

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



TENDANCES DE LA R&D NUCLÉAIRE DU CEA DANS LES 10 PROCHAINES ANNÉES

Gilles BORDIER
CEA/DEN/DS

SFEN Lyon - 19 juin 2019

www.cea.fr



CONTEXTE

Contexte stratégique des programmes de R&D nucléaire au CEA

- **Une réflexion menée entre Industriels et Etat** et traduite dans la **Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE)** et dans le **Contrat Stratégique de Filière Nucléaire (CSFN)**
- **Un constat d'éloignement dans le temps de la perspective de déploiement de RNR industriels. Maintenir les compétences et garder l'option ouverte.**
- **L'affirmation de la fermeture du cycle** (recyclage complet des matières valorisables) comme un objectif de soutenabilité à long terme, **cible qui est maintenue.**
- **Enjeux pour atteindre le recyclage complet sur le long terme :**
 - Nécessité de recourir aux RNR
 - Filière RNR sodium la plus mature à consolider, mais intérêt d'évaluer d'autres technologies.
- **Enjeux à plus court terme :**
 - Multi-recyclage en REP comme étape intermédiaire possible ou si besoin de réduire des stocks de matière (2045).
 - Diminution du flux d'UOx dans les usines (2035) avec la fermeture de tranches 900 MW et MOXage des tranches 1300 MWe



STRATÉGIE FRANÇAISE POUR
L'ÉNERGIE ET LE CLIMAT

PROGRAMMATION
PLURIANNUELLE DE L'ÉNERGIE

2019-2023

2024-2028

Principales mesures :

- **50 % de nucléaire au sein du mix électrique à l'horizon 2035.**
- Fermeture de **14 réacteurs nucléaires de 900MWe**, dont les deux réacteurs de Fessenheim.
- Calendrier fermeture des centrales à l'échéance de la **5^e visite décennale des réacteurs concernés** (*exception : 2 réacteurs fermeront dans la 2^e de la PPE en 2027 et en 2028, sous réserve du respect du critère de sécurité d'approvisionnement*).
- Si certaines conditions relatives au prix de l'électricité et à l'évolution du marché de l'électricité à l'échelle européenne sont remplies, la **fermeture de deux réacteurs additionnels** pourra intervenir à l'horizon 2025-2026, sur la base d'une **décision à prendre en 2023**.
- **Sites faisant prioritairement l'objet de fermetures identifiés par le Gouvernement** sur la base de la programmation transmise par EDF. Sauf exceptions, la décroissance du parc nucléaire ne devra conduire à l'arrêt complet d'aucun site nucléaire.
- **Stratégie de traitement-recyclage du combustible nucléaire préservée sur la période de la PPE** et au-delà, jusqu'à l'horizon 2040 → **Moxage de certains réacteurs 1300 MWe** + études pour déploiement du **multi-recyclage** des combustibles dans les réacteurs du parc actuel.

Axe 1 : Emploi, compétences et formation

Axe 2 : Transformation numérique

L'objectif poursuivi est de structurer, grâce au numérique, la supply chain et la démarche d'innovation au sein de la filière nucléaire.

Axe 3 : Transformation écologique, R&D et outils du futur

- Promouvoir une économie circulaire au sein de la filière.

Le recyclage des combustibles usés est un élément majeur de la stratégie de la filière nucléaire française.

- Définir les réacteurs et outils du futur.

Il faut concevoir l'« Usine Nucléaire du Futur » avec EDF, CEA et Framatome et développer un modèle de SMR de technologie française en engageant en 2019 la phase d'avant-projet sommaire du réacteur.

Axe 4 : L'international



Contrat stratégique de la Filière Nucléaire

2019-2022



Moyen terme :

- **Recyclage du plutonium en REP via des combustibles de type MOX 2** contenant à la fois des crayons recyclant du Pu et des crayons à l'uranium enrichi (CORAIL) ou des crayons contenant les 2 (MIX)
- Un plan d'action devra être mis en œuvre avec pour objectif l'introduction d'un assemblage test en réacteur à l'horizon 2025.



Court terme :

- Garantir une cadence de fabrication en adéquation avec les besoins du parc
- Résoudre les écarts techniques résiduels du combustible MOX
- **Préparer le Moxage d'une partie du parc 1300 MWe**

Long terme :

- **Dérouler un programme de R&D sur la fermeture du cycle de génération IV** au moyen de réacteurs RNR au sodium et d'usines du cycle correspondantes.
- **Capitaliser sur les avancées sur les réacteurs à neutrons rapides**
- **un volet simulation** utilisant les nouveaux savoir-faire en matière digitale (**jumeau numérique**)
- **un volet expérimental**

Vers une fermeture du cycle en multirecyclant les matières fissiles

Les grands objectifs :

- 1) Utiliser au mieux le potentiel énergétique de l'uranium (y compris l'U appauvri) et économiser l'uranium
- 2) Optimiser la production de déchets de haute activité et les confiner (volume, emprise au stockage)
- 3) Valoriser les matières des combustibles UNE (UOx) usés en ne leur donnant pas un statut de déchets
- 4) Stabiliser le stock d'UOX usé
- 5) Stabiliser le stock de MOX usé et de plutonium
- 6) Limiter l'entreposage et bien s'interfacer avec les exigences du stockage
- 7) S'affranchir à terme d'apport d'uranium de la mine et consommer l'U appauvri : vers l'autonomie énergétique
- 8) Diminuer la production d'actinides mineurs à vie longues

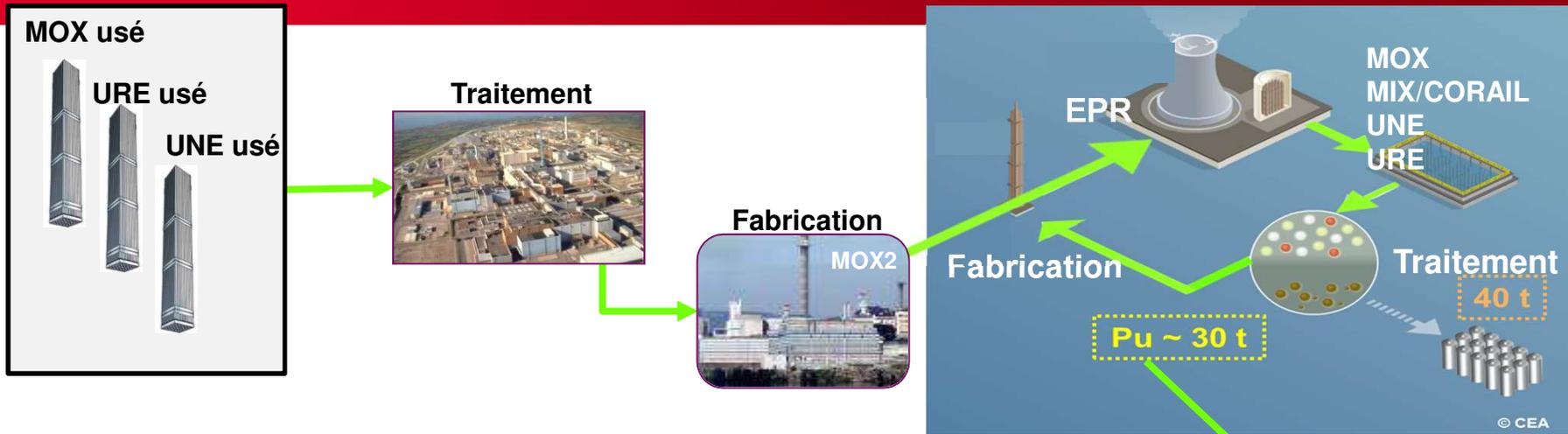
Ce que permet de faire le cycle actuel (monorecyclage en REP) :

- Réutiliser une fois le plutonium (MOX) (ou l'uranium : URE) : 1) à 4)

A moyen et long terme : les deux grandes étapes envisagées :

- Multirecyclier le plutonium et l'uranium en REP : 1) à 6)
- Multirecyclier le plutonium et l'uranium en RNR (réacteurs à neutrons rapides) : 1) à 7) voire 8)

Une étape transitoire avant la 4^e génération Le multirecyclage en REP (MOX2)



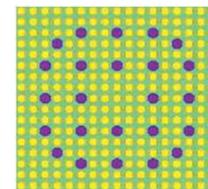
Passer du monorecyclage actuel au multirecyclage en REP ?

■ Cycle actuel :

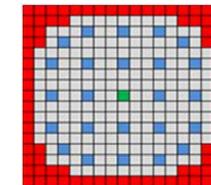
- récupération du Pu de l'UOX usé,
- fabrication du MOX en utilisation en REP 900 Mwe
- entreposage du MOX usé

■ Adapter le MOX pour le multirecyclage en REP :

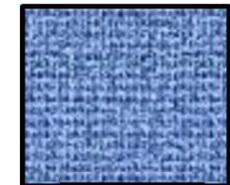
- la qualité isotopique du plutonium diminue (il devient moins fissile)
- Nécessité d'ajouter de la matière fissile : MOX2
- ajouter du plutonium (sûreté réacteur : moins de 12% au total !)
- ajouter du ²³⁵U (homogène : MIX ; hétérogène : CORAIL)



UOX
producteur Pu

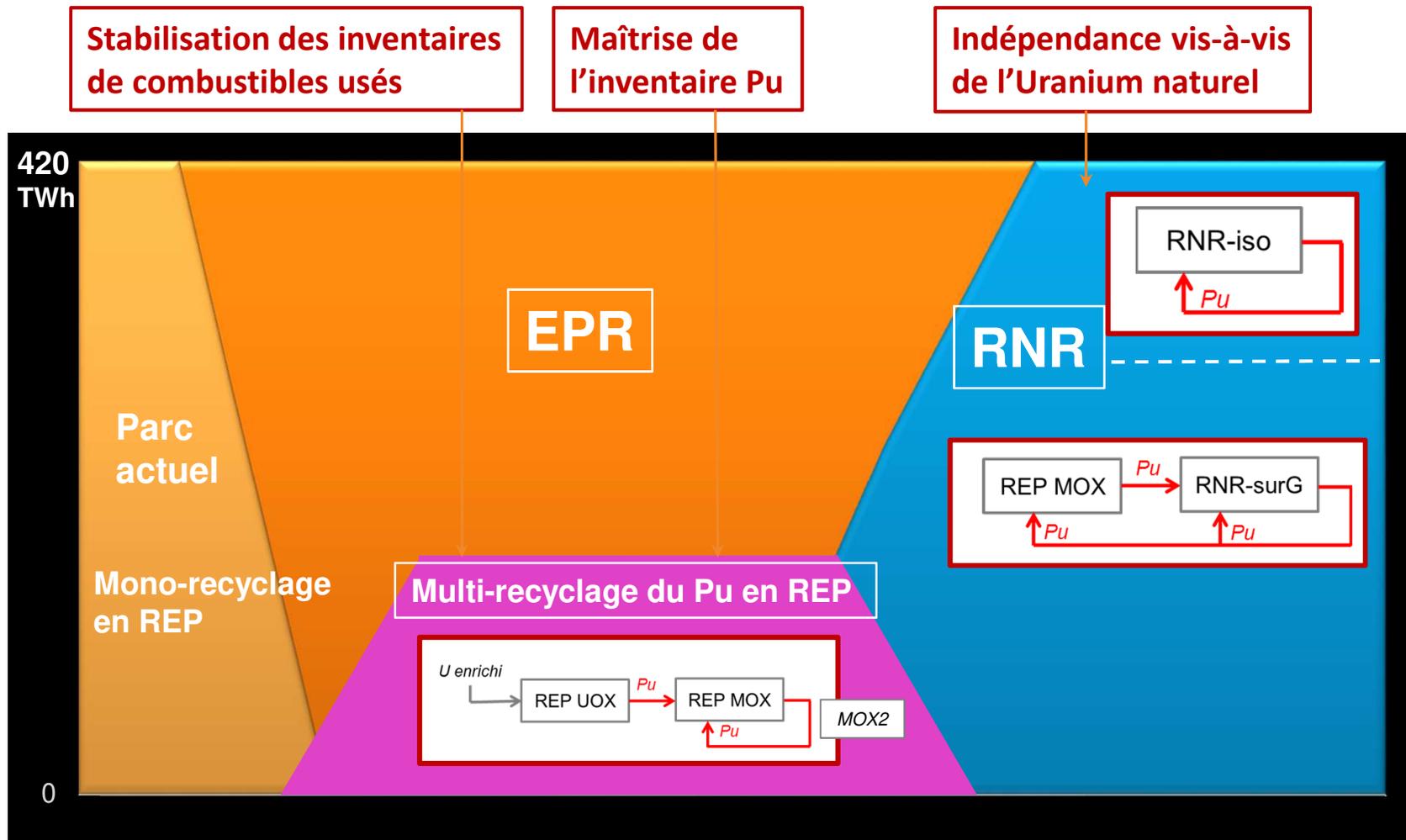


CORAIL



MIX

Flux x3



Faible puissance permettant une conception simple et sûre

- ▶ architecture compacte et simplifiée
- ▶ systèmes passifs



Un réacteur modulaire, pour une construction plus simple

- ▶ modules fabriqués et testés en usines spécialisées
- ▶ ↘ contraintes et durée de construction

Une production nucléaire abordable

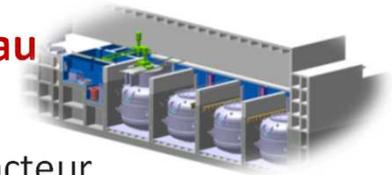
- ▶ investissement modéré pour un réacteur
- ▶ production continue de l'installation



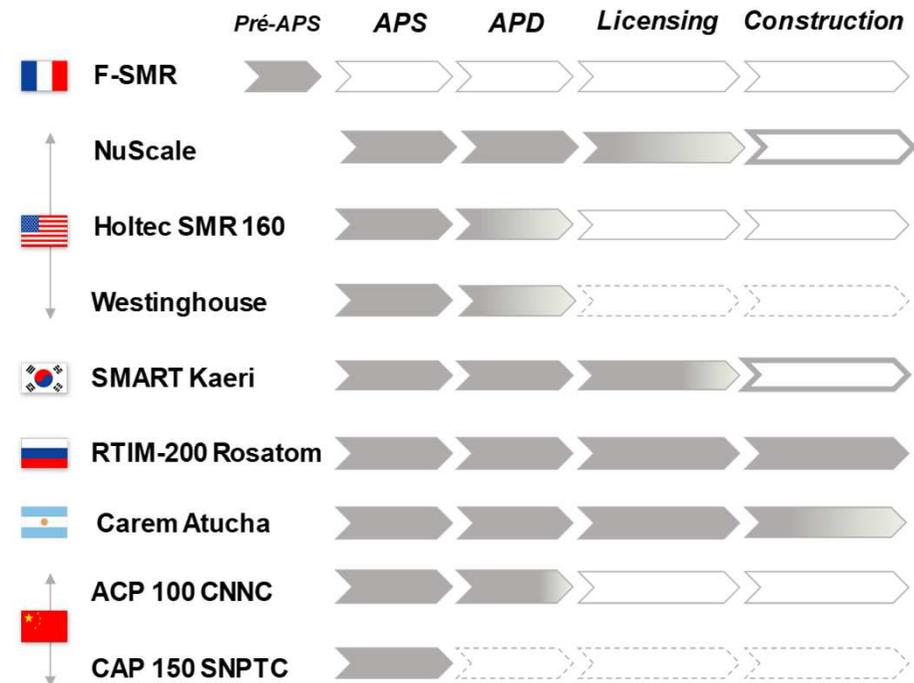
Barge russe *Akademik Lomonosov* (2x35MWe) en fin de construction pour alimenter les territoires isolés de Sibérie.

Intégration dans le réseau

- ▶ du réacteur isolé à la centrale multiréacteur
- ▶ production flexible adaptée à l'émergence des énergies renouvelables intermittentes



Un marché en cours de structuration, où les acteurs se positionnent avec des maturités diverses



Réacteurs et Cycle du combustible futur :

- La stratégie de fermeture du cycle confirmée par la PPE et le CSFN
- Une approche progressive, par paliers industriels d'ambition croissante, vers la fermeture complète du cycle.
- Cette stratégie part du **mono-recyclage actuel**, passe par le **multi-recyclage en REP** et vise à terme la **Gen IV** ; la filière sodium est la plus mûre, d'autres sont à investiguer.
- **La transmutation** s'inscrit dans une perspective encore plus lointaine et pourra bénéficier du retour d'expérience acquis sur les RNR.
- Une volonté de mise en place de partenariats stratégiques internationaux pour ces programmes et pour les nouveaux axes de recherches.

Mix énergétique et évolution du parc :

- Soutien à EdF pour une plus grande **manœuvrabilité et flexibilité** des réacteurs dans un mix présentant une part croissante d'ENR intermittentes ainsi que pour la **prolongation de durée de vie** à 50 voire 60 ans.

SMR :

- Une initiative coordonnée entre les acteurs de la filière pour le **développement d'un SMR de technologie française**

Principales orientations de la R&D



« *Délivrer une force de recherche, d'innovation, d'expertise et de projets au service d'une énergie nucléaire responsable pour un mix décarboné compétitif* »

Soutenir l'industrie nucléaire française et la Défense

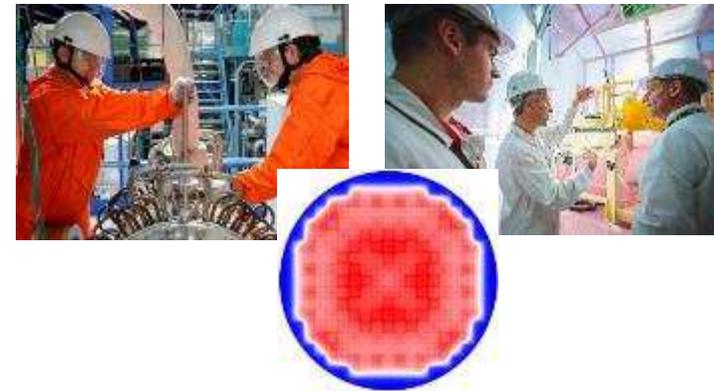
- Contribuer au maintien du parc actuel au meilleur niveau de sûreté et de performance
- Améliorer l'évaluation de la durée de vie, des marges de conception et de sûreté
- Optimiser les installations du cycle du combustible
- Proposer des innovations pour les réacteurs de 3^{ème} génération

Préparer le futur de l'industrie nucléaire

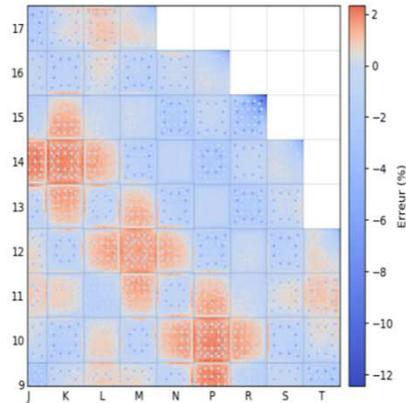
- ▶ Innover avec de nouveaux concepts de réacteurs (SMR et 4^{ème} génération)
- ▶ Investiguer les options pour la fermeture du cycle du combustible

Assainir et démanteler ses installations en fin de vie

- ▶ Maîtrise d'ouvrage des opérations
- ▶ Gestion des déchets
- ▶ R&D de pointe en soutien



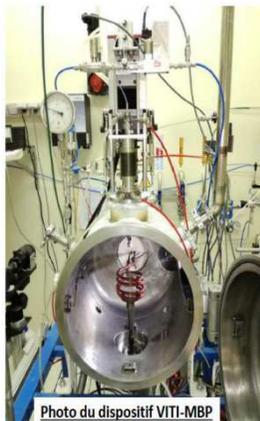
Outils au service des missions : simulation et installations expérimentales



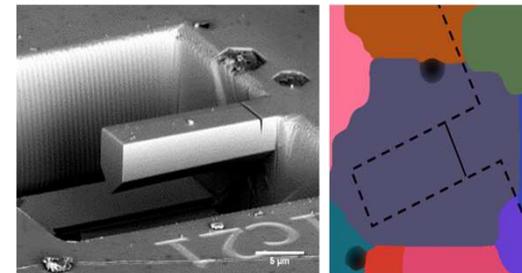
Calcul de Flamanville3 en configuration
« toutes grappes insérées »
Comparaison entre APOLLO-3 et TRIPOLI-4



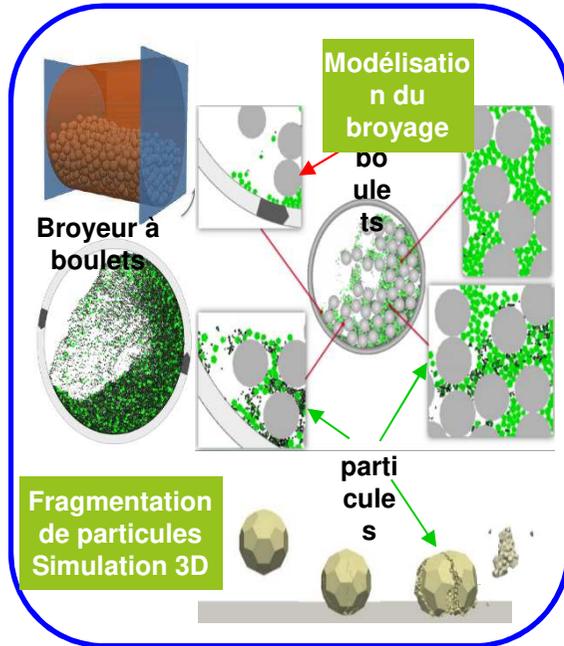
1^{er} essai VINON-LOCA
Crayon postiche après essai révélant le
ballonnement et l'éclatement de la gaine



Mesure de la tension de surface d'un acier à 2200°C
dans l'installation VITI de la plateforme PLINIUS



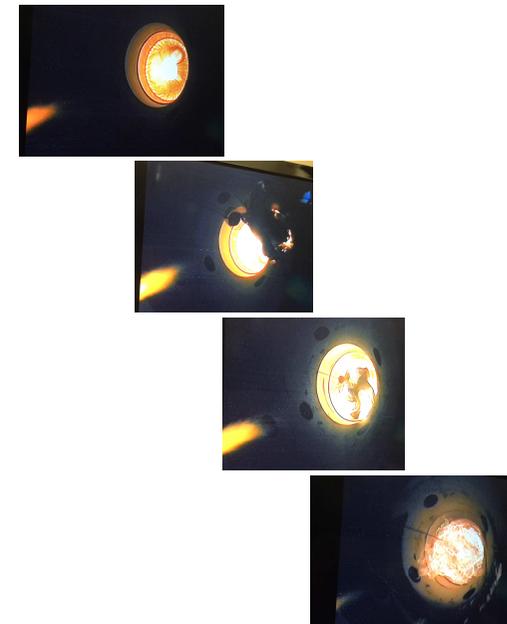
Mesures, à l'échelle du grain, des
propriétés à rupture du combustible
nucléaire vierge et irradié par essai de
flexion sur micro-poutres



Fabrication du combustible MOX :
modélisation du broyage $UO_2 - PuO_2$



Extraction du plutonium :
démonstration des schémas PUREX et
COEX sur une solution active
reconstituée (U,Pu)



1^{er} essai d'ensemble du prototype PIVIC
(Procédé d'Incinération Vitrification In Can)
avec module de fusion et module de
combustion

Le Multi-recyclage du plutonium en REP

Programme d'étude du multi-recyclage en REP (CORAIL, MIX)

- Un programme en cours de construction avec les industriels EdF, Framatome et ORANO
- Une vision globale du cycle (flux, enchaînement des étapes R&D et industrielles et planning...)
- Avec un déploiement industriel qui devra être intégré dans les paliers des études de scénario

Enjeux scientifiques et Techniques du multi- recyclage en REP

- Adaptation des réacteurs et assemblages
- Physique des réacteurs
- Assemblage test en réacteur en 2025
- Radioprotection (recyclage)
- Impact sur les procédés et usines du cycle de La Hague et Mélox
- Impact sur le stockage, production accrue d'Am

Objectifs des programmes de R&D

Réacteurs
du Futur

- Consolidation des acquis techniques sur les RNR sodium
- Socle de R&D visant à maintenir des compétences et faire progresser les technologies des outils de 4^{ème} génération (réacteurs et usines du cycle)
- Etudes d'esquisse et R&D de veille sur d'autres filières de RNR, notamment RNR-MSR avec identification des points durs (sels, corrosion / durabilité, traitement en ligne, sûreté)
- Construction un « petit réacteur » RNR, de démonstration ou à vocation expérimentale, à un horizon compatible avec le besoin industriel (horizon de la 2^{ème} moitié du XXI^{ème} siècle)

Aval du
cycle

- Traitement du combustible usé : procédés et technologies avancés pour le recyclage RNR (ex : un seul cycle sans opération REDOX)
- Fabrication MOX pour RNR : capacité industrielle de fabrication
- Développement d'un procédé de Multi-recyclage de l'uranium et du plutonium (CORAIL/MIX)
- Evaluation des conséquences du multi-recyclage U et Pu sur la modification des flux de Pu et d'Actinides Mineurs, en particulier pour le stockage

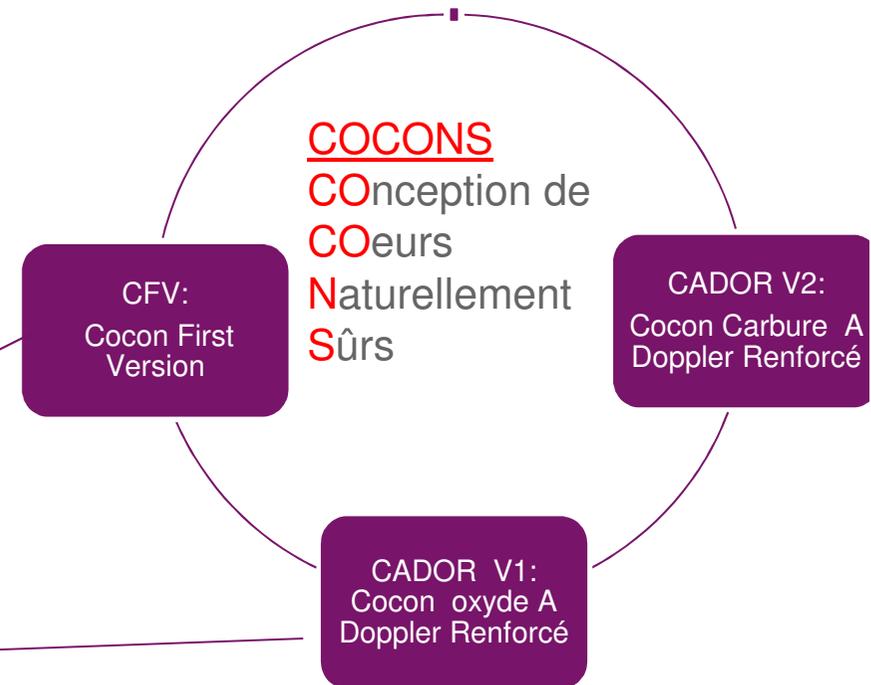
International

- Développement de collaborations avec des partenaires, en particulier EUROPE (UE), JAPON (JAEA), RUSSIE (ROSATOM), USA (DOE), ...

Cœurs intrinsèquement sûrs résistant aux accidents de réactivité type Tchernobyl

Depuis SPX/EFR des progrès notables ont été réalisés. La démarche « COCONS » de conception de cœurs naturellement sûrs se révèle fructueuse. Des concepts de cœurs innovants permettent d'éviter ce type d'accidents pour les RNR-Na

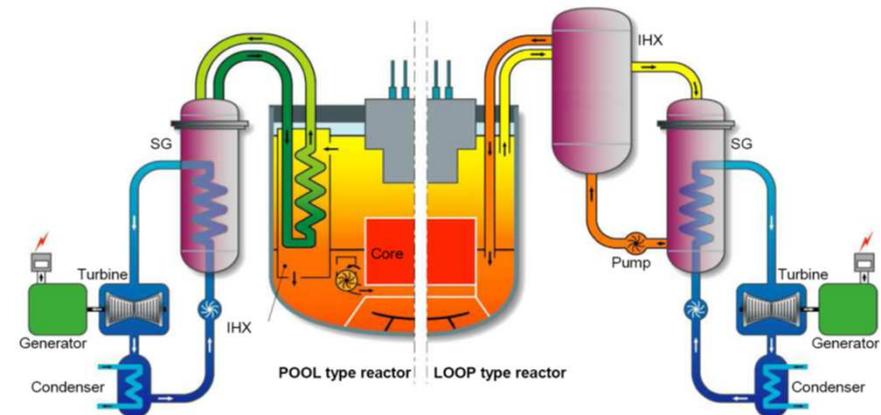
- Vidange Na du cœur par ébullition
→ Cœur CFV
- Vidange Na par passage de gaz dans le cœur, compaction du cœur, éjection des barres → Cœur CADOR



Investiguer les gains économiques associés

Exemples :

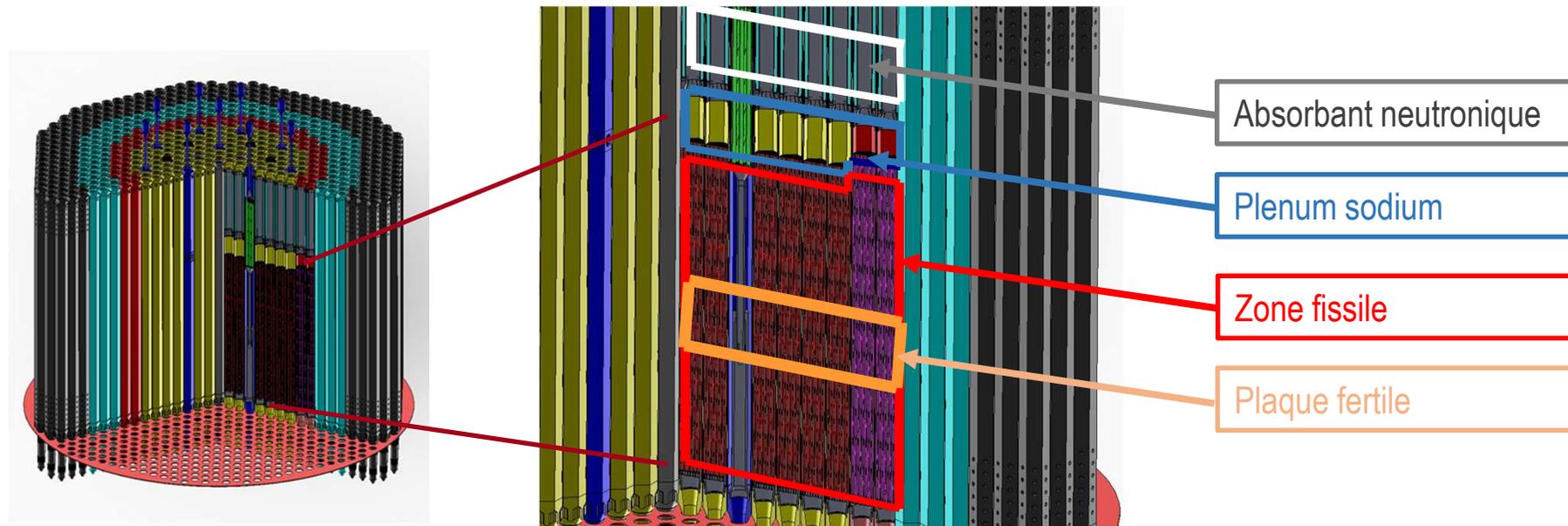
- SCE gaz + CADOR permet la suppression du circuit intermédiaire
- Réduction d'environ 20% du coût d'investissement
- Grande partie du surcoût structurel RNR/REP gommé !



Objectif de sûreté accrue des réacteurs à neutrons rapides

⇒ Minimisation des conséquences d'une ébullition accidentelle du sodium

⇒ Conception innovante du *Cœur à Faible Vidange* (CFV)



Principe physique sous-tendant la conception :

Cœur hétérogène axialement, favorisant les fuites/captures de neutrons en cas d'ébullition sodium

⇒ « effet de vide sodium » négatif

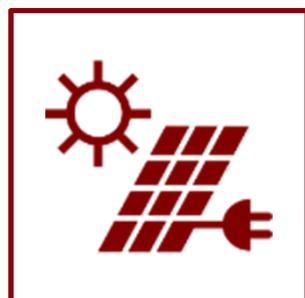
Enjeux et contexte Actuel

- La transmutation de l'américium et du curium permet **de réduire la radiotoxicité** à long terme des déchets ultimes
- La transmutation de l'américium permet **de réduire l'emprise du stockage**
- La Transmutation étudiée dans le cadre de la loi de 1991 et réaffirmée en 2006
- Limites de l'intérêt de la Transmutation exprimées en 2014 par l'ASN suite aux études de l'IRSN publiées en 2012

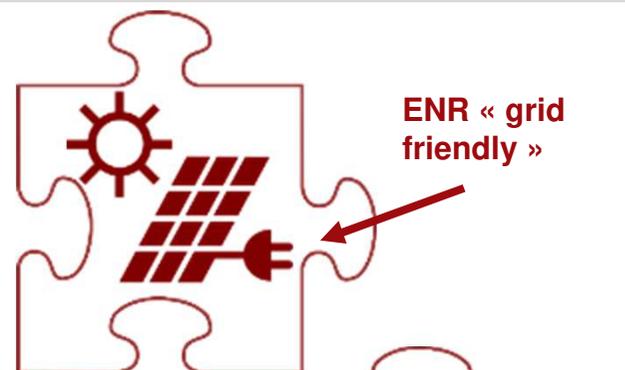


Position du CEA

- Après l'étude du multi-recyclage de l'U et du Pu (fermeture du cycle), la transmutation est une **voie d'étude pour le plus long terme**
- Une poursuite des recherches au CEA avec des moyens limités et ciblés dans un **cadre de collaboration orienté à l'international.**
- Une réflexion engagée et une veille pour identifier de nouveaux concepts intéressants :
 - Couplage **RNR - MSR** et transmutation
 - Veille sur les **concepts sous-critiques** (ADS, laser)



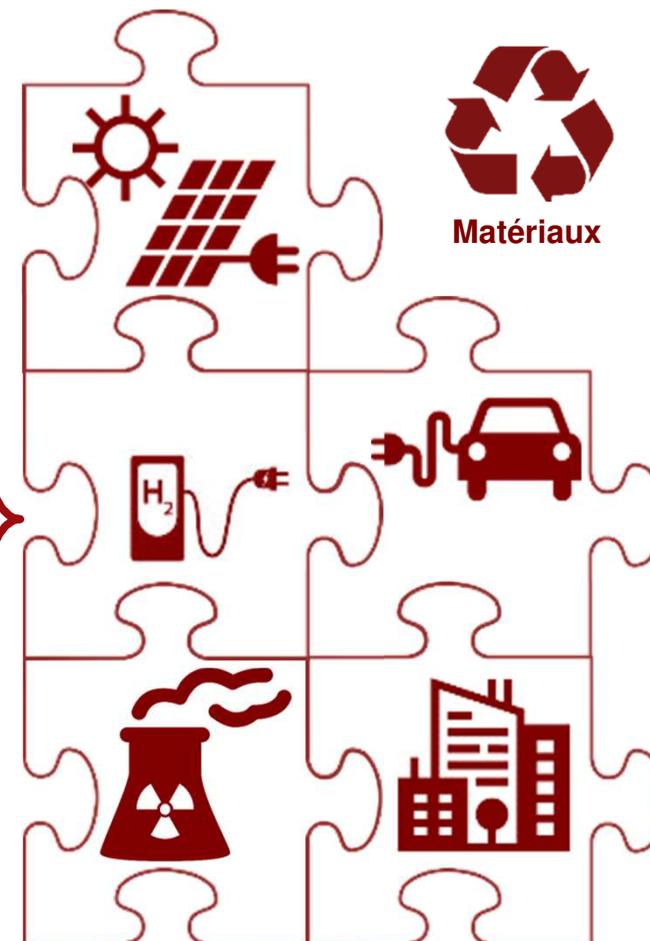
Recherches sur les
technologies



Nucléaire
manœuvrable
et flexible



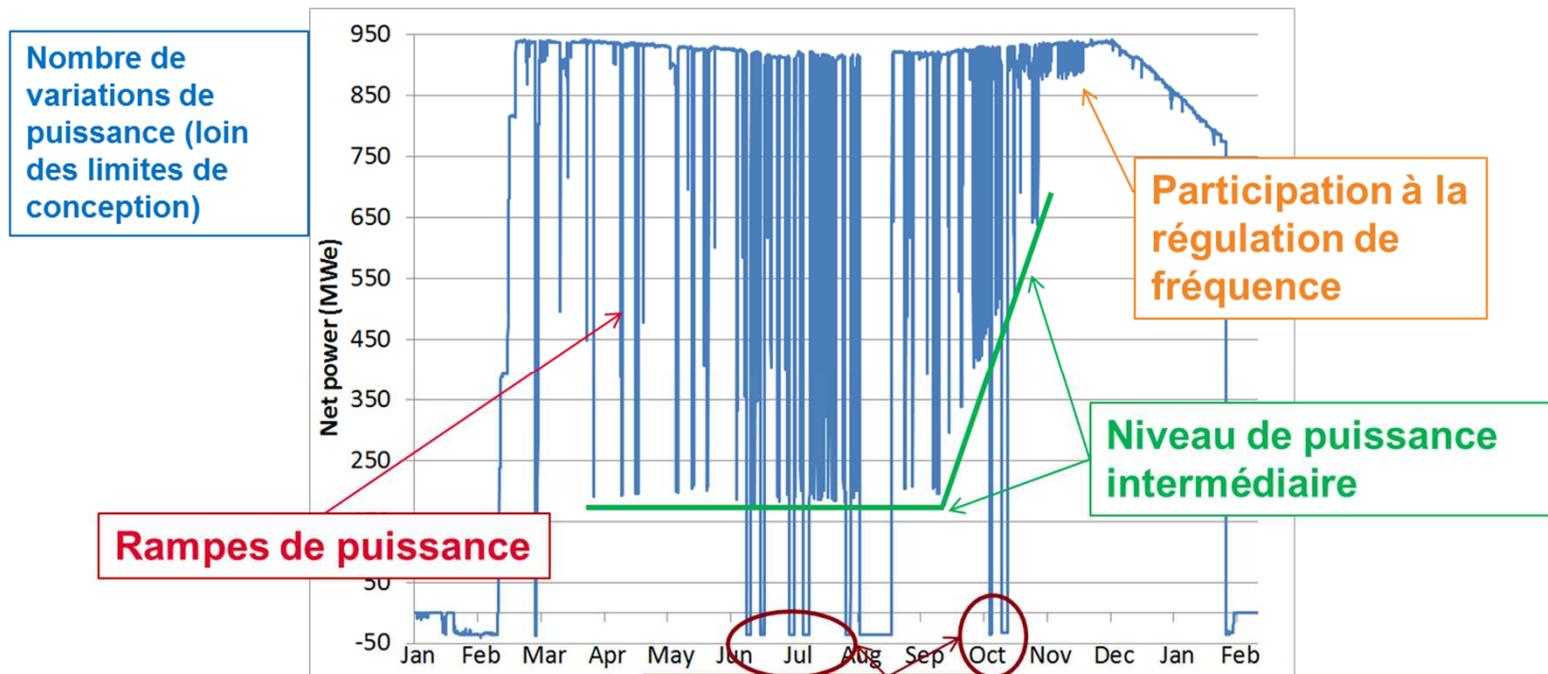
Recherches sur
les **interactions**



Recherches sur le **système**
(technico-économique)

Fonctionnement d'un réacteur : un exemple de flexibilité

Suivi de charge annuel - Blayais 2 Jan. 2014 / Fev. 2015



	Décarbonée	Programmable	Flexible
Charbon, Gaz		X	X
PV, Eolien	X		
Nuc. Hydraulique Biomasse	X	X	X

Arrêts pour suivi de charge

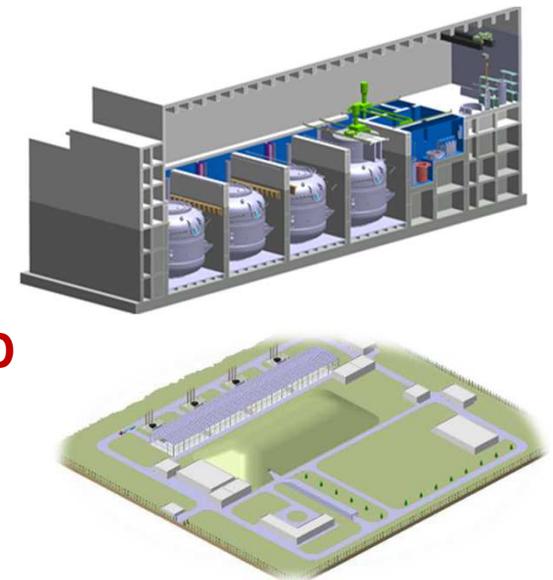
Sources:
RTE database, 2015

Cette capacité technique de flexibilité peut engendrer toutefois une baisse de Kp moyen : **examiner les co-productions**

R&D sur le projet français de SMR et les autres études

1. **Projet de F-SMR** porté par la Filière nucléaire France avec un consortium national établi

- **Objectif de concept technologiquement et industriellement avancé** sur les aspects de sûreté, performances, compacité et modularité
- **Un SMR REP de puissance unitaire 150-170 MWe**
- **Une unité de base de 2 SMR (# 300 MWe)** avec large flexibilité pour couvrir une gamme de 170 à 680MW
- **Projet au stade pré-APS en 2019, phases APS et APD à suivre** en coordination avec l'Etat (contrat de filière)



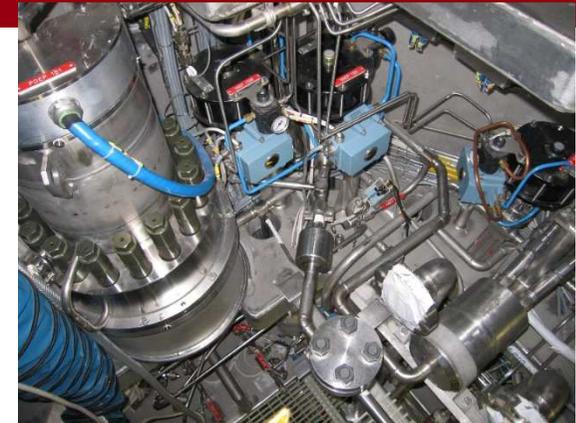
2. **Programme d'études au CEA sur les potentialités des SMR**

- Veille sur les **SMR – MSR**
- Veille sur les microréacteurs (**μSMR**) de puissance électrique de quelques dizaines de MWe
- **Fonctionnalités non-électrogènes** (calogène, couplage SMR et production de H₂, couplage SMR et dessalement eau de mer)

Les installations de R&D

CABRI (accidents de réactivité ; perte de réfrigérant)

- CABRI International Program
 - réalisation 1^{er} essai en boucle à eau le 16 avril 2018
 - remise en configuration de la boucle
 - reprise de la campagne d'essais en 2020
- IRSN : nouvelles utilisations de CABRI en complément du RJH
 - essai d'accident de perte de réfrigérant primaire
 - objectif de mise en service en 2024



ATALANTE (cycle) : des investissements et des enjeux importants

- Fabrication du MOX : fin du transfert de Cadarache vers Marcoule
- Entreposage de solutions LES401 : mise en actif proche
- Réexamen de sûreté : Groupe Permanent le 19 juin !



MASURCA (neutronique, maquette critique)

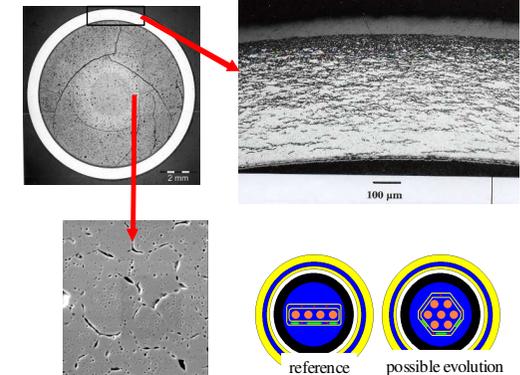
- *Abandon projet de rénovation*
- *Pas de construction de maquette critique à court terme*
- *La DEN ne dispose plus de maquette critique opérationnelle*

Réacteur Jules Horowitz



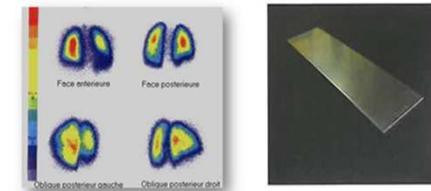
1. R&D en support à l'industrie nucléaire :

- Sûreté et durée de vie (vieillessement / nouveaux réacteurs)
- Validation du comportement du combustible en conditions incidentelles ou accidentelles
- Support des innovations et sûreté associée pour les futurs réacteurs électrogènes



2. Production de radio-isotopes pour les applications médicales ⁹⁹Mo production :

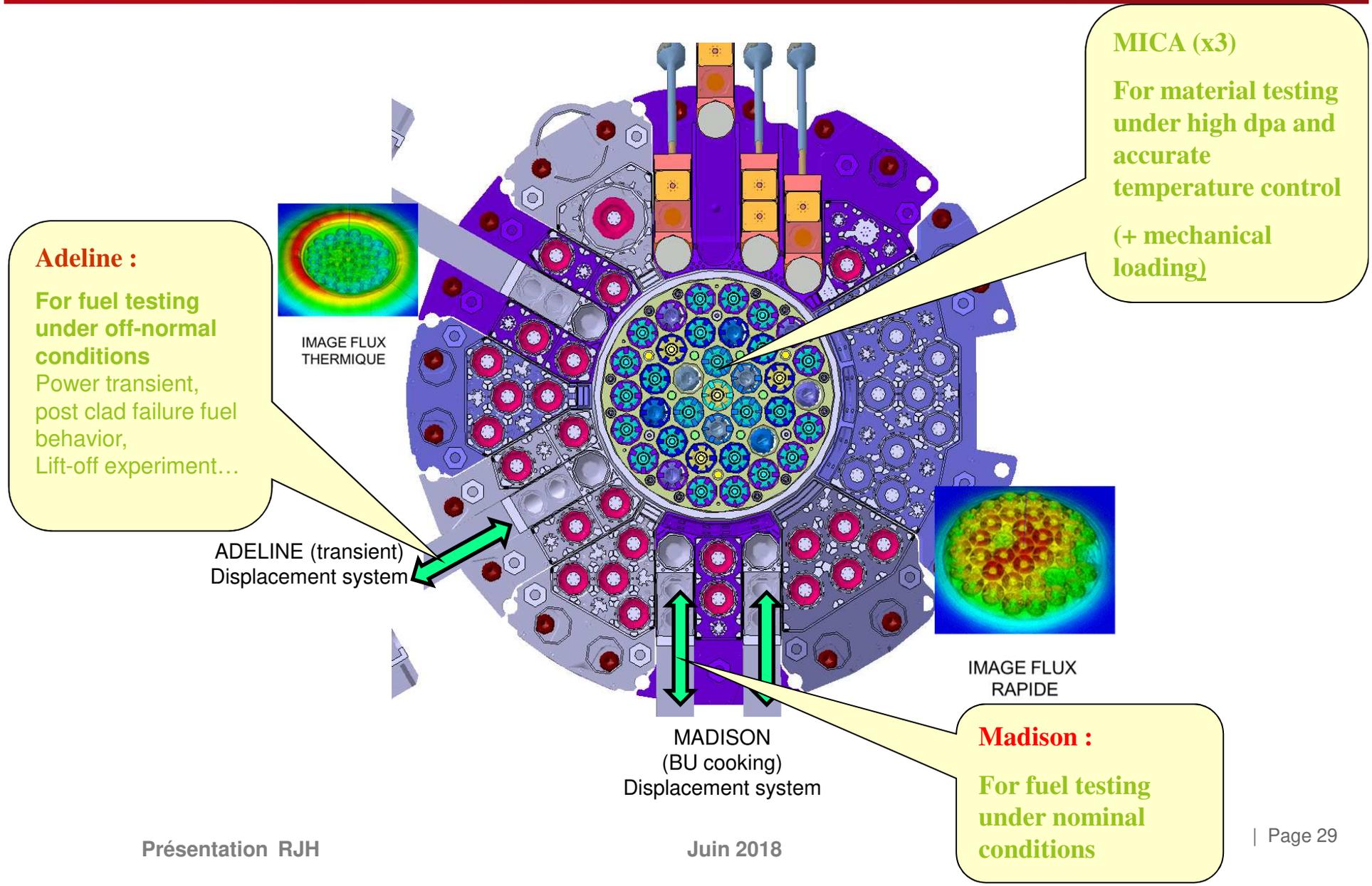
- Le RJH produira 25% de la demande européenne (aujourd'hui 8 millions de protocoles/an)
- Voire jusqu'à 50% en cas de demande spécifique

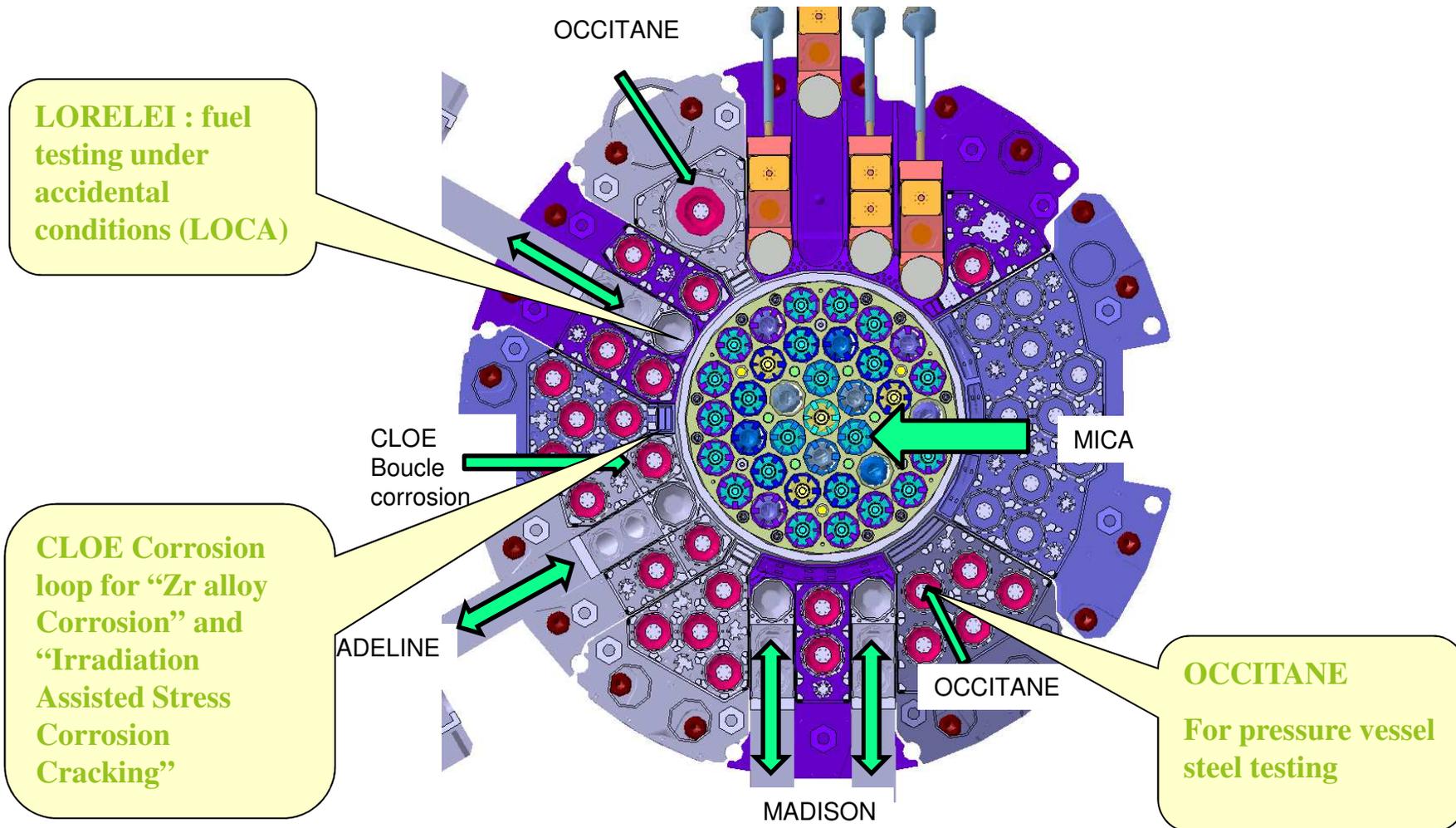


3. Un outil de support au maintien de l'expertise :

- Entraînement des étudiants (simulateur RJH...)
- Maintien de l'expertise nationale et crédibilité pour le public
- **Participation à l'évolution des exigences de sûreté et à son harmonisation à l'échelle internationale**



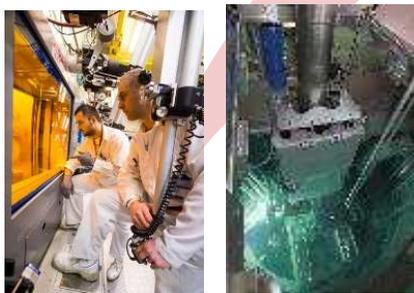




Nouvelles méthodes scientifiques



Outils de calculs scientifiques
Expérimentations analytiques
Expérimentations intégrales



Verrous scientifiques et techniques



'Smart' expérimentations & Labs

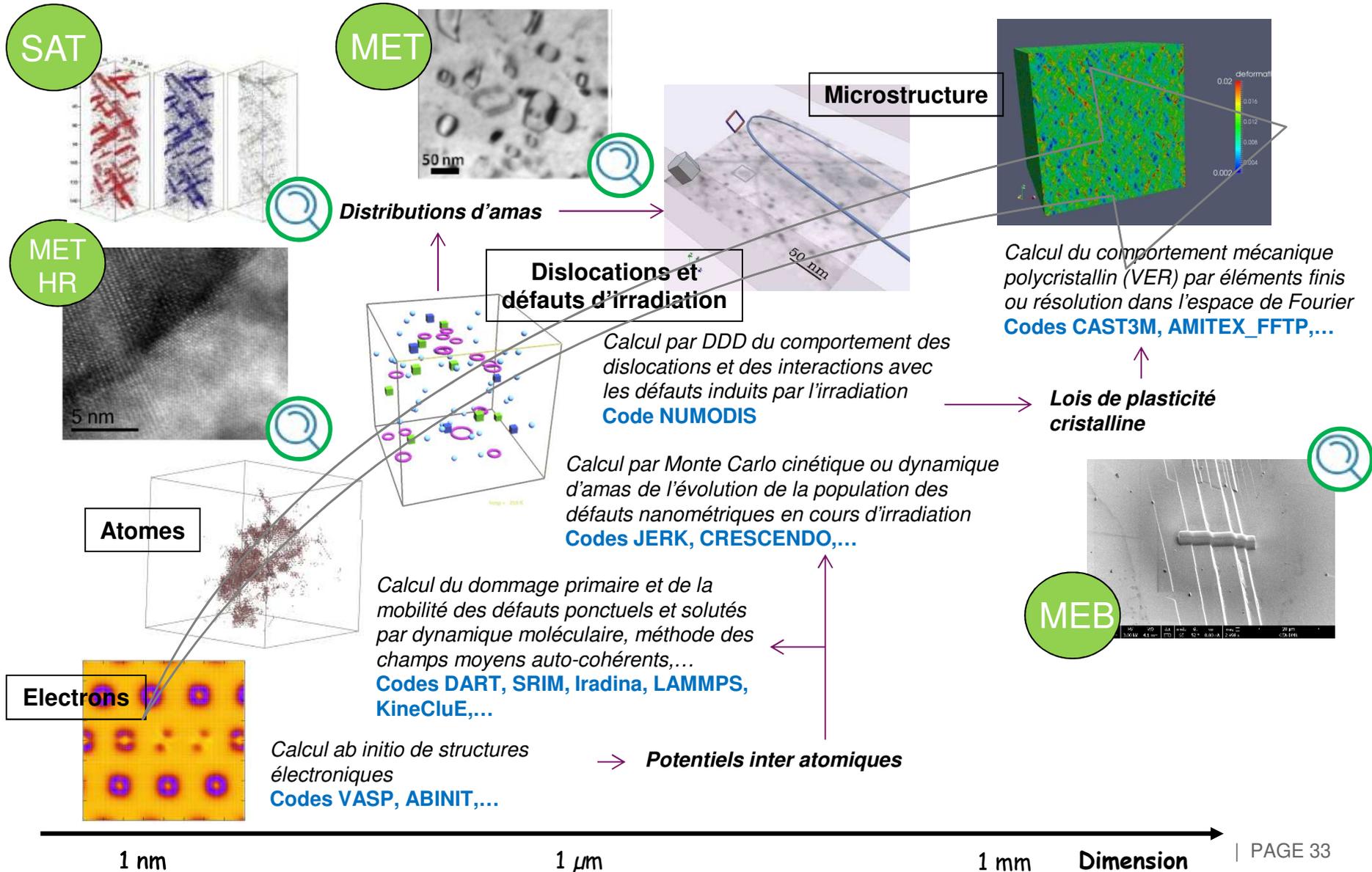
Simulation prédictive (incertitudes)

Outils numériques avancés



- CRESCENDO
- NUMODIS
- PLEIADES
- APOLLO3
- TRIPOLI-4
- CONRAD
- TRIOCFD
- FLICA
- CATHARE
- CAST3M
- EPX
- PAREX+

L'approche multi échelles et multi physique en science des matériaux



produire des données d'entrée

Passage d'échelle

Calcul de potentiels interatomiques
Modèles de turbulence

comprendre et optimiser les systèmes complexes

Systèmes complexes

Piloter un réacteur
Prédire le comportement d'un matériel (GV)
Optimiser un plan de chargement

comprendre, valider et analyser les calculs complexes

Calculs à haute complexité combinatoire

(calculs couplés)
Analyser les corrélations
Valider au juste besoin
Détecter les paramètres importants

Machine learning
Métamodélisation
Analyse statistique

URANIE



Capitaliser les algorithmes
Faciliter leur utilisation
Assurer la qualité des simulations

Méthodes statistiques
Indicateurs de corrélations

Optimisation multicritère

HPC

Grands volumes de données d'entrée : mesures, résultats de calculs directs, résultats de calculs par métamodèles

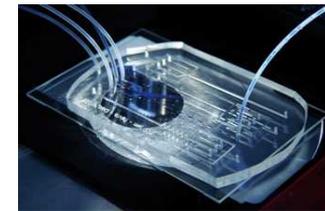
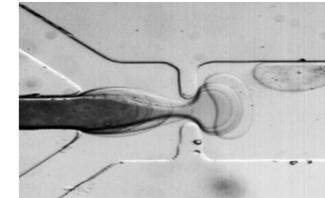
Analyses radiochimiques en laboratoire : intérêt de miniaturiser les dispositifs



Taille caractéristique du matériel
d'analyse > 1 cm
volumes du mL au L



→
*Réduction des doses
d'exposition, des déchets, des
contraintes de manipulations
et de transports, des durées*



Taille caractéristique du matériel
d'analyse ~100 μm
volumes du nL au μL



Objectifs :

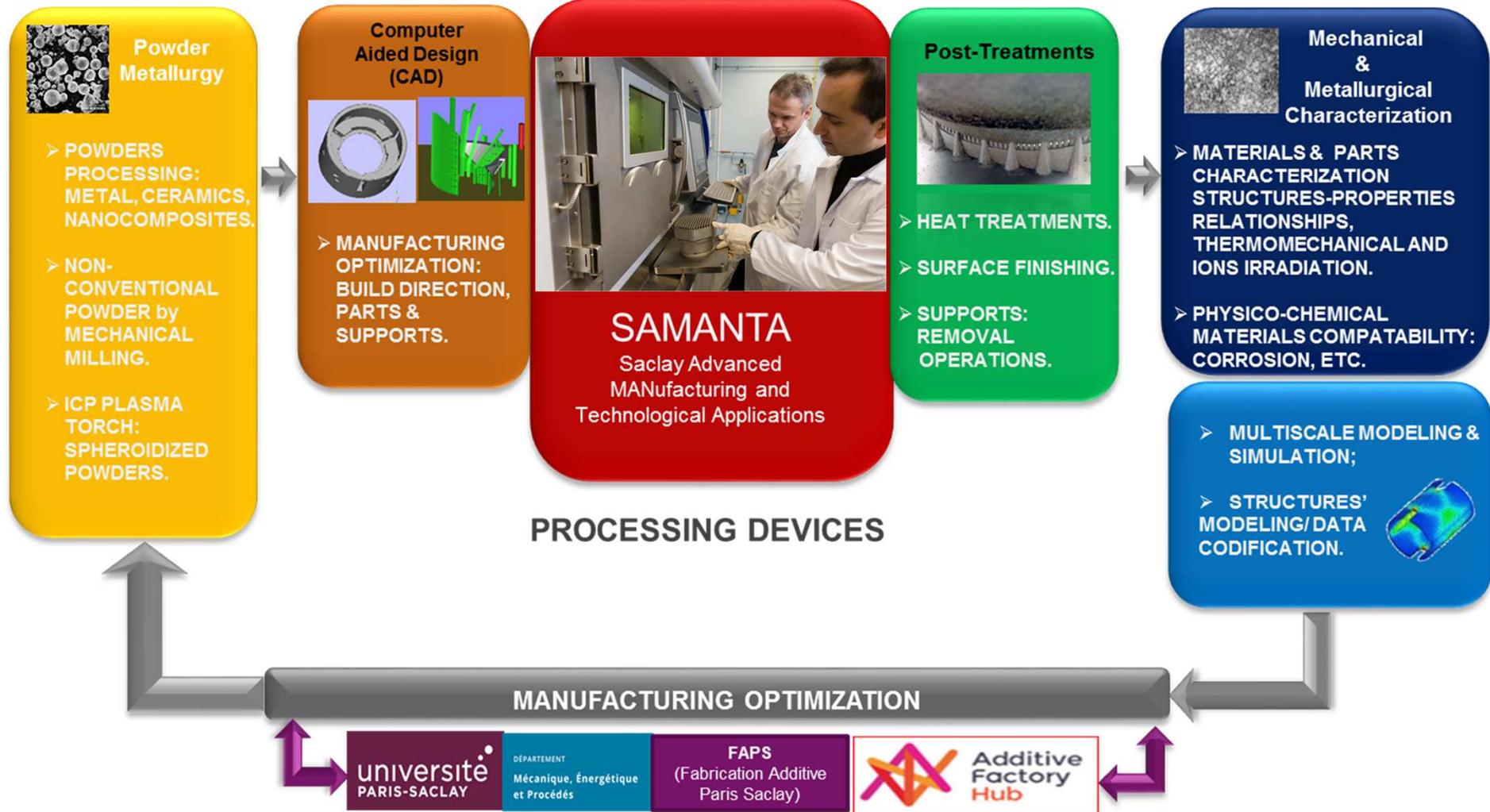
- Concevoir des dispositifs « **lab-on-a-chip** » adaptés à l'analyse de radionucléides
- Développer des dispositifs microsystèmes intégrés à coupler à un détecteur (« **chip-in-the-lab** »)

→ Vers l'implantation de dispositifs miniaturisés et automatisés dans les laboratoires d'analyses et au plus près des procédés

Procédés de Fabrication Additive, un atout incontestable !



Available Machines



Merci de votre attention !