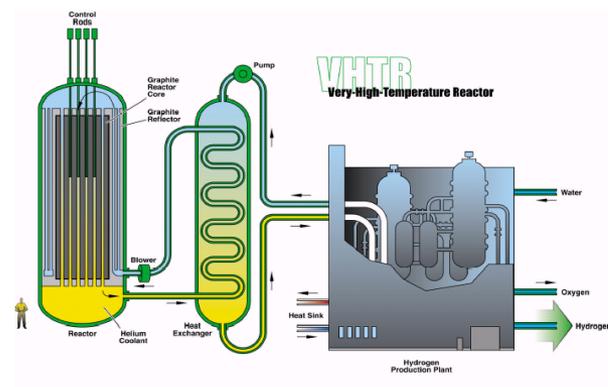
Gas-cooled fast reactor

Cycle fermé



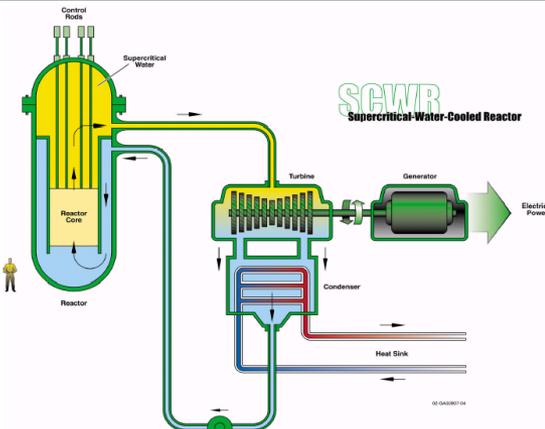
LFR

Lead-cooled fast reactor



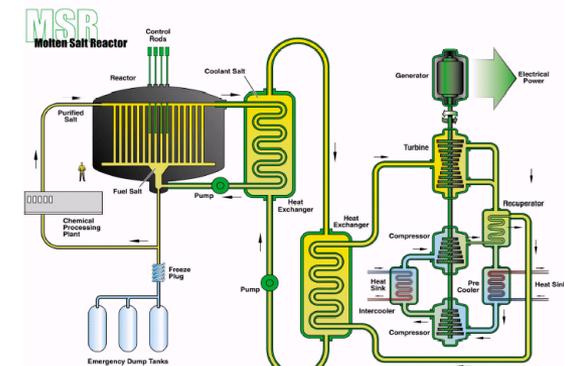
VHTR

Very high temperature reactor



SCWR

Supercritical water-cooled reactor



MSR

Molten salt reactor

Cycle ouvert

Cycle ouvert

Cycle fermé

Groupe Permanent concernant les filières de Génération IV (10/04/2014) et rapport IRSN publié en 2015

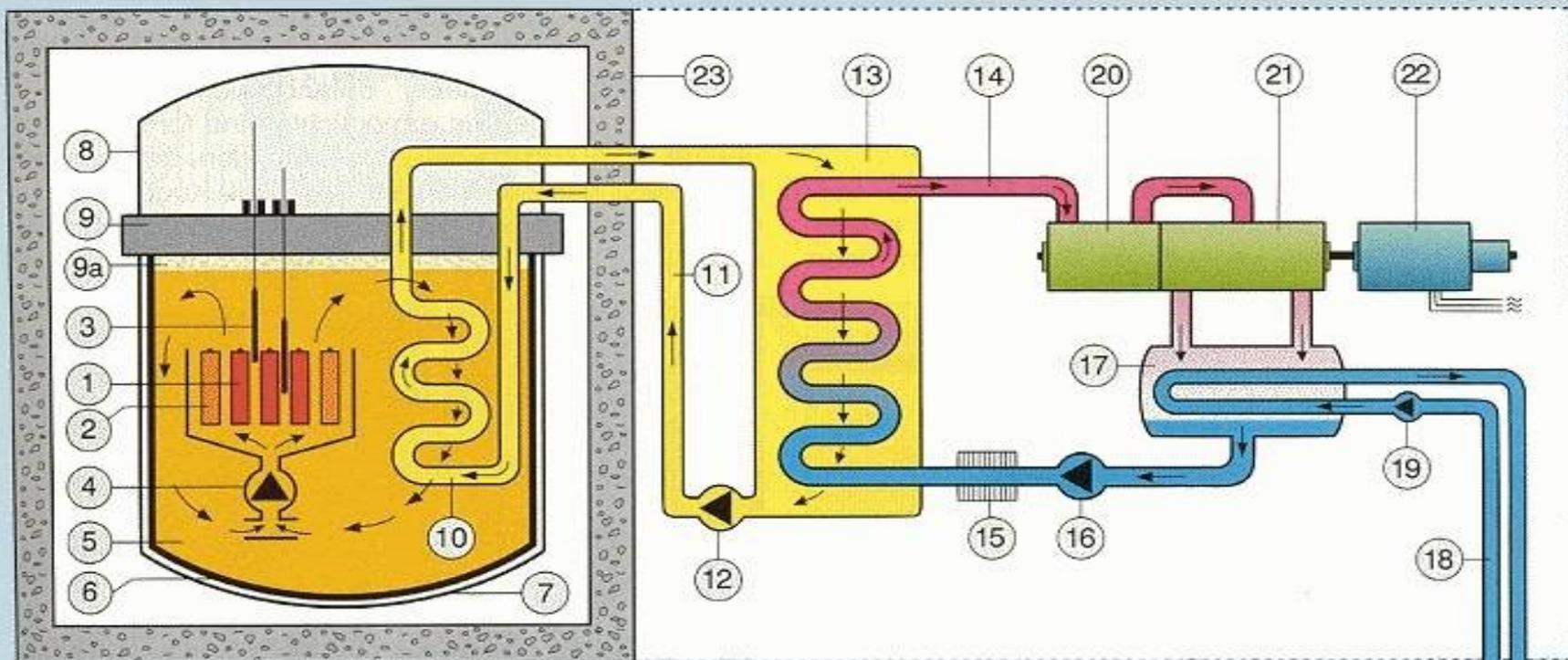
■ 6 Systèmes analysés

■ Conclusions principales concernant les SFR :

- « Seul système présentant une maturité suffisante pour la réalisation d'un prototype dans la première moitié du XXIème siècle »
- « Au vu des éléments présentés, ce réacteur pourrait présenter un niveau de sûreté au moins équivalent à celui des systèmes de à eau sous pression de type EPR »

Même si le CEA porte ses efforts majoritairement sur le développement des RNR-Na via le programme ASTRID, le CEA mène une veille sur l'ensemble des systèmes de 4^{ème} génération principalement au travers de contributions au Forum GenIV et à des projets européens.

SCHÉMA DE PRINCIPE D'UN RNR-NA (ARCHITECTURE DE TYPE « INTÉGRÉE »)



- 1 - élément combustible fissile
- 2 - élément combustible fertile
- 3 - barre de contrôle
- 4 - pompe de circulation du sodium
- 6 - cuve du réacteur (acier inoxydable)
- 7 - cuve de sécurité
- 8 - enceinte de confinement
- 9 - couvercle
- 9a - Atmosphère de gaz de protection (Argon)
- 10 - échangeur de chaleur intermédiaire (1 parmi 4)
- 11 - circuit de sodium secondaire
- 12 - pompe de circulation du sodium secondaire

- 13 - Générateur de vapeur (1 parmi 4)
- 14 - vapeur
- 15 - pré-réchauffeur
- 16 - pompe à eau d'alimentation
- 17 - condenseur
- 18 - eau de refroidissement (fleuve)
- 19 - pompe à eau froide
- 20 - turbine haute pression
- 21 - turbine basse pression
- 22 - génératrice
- 23 - bâtiment réacteur

CARACTÉRISTIQUES FAVORABLES (ET MÉCONNUES) DES RNR REFROIDIS AU SODIUM (RNR-Na)

- **Le circuit primaire est entièrement contenu dans la cuve principale (cœur, pompes primaires, échangeurs intermédiaires).**
- **Le circuit primaire n'est pas pressurisé.**
- **La marge à l'ébullition est grande (typiquement 300K).**
- **La grande quantité de sodium primaire donne au réacteur une inertie thermique très grande qui, combinée à la grande marge à l'ébullition, augmente le « délai de grâce » en cas de perte de refroidissement.**
- **L'architecture du RNR-Na permet une bonne mise en route de la circulation naturelle.**
- **On peut ainsi concevoir des systèmes d'évacuation de la puissance résiduelle, actifs ou passifs, déjà testés par le passé. L'atmosphère est utilisée comme source froide de secours.**
- **La dose collective aux travailleurs est très basse comparée à d'autres types de réacteurs.**

ASTRID

(ADVANCED SODIUM TECHNOLOGICAL REACTOR FOR INDUSTRIAL DEMONSTRATION)

*ASTRID est un démonstrateur technologique,
et n'est pas la tête de série d'une filière commerciale.*

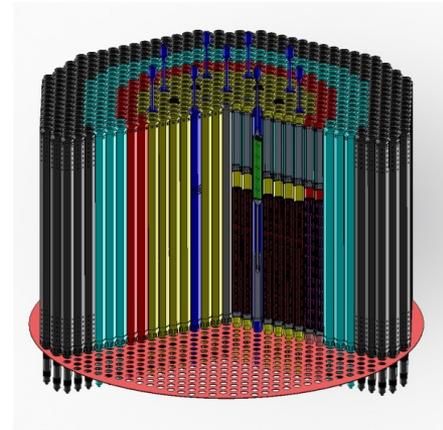
Dans la continuité de l'acquis des RNR-Na exploités par le passé, ASTRID a pour rôle de démontrer à l'échelle industrielle le bien-fondé des options innovantes dans les domaines de progrès identifiés, notamment la sûreté et l'opérabilité.

ASTRID et les installations de R&D en soutien pourront :

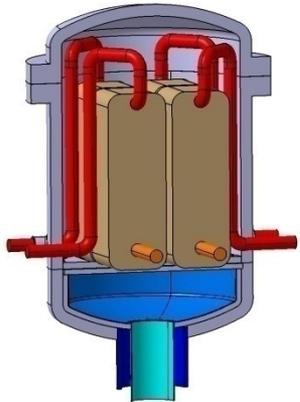
- tester et qualifier des options de sûreté innovantes en vue de la filière
- qualifier différents combustibles (incinérateurs de plutonium, transmutation, ...)
- acquérir les données nécessaires à un fonctionnement à 60 ans des futurs RNR-Na
- confirmer les performances de composants innovants d'ASTRID en vue d'optimiser la conception des réacteurs commerciaux au plan technico-économique
- constituer une référence pour l'évaluation des coûts de la filière (construction et exploitation)

QUELQUES INNOVATIONS DU PROJET ASTRID EN RÉPONSE AU RETOUR D'EXPÉRIENCE

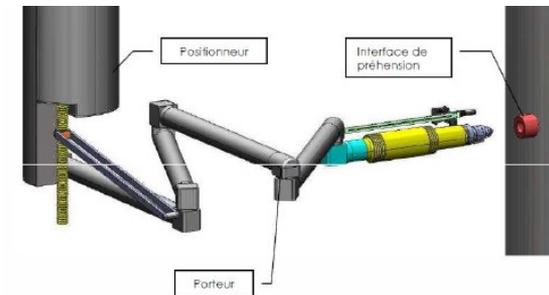
Cœur à sûreté améliorée (« Cœur à Faible Vidange »), en rupture par rapport au passé,



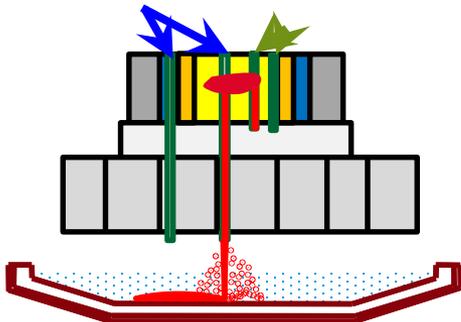
Circuit tertiaire en azote, pour éliminer le risque de réaction sodium-eau



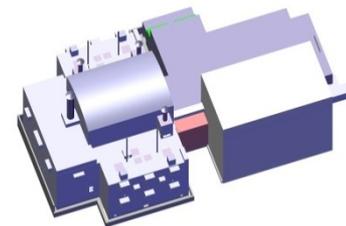
L'inspection en service prévue dès la conception



Pas de rejets précoces ou importants en cas d'accident grave

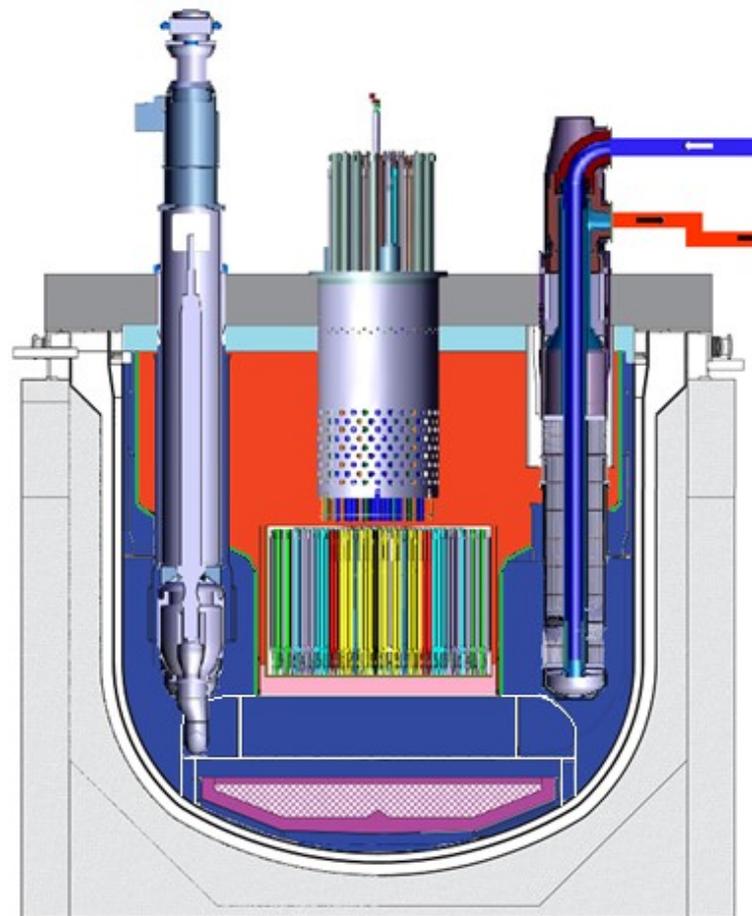
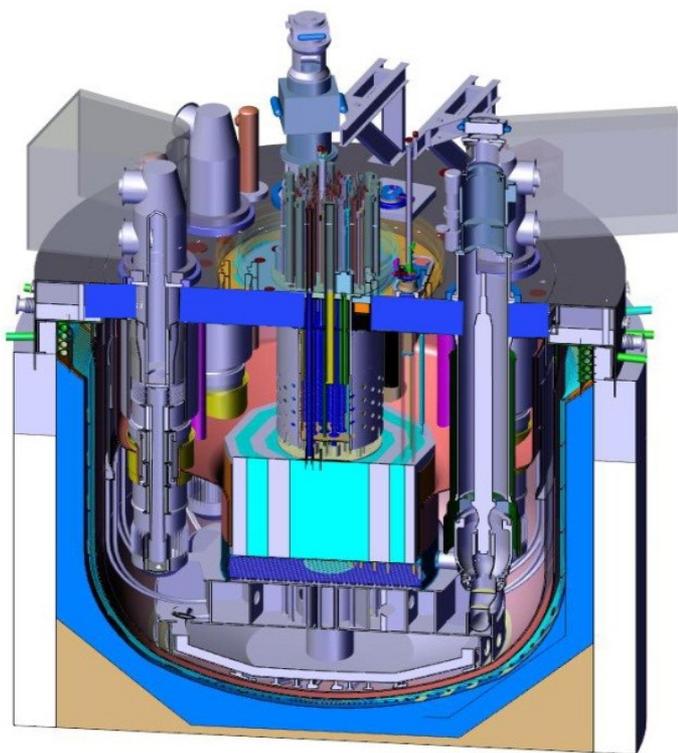


Confinement renforcé

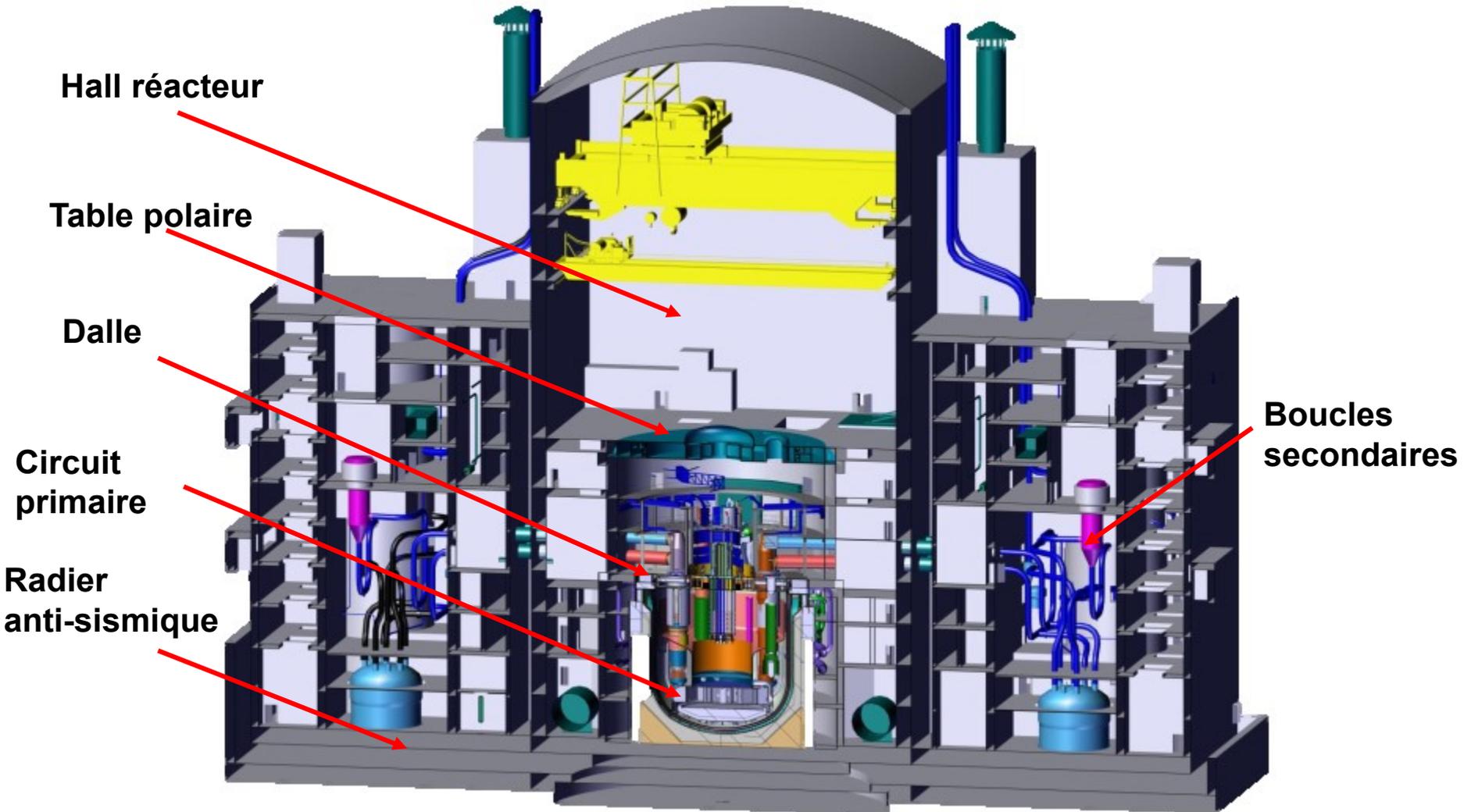


QUELQUES IMAGES D'ASTRID

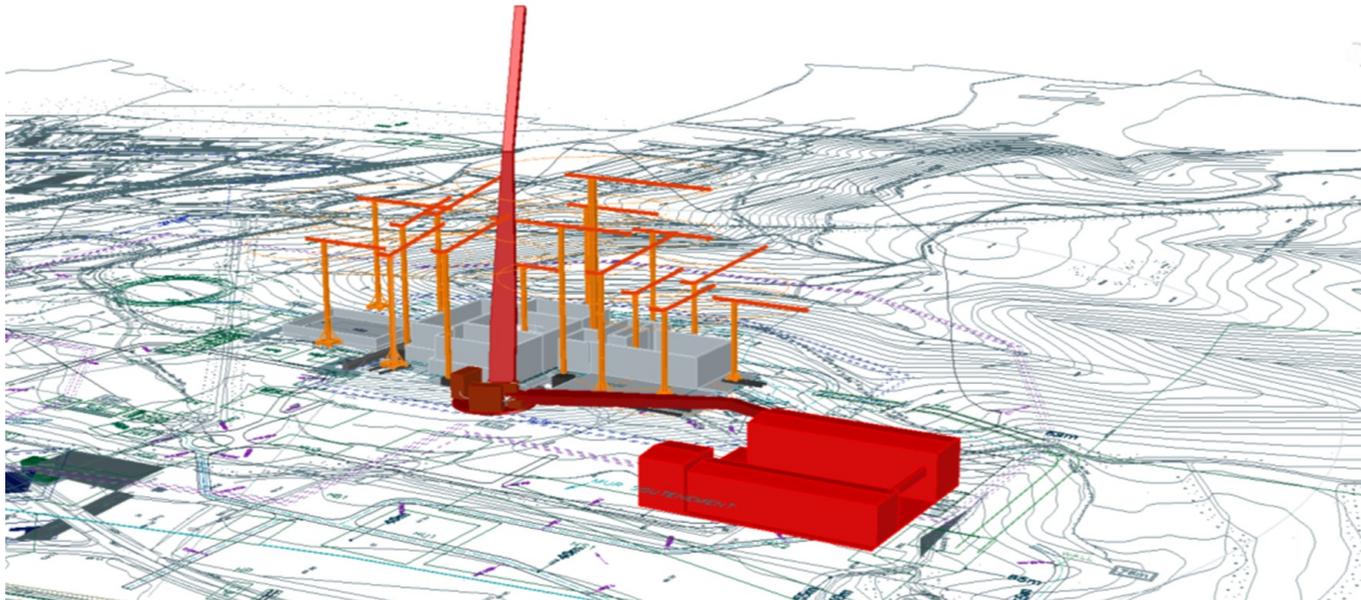
- Chaudière nucléaire de type intégrée
- 1500 MWth - ~600 MWe
- Coeur CFV (Faible Vidange) avec du MOX
- Récupérateur interne
- Systèmes diversifiés d'évacuation de la puissance résiduelle



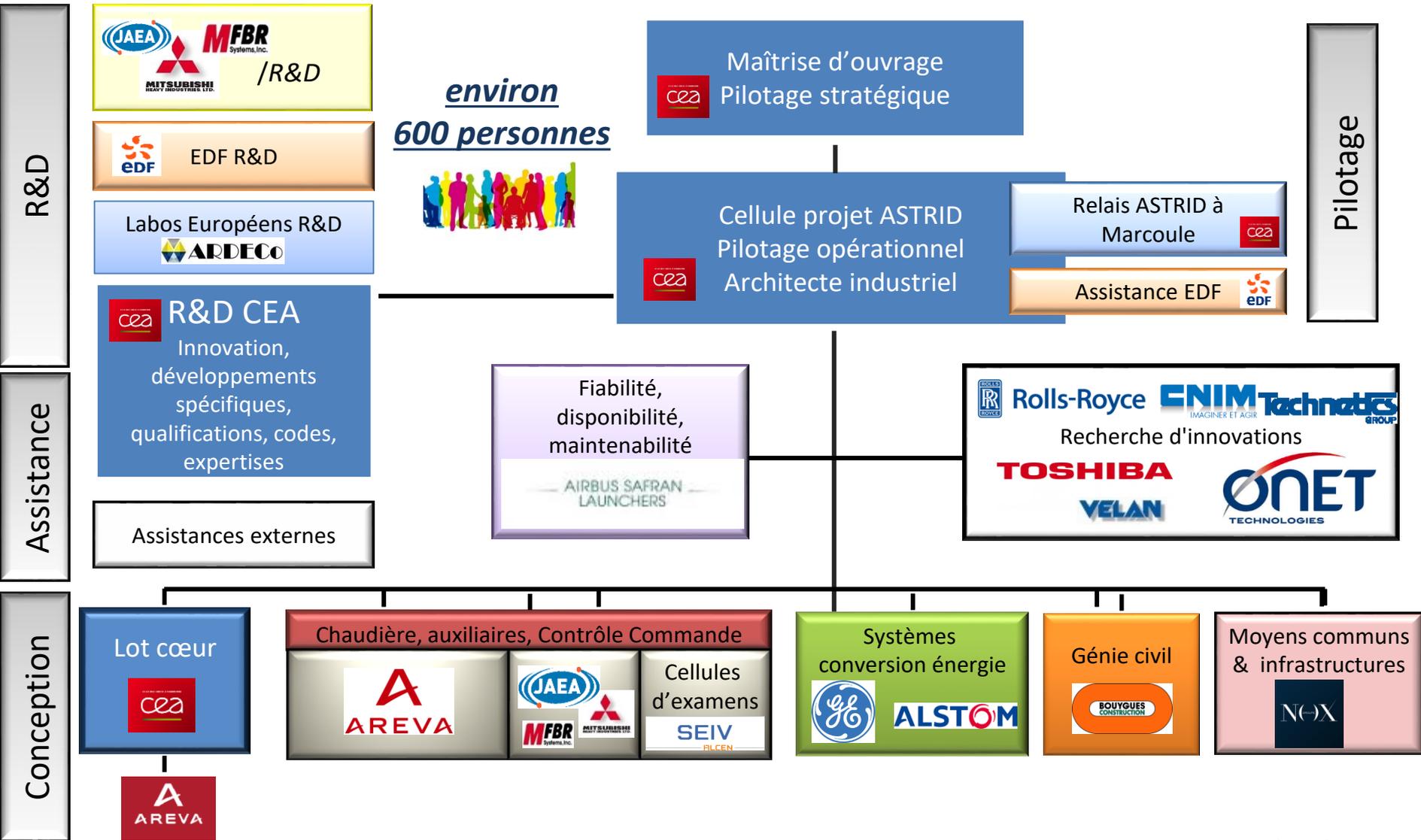
BÂTIMENT RÉACTEUR (OPTION SYSTÈME DE CONVERSION D'ÉNERGIE EAU VAPEUR)



INTÉGRATION SUR LE SITE



ORGANISATION DU PROJET ASTRID



PARTENARIATS AUTOUR D'ASTRID – 3 PILIERS



Pilotage par le CEA



ARDECO
EDF R&D, PSI,
Suède (KTH, Chalmers, Uppsala), HZDR,
KIT, ENEA, JRC/ITU, NNL, CIEMAT, ...

CNRS (NEEDS), universités (thèses)

AIRBUS SAFRAN LAUNCHERS



Rolls-Royce



COOPÉRATIONS EN LIEN AVEC LES PROJETS DE RNR-Na DANS LE MONDE

France : **ASTRID**

600 Mwe

Combustible
MOX-RNR



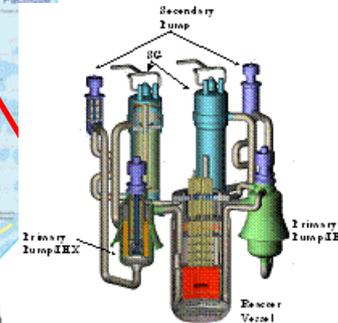
Russie : **BN-800, MBIR, BN 1200**

Comb. UOX,
MOX-RNR,
Nitrure



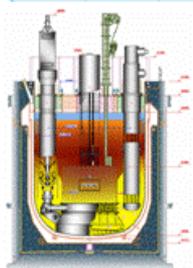
Chine : **CEFR, CFR600, CCFR1000**

Combustible MOX-RNR



Japon : **prototype JSFR (stand-by)**

Combustible MOX-RNR



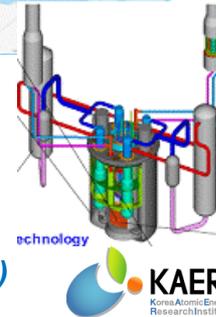
Inde : **PFBR, 2x FBR (500 MWe), MFDR, MFBR**

Combustible MOX, Métal

Corée du Sud :

PGSFR (150MWe, 2028)

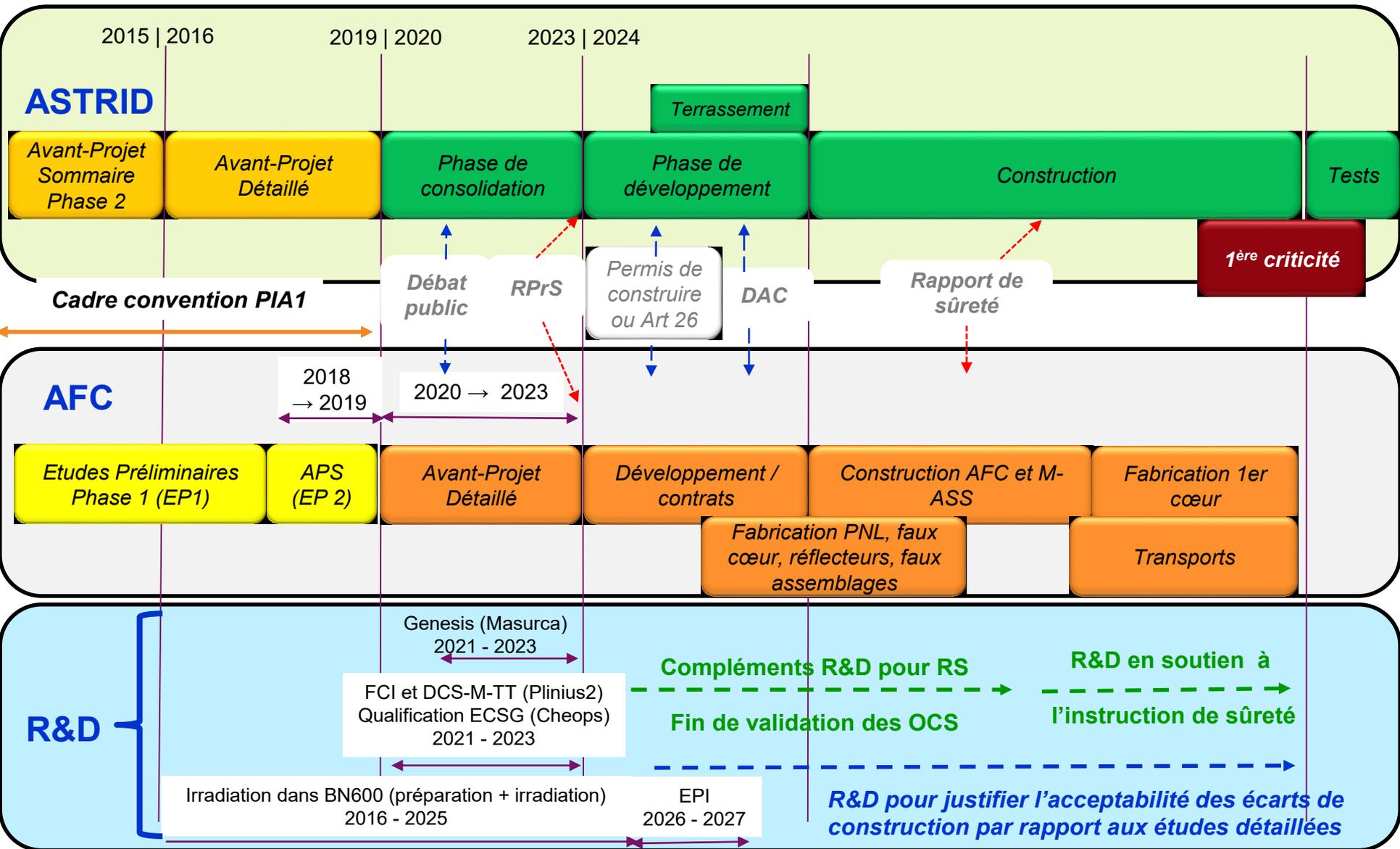
Combustible Métal



USA : designs de SMR, Terrapower ...

Mais pas de réalisation envisagée aux USA (MTR ?)

PLANNING DU PROJET ASTRID



BESOIN D'INSTALLATIONS EXPÉRIMENTALES POUR LA QUALIFICATION

PAPIRUS:

Installations en sodium de
taille moyenne (jusqu'à 3
m³ de sodium)

Opérationnel

CHEOPS:

Installation en sodium pour
la qualification à échelle
significative

Études de conception

GISEH:

Installations en simulant

Opérationnel

Masurca:

Maquette critique

En rénovation

PLINIUS-2:

Études du comportement du
corium

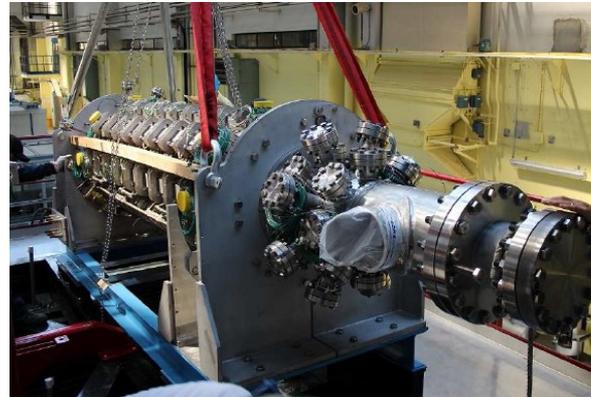
APD (bâtiment, four)

BESOIN D'INSTALLATIONS EXPÉRIMENTALES POUR LA QUALIFICATION

PAPIRUS

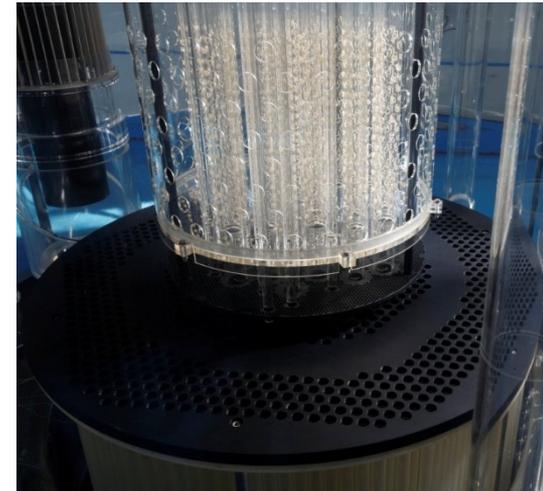
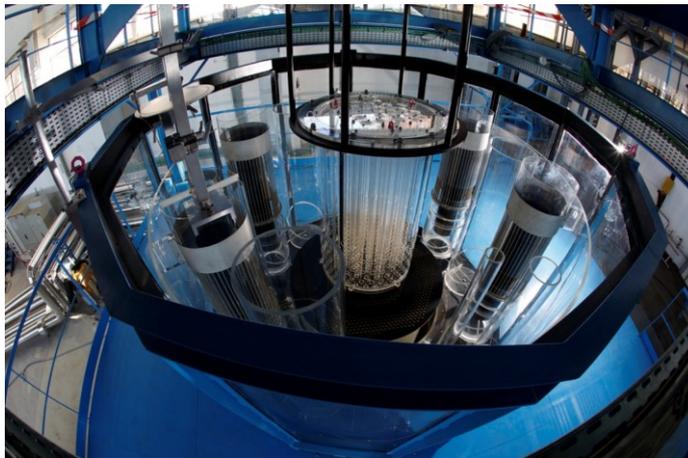


← **DIADEMO** (maquette module d'échange sodium-gaz)



← **PEMDYN**
(Electro-magnetic
Pump)

GISEH



MICAS : maquette du collecteur chaud à l'échelle 1/6ème sur 360°

Synthèses des travaux APS et APD

Dossier 2012

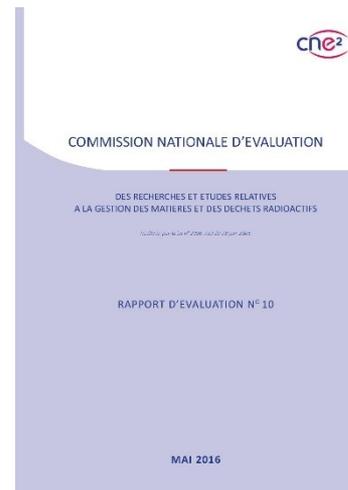


Mise à jour de juin 2015



www.cea.fr

Rapports annuels de la
Commission Nationale d'Evaluation n°2
(www.cne2.fr)
pour le compte de l'OPECST (Parlement)



CONCLUSION

- L'énergie nucléaire est en 2016 une énergie reconnue pour produire massivement de l'électricité sans émission de gaz à effet de serre. Il reste un des piliers de la production d'électricité nucléaire en France, confirmé par la loi sur la transition énergétique.
- Le programme ASTRID est une des composantes du programme français sur la 4ème génération :
 - Accord entre le CEA et l'Etat pour des études de conception jusqu'à un niveau de définition (Basic design) (2016-2019).
 - Fin 2015, autorisation de passer en phase d'APD
 - Qualité des travaux de l'APS reconnue
 - Préparation en cours des phases post-2019.



Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Cadarache | 13108 Saint Paul Lez Durance
T. +33 (0)4 42 25 45 93

Nuclear Energy Division
Reactor Studies Department

Etablissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019

- **VHTR et SCWR ne sont pas des concepts à neutrons rapides : ils ne permettent pas une gestion optimisée des matières (uranium, plutonium, actinides mineurs).**

- **Le MSR en version à neutrons rapides, souvent associé à un cycle du thorium, nécessite un programme de R&D important pour apporter des réponses à des sujets importants pour la sûreté et l'opérabilité :**
 - Pas de première barrière sous forme de gaine de combustible
 - Corrosion des matériaux, tenue sous irradiation des structures
 - Maintenabilité, inspectabilité, réparabilité : comment s'occuper du circuit primaire du réacteur en présence de sels fondus d'uranium, de plutonium, d'actinides mineurs et de produits de fission ?
 - Radioprotection, déchets, démantèlement ?
 - Cycle du thorium : investissements nécessaires importants pour amener à une étape industriels

- **Le RNR-Na (SFR) est la filière la mieux connue. Ses inconvénients sont identifiés et il est possible d'y remédier. L'exploitation industrielle est déjà acquise, l'enjeu est de passer aux critères de 4^{ème} génération, ce qui est atteignable.**
- **Le RNR-Gaz (GFR) est une technologie intéressante car tirant l'innovation. Ses points faibles qui orientent la R&D sont le combustible réfractaire et la démarche de sûreté en cas de dépressurisation.**
- **Le RNR-Plomb (LFR) présente un bilan avantages/inconvénients moins bon que le SFR :**
 - Corrosion des matériaux
 - Radioprotection en raison du Polonium-210 dans le cas du Pb-Bi
 - Haute température d' « arrêt à froid » : 400°C : difficultés pour maintenabilité, inspectabilité, réparabilité
 - Densité du plomb : effort de pompage, tenue au séisme
 - Nécessité de maintenir un circuit intermédiaire en raison du risque d'explosion de vapeur dans le circuit primaire
 - Coefficient de vidange du caloporteur fortement positif pour les gros cœurs