

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea



framatome

# PRÉSENTATION DES ARTICLES 12 ET 51 DU PNGMDR 2016-2018

GT PNGMDR DU 11 FÉVRIER 2019

# SOMMAIRE

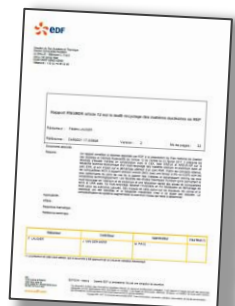
## S O M M A I R E

- Les options de cycle évaluées et les principales hypothèses
- Performance technique des options de cycle (approche à l'équilibre)
- Performance technique des scénarios de transition (approche dynamique)
- Emprise au stockage des différentes options de cycle
- Conclusions sur les études de scénario
- Éléments préliminaires sur la faisabilité industrielle du multi-recyclage en REP

**CADRE:** Arrêté du 23 février 2017 du Plan National de Gestion des Matières et des Déchets (PNGMDR)**Article 12**

« EDF remet au ministre chargé de l'énergie avant le 31 décembre 2017 un rapport sur la faisabilité technico-économique d'un traitement à grande échelle des combustibles usés MOx et URE puis d'une valorisation des substances séparées (uranium et plutonium) dans les installations du cycle ainsi que dans les réacteurs à neutrons thermiques. Ce rapport précise, en lien avec le CEA, les quantités de plutonium nécessaires à la mise en place d'un parc de réacteurs à neutrons rapides de quatrième génération et, le cas échéant, les quantités maximales de combustibles usés URE, MOx et UOx non utilisés dans le parc actuel qui seraient mobilisées à cette fin.

L'ASN est saisie pour avis sur ce rapport. »



Document EDF  
PNGMDR – Art. 12  
Diffusé le 27 décembre 2017

**Article 51**

« Le CEA remet au ministre chargé de l'énergie avant le 30 juin 2018 un inventaire prospectif entre 2016 et 2100 des matières et des déchets radioactifs présents dans les combustibles usés qui seraient produits par le parc de réacteurs électronucléaires français selon différents scénarios, notamment dans le prolongement de ceux étudiés avec EDF et Areva au titre du PNGMDR 2013-2015. Le CEA présente également dans cette étude, en lien avec l'ANDRA, l'estimation de l'emprise totale de ces substances radioactives en stockage en couche géologique profonde.

L'ASN est saisie pour avis sur cette étude. »



Document CEA  
PNGMDR - Art. 51  
Diffusé le 29 octobre 2018

**Présentation GT PNGMDR du 11 février 2019 :**

Présentation des études scénarios art. 51 comprenant les scénarios avec multi-recyclage en REP de l'art.12  
Présentation des études de faisabilité industrielles multi-recyclage en REP de l'art.12 (avec mise à jour)

Programme d'études de scénarios réalisé par le **CEA en étroite collaboration avec EDF, Framatome et Orano** et le **soutien de l'Andra** pour l'estimation des emprises au stockage des déchets produits

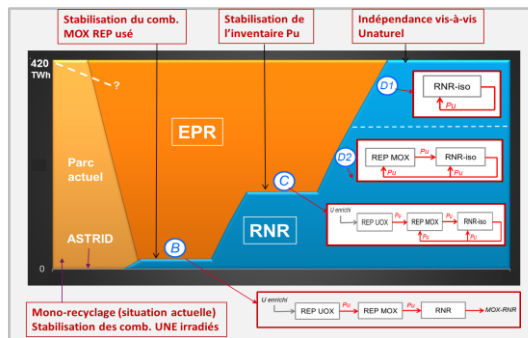
Etudes reposant sur les hypothèses les plus réalistes (contraintes réacteurs et usines du cycle)

**Ces études de scénarios analysent:**

- **Les apports pour le parc français d'une filière RNR**
- **Les scénarios alternatifs ou d'attente**

- **Scénario de renouvellement du parc actuel par des EPR et poursuite du mono-recyclage**  
*« Scénario A » (Poursuite de la situation actuelle)*  
 (cohérence Art.2 du PNGMDR, IN2018)

- **Scénarios de déploiement progressif d'un parc de RNR et multi-recyclage des matières incluant ASTRID**



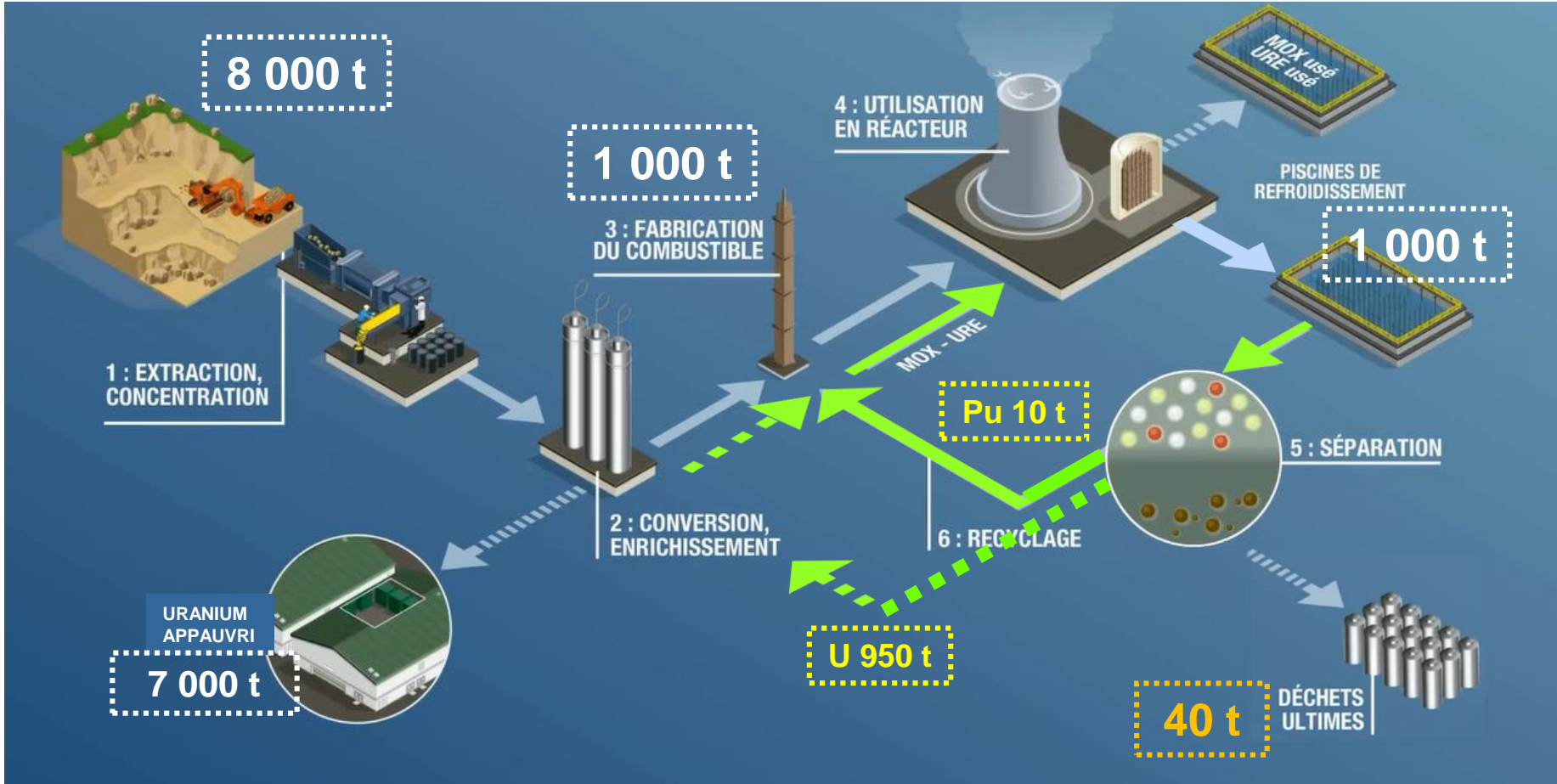
- *Différents paliers caractérisés séparément : B, C, D1 et D2*
- *Enchaînement de ces paliers → « Scénarios ABCD1, ABCD2, ABD2 »*  
 (cohérence Art.2 du PNGMDR IN2018, CNE 10/01/2018)

- **Scénarios avec multi-recyclage en REP**  
*Concepts CORAIL et MIX en EPR* (Art.12 du PNGMDR, CNE 10/01/2018)

- **Scénario d'arrêt du parc à 40 ans** (cohérence Art.2 du PNGMDR IN2018, CNE 10/01/2018)

- *Des comparaisons avec un scénario hypothétique de « cycle ouvert »*

# LE CYCLE ACTUEL ET LE « PALIER A »



(Ordres de grandeur pour une production annuelle de **400 TWh**)

# PRINCIPE DU MULTI-RECYCLAGE DU PU

Dans le combustible MOX :

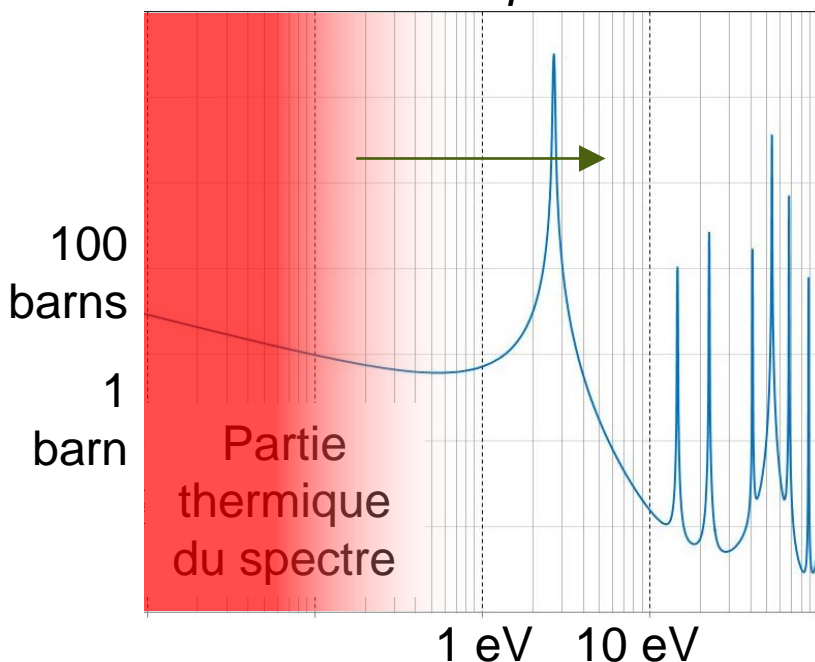
- Isotopes impairs Pu239 et Pu241 : fissiles
- Isotopes du **Pu pairs peu fissiles** en spectre thermique (REP)

**Spectre thermique** : consommation du Pu fissile, **accumulation du Pu non fissile**

**Multi-recyclage** = dégradation du plutonium (qualité fissile) = **augmentation de teneur en plutonium** dans les combustibles neufs (iso-réactivité)

Les isotopes du **Pu pairs capturent beaucoup** au-dessus du domaine thermique :

*Ex : section de capture du Pu242*



En cas de **vidange** de l'eau:

- **Perte de modérateur**
- Le **spectre se durcit** (flèche vers la droite)
- **Moins de captures** par les Pu pairs
- **Gain en réactivité** : à modérer

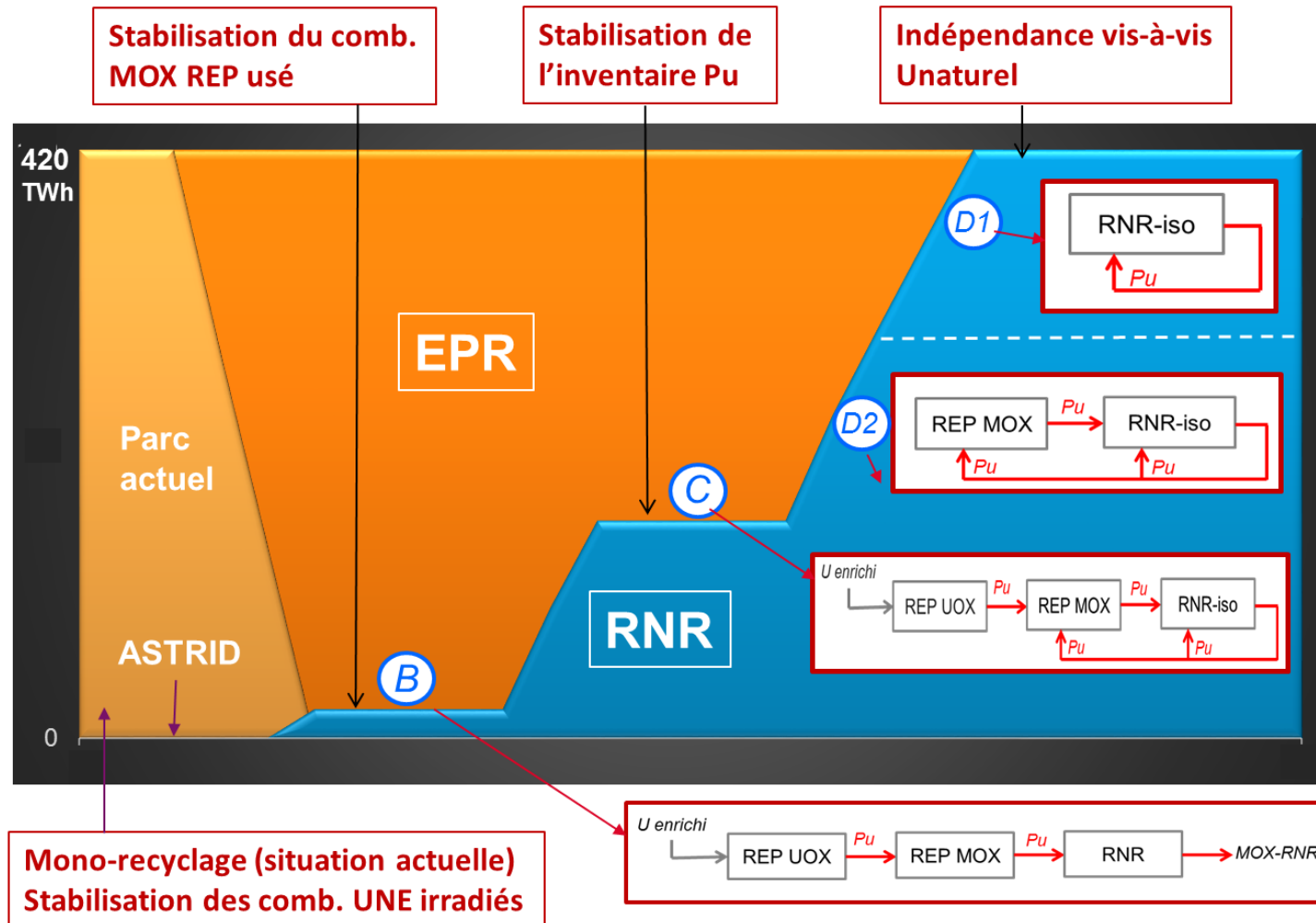


Une **limite en teneur Pu** est imposée pour assurer un **coefficient de vidange négatif** : **12%** dans les études de scénarios



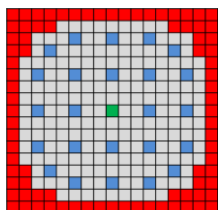
**MOx** reste limité au mono-recyclage du Pu PAGE 6

# UNE STRATÉGIE DE DÉPLOIEMENT PROGRESSIVE DES RNR, PAR PALIERS : B → C → D2 → D1



# LES OPTIONS DE MULTI-RECYCLAGE EN REP

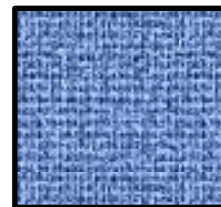
- Pour les articles 12 et 51 du PNGMDR les concepts **CORAIL** et **MIX** en EPR ont été retenus car considérés comme les plus accessibles compte tenu du REX (1<sup>ères</sup> études au CEA années 2000)



■ 84 crayons MOx  
■ crayons UOx  
■ tubes guide  
■ REP : tube guide / EPR : crayon UOx

Assemblage CORAIL 84 crayons MOX (années 2000)

- **2 types de crayons UOx et MOX dans l'assemblage**
- U235 fixé (~5%) et Pu ajusté pour compenser la dégradation isotopique du Pu (<12%)
- Faiblement consommateur en Pu (proche iso)



Assemblage MIX

- **1 seul type de crayons dans l'assemblage**
- **Crayons MOX sur support U enrichi**
- Pu fixé (8%, 9,54%, 12%) et U235 ajusté pour compenser la dégradation isotopique du Pu (<5%)
- Consommateur de Pu

84 crayons, taux de moxage ≈32%  
(quasi-isogénérateur)

Provient des études en support  
de l'augmentation récente de la  
teneur Pu autorisée en MOX

Production (Tréf 5 ans)	EPR UOX	EPR 30% MOX	EPR 100% MOX	CORAIL	MIX 9.54% Pu
Pu (kg/TWhe)	+28	+3	-58	≈ 0	-43
AM (kg/TWhe)	+3,3	+4,7	+13,3	+8,6	+10,2



# LES PRINCIPALES HYPOTHESES

**Production électrique nette moyenne** : # 420 TWhe/an (puissance électrique installée plafonnée à 63.2GWe)

## Réacteurs et usines du cycle :

- Renouvellement des REP actuels par des EPR (Kp en hausse de 78% à 83%)
- Durée de fonctionnement des réacteurs:
  - 50% des REP 900 MWe : 50 ans
  - Tous les autres REP : 60 ans
  - Parc futur EPR et RNR : 60 ans
- Simulation des cœurs de démarrage et d'arrêt pour les EPR
- Gestions EPR 30% MOX: premier chargement MOX au bout de ~7 ans (4 cycles)
- Recyclage de l'URT supposé repris à l'horizon 2025 (Gestions EPR URE)
- Durée de vie des nouvelles usines du cycle = 50 ans, renouvellement des usines actuelles en 2040

*Hypothèses cohérentes  
avec IN2018*

## Scénarios avec multi-recyclage en RNR :

- Introduction ASTRID 600MWe fin années 30
- Introduction 2 RNR 1000MWe 25 ans plus tard
- 1<sup>ère</sup> flotte RNR 1450MWe horizon fin de siècle – mise en place du multi-recyclage

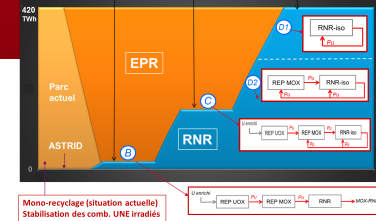
## Scénarios avec multi-recyclage en REP

- Introduction progressive des gestions MIX/CORAIL avec un 1<sup>er</sup> cœur complet en 2045

# PERFORMANCE TECHNIQUE DES OPTIONS DE CYCLE (APPROCHE À L'ÉQUILIBRE)

## Composition du parc et MATIERES

Hypothèse ≈ 420 TWhe/an



## Options de déploiement progressif de RNR et fermeture du cycle

	Palier A	Palier B (incluant Astrid-600)	Palier C (optimisé)	Palier D2 (hybride REP/RNR)	Palier D1 (100% RNR)	Palier 0 Cycle ouvert
Fraction GWe RNR	0	4,5%	31%	73%	100%	0
Consommation Unat (t/an)	6000	5700	3400	0	0	7500
Production nette de Pu (t/an)	7,2	6,8	0	0	0	9,9
Production AM (t/an)	3,3	3,1	4,4	3,4	2,3	2,7
+ répartition Np, Am, Cm	1,12 / 2,10 / 0,03	0,97 / 2,08 / 0,05	0,85 / 3,41 / 0,13	0,6 / 2,7 / 0,1	0,89 / 1,44 /- 0,03	1,15 / 1,51 / 0,01
Production <sup>241</sup> Am (t/an)	1,7	1,7	2,6	1,8	1,1	1,4
Accroissement inventaire de comb. usés (t/an)	180	130	0	0	0	950

# PERFORMANCE TECHNIQUE DES OPTIONS DE CYCLE (APPROCHE À L'ÉQUILIBRE)

## Composition du parc et MATIERES

Hypothèse ≈ 420 TWhe/an

## Options de multi-recyclage en REP

	Palier A (sans gestion URE)	Palier A (avec gestion URE)	CORAIL (CORAIL- 2000)	MIX 9.54% (avec gestion URE)	MIX 9.54% (sans gestion URE)	Palier D1 (100% RNR)	Palier 0 Cycle ouvert
Fraction GWe MIX/CORAIL ou MOX RNR	0	0	87%	35%	35%	100%	0
Consommation Unat (t/an)	6800	6000	6300	5500	6900	0	7500
Production de Pu (t/an)	<i>Non estimé</i>	7,2	0	0	0	0	9,9
Production AM (t/an) + répartition Np, Am, Cm	3,0  1,17 / 1,81 / 0,03	3,3  1,12 / 2,10 / 0,03	4,2  1,25 / 2,90 / 0,10	4,5  1,55 / 2,87 / 0,10	4,2  1,21 / 2,89 / 0,10	2,3  0,89 / 1,44 /- 0,03	2,7  1,15 / 1,51 /0,01
Production d' <sup>241</sup> Am (t/an)	<i>Non estimé</i>	1,7	1,8	1,7	1,7	1,1	1,4
Accroissement inventaire de comb. usés (t/an)	90	180	0	0	0	0	950

# PERFORMANCE TECHNIQUE DES OPTIONS DE CYCLE (APPROCHE À L'ÉQUILIBRE)

## Composition du parc et DECHETS

Hypothèse ≈ 420 TWhe/an

### Options de déploiement progressif de RNR et fermeture du cycle

	Palier A	Palier B (incluant Astrid-600)	Palier C (optimisé)	Palier D2 (symbiotique REP/RNR)	Palier D1 (100% RNR)	Palier 0 Cycle ouvert
Fraction GWe RNR	0	4,5%	31%	73%	100%	0
Déchets HA (m <sup>3</sup> de colis primaire/TWh)	0,26 CSD-V	0,29 CSD-V	0,51 CSD-V	0,48 CSD-V	0,32 CSD-V	1,8
Déchets MAVL (m <sup>3</sup> /TWh)	0,89	0,97	1,25	1,46	1,37	0,07

(\*) combustible utilisé à considérer pour options A, B et 0 (cf. T10)

### Options de multi-recyclage en REP

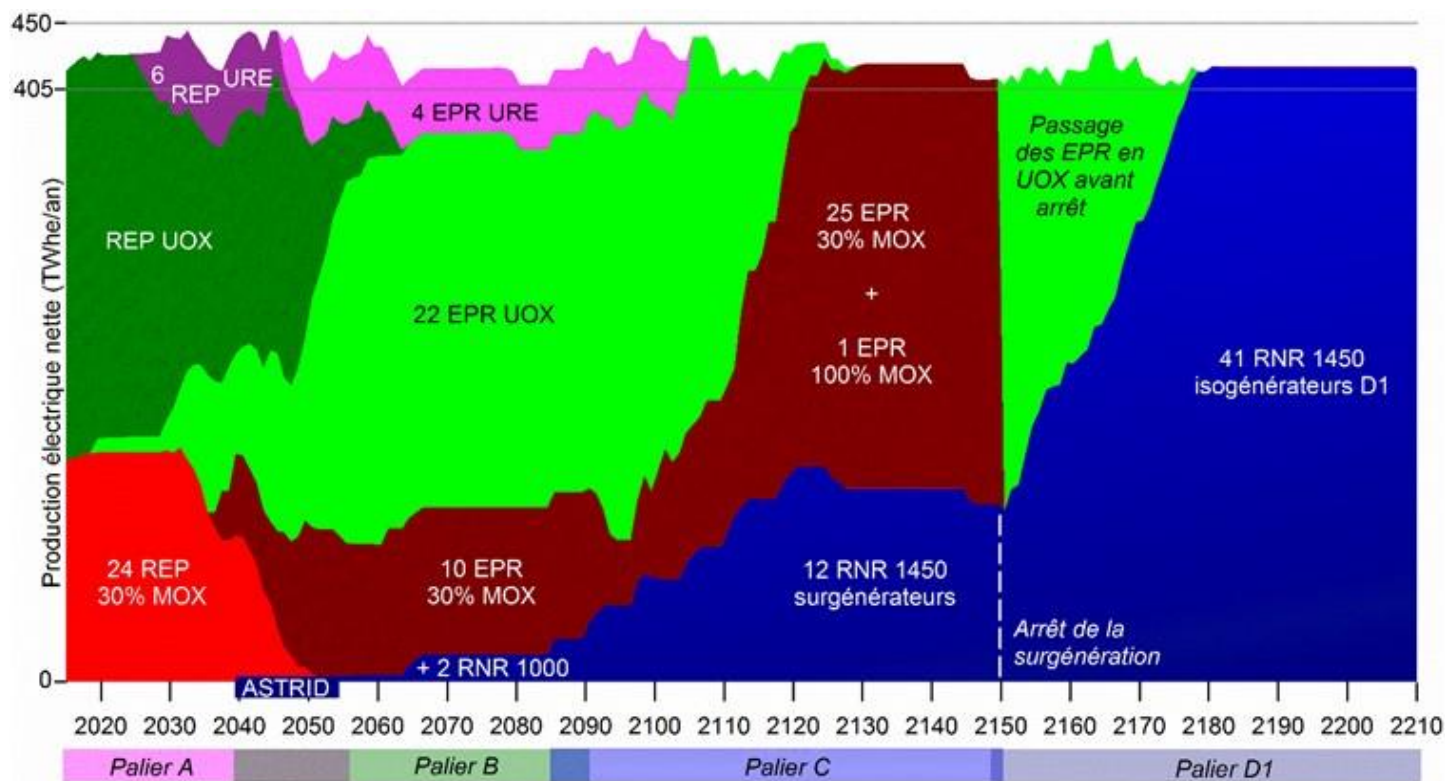
	Palier A (avec gestion URE)	CORAIL (CORAIL- 2000)	MIX 9.54% (avec gestion URE)	Palier D1 (100% RNR)	Palier 0 Cycle ouvert
Fraction GWe MIX/CORAIL ou MOX RNR	0	87%	35%	100%	0
Déchets HA (m <sup>3</sup> de colis primaire/TWh)	0,26 CSD-V	0,52 CSD-V	0,52 CSD-V	0,32 CSD-V	1,8
Déchets MAVL (m <sup>3</sup> /TWh)	0,89	1,10	1,11	1,37	0,07

(\*) combustible utilisé à considérer pour options A et 0 (cf. T11)

## Scénarios de déploiement progressif RNR

Hypothèse  $\approx 420$  TWhe/an

Exemple : Scénario de transition ABCD1



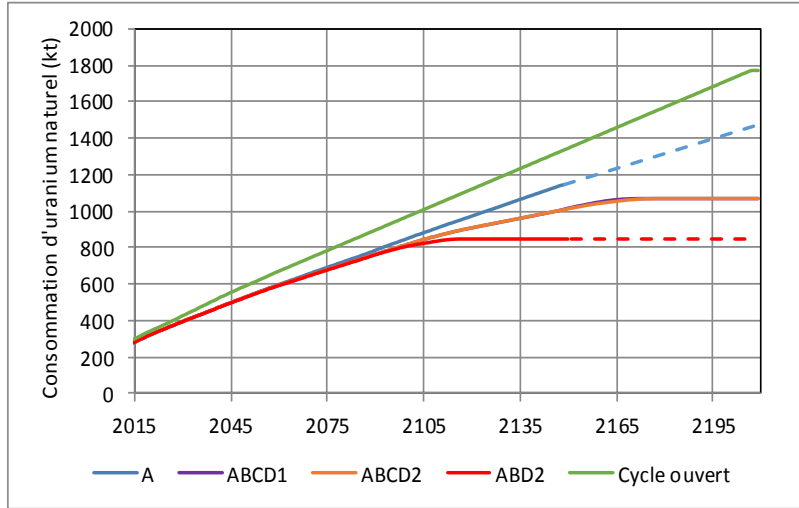
Dates données à titre indicatif pour les besoins d'évaluation des scénarios

# PERFORMANCE TECHNIQUE DES SCENARIOS DE TRANSITION (APPROCHE DYNAMIQUE)

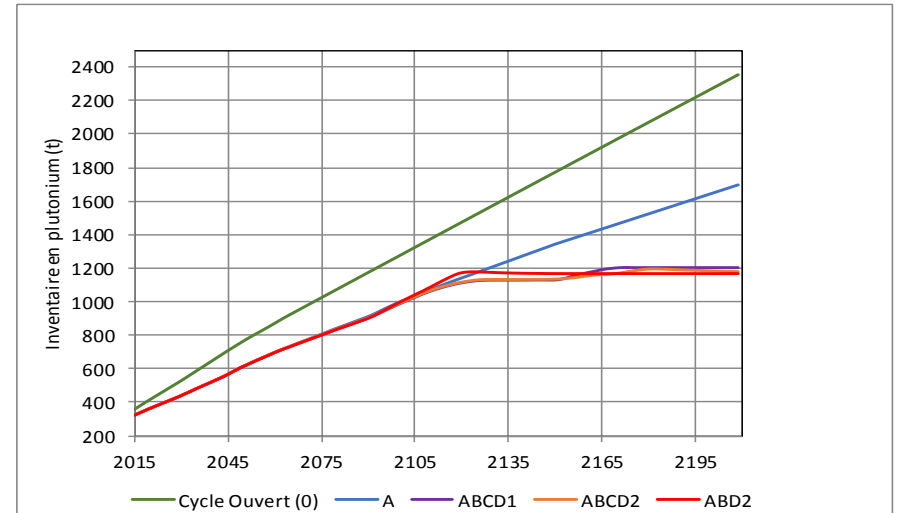
## Scénario déploiement progressif RNR

Hypothèse ≈ 420 TWhe/an

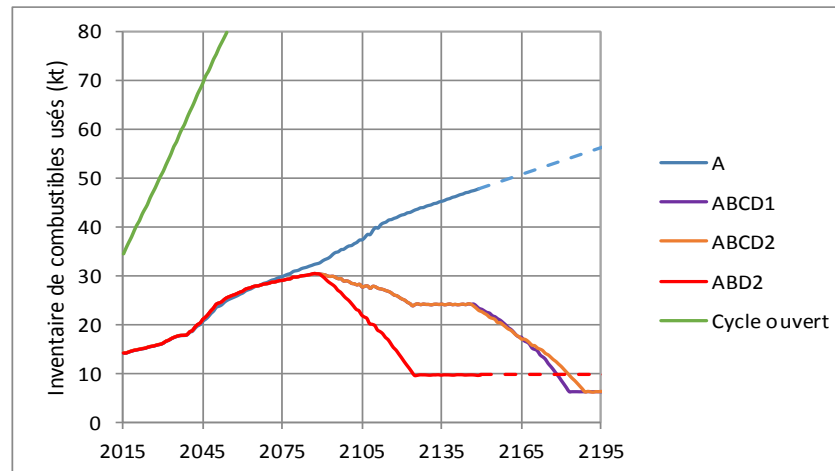
PRINCIPAUX RESULTATS



Conso. en **Unat** diminue jusqu'à atteindre 0



**Inventaire Pu** stabilisé

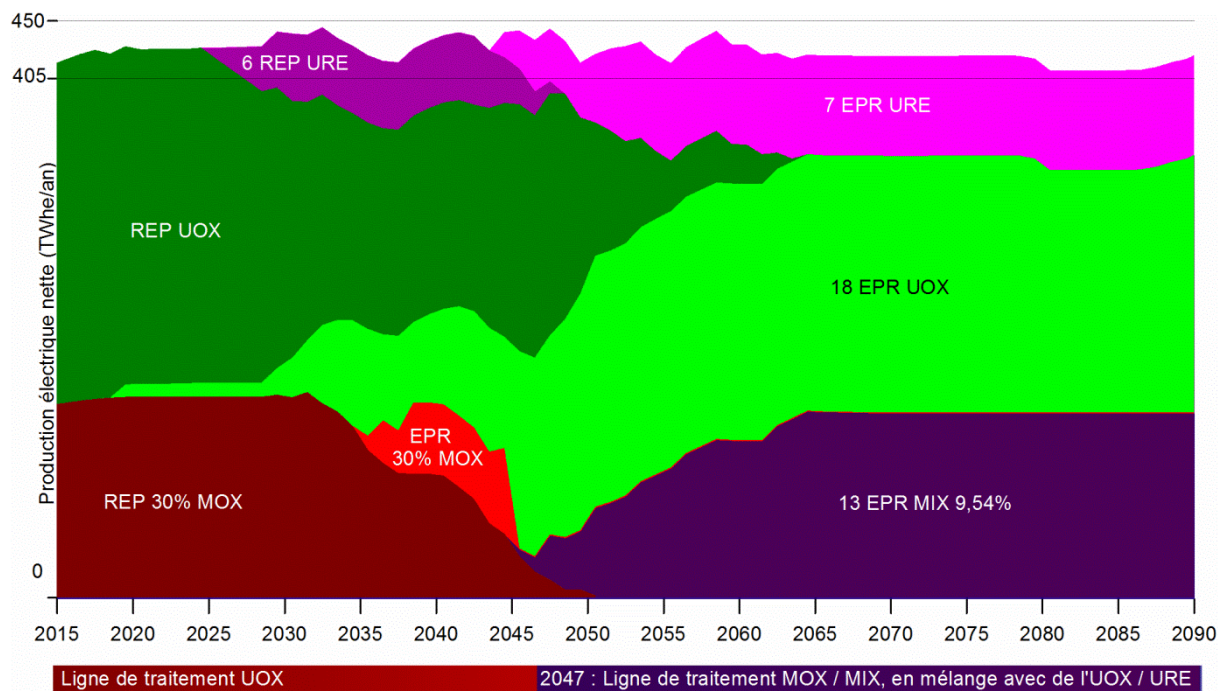


**Inventaire en CU** stabilisé à partir du palier C

## Scénarios de multi-recyclage de l'U et du Pu en REP

Hypothèse  $\approx 420$  TWhe/an

Exemple : Scénario avec le concept MIX



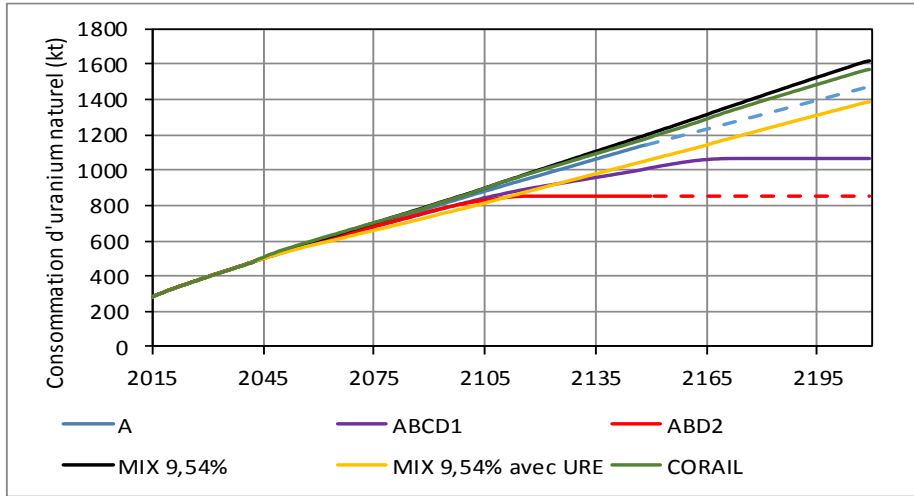
Dates données à titre indicatif pour les besoins d'évaluation des scénarios

# PERFORMANCE TECHNIQUE DES SCENARIOS DE TRANSITION (APPROCHE DYNAMIQUE)

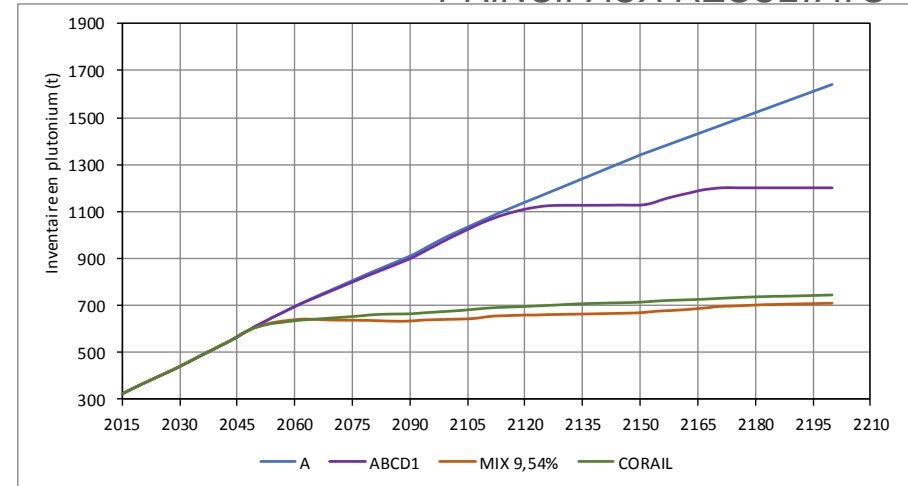
## Scénarios de multi-recyclage de l'U et du Pu en REP

Hypothèse ≈ 420 TWhe/an

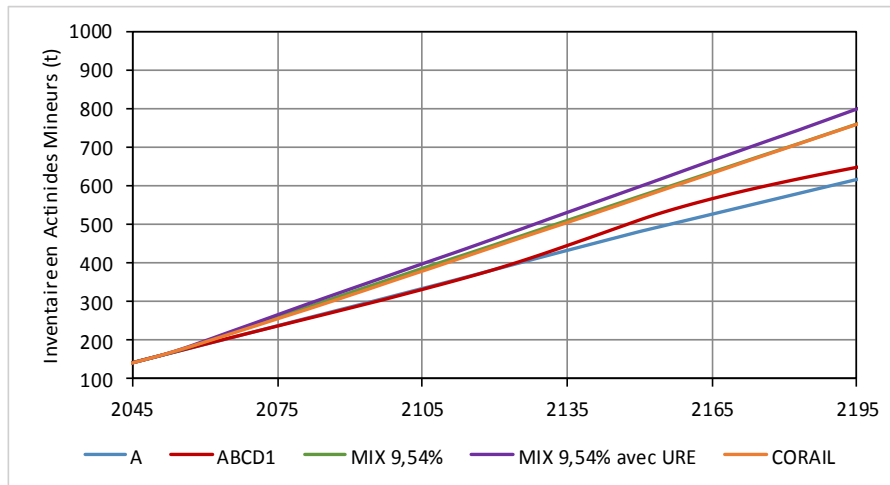
PRINCIPAUX RESULTATS



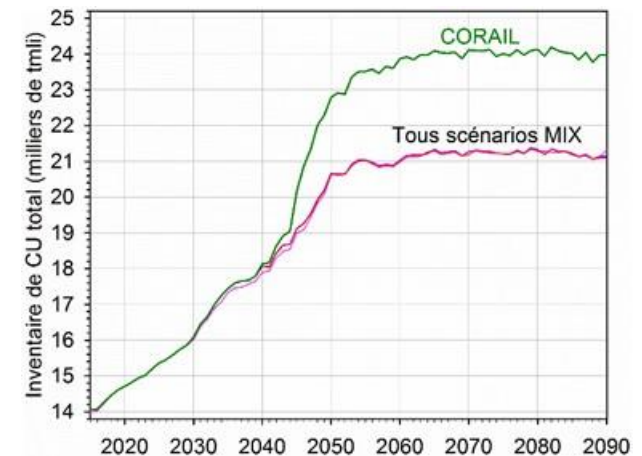
Faible économie en **Unat**



**Inventaire Pu** stabilisé



Production accrue d'**AM** → impact sur le nombre de colis de verres  
→ impact sur l'emprise HA



Stabilisation possible des **inv. CU**

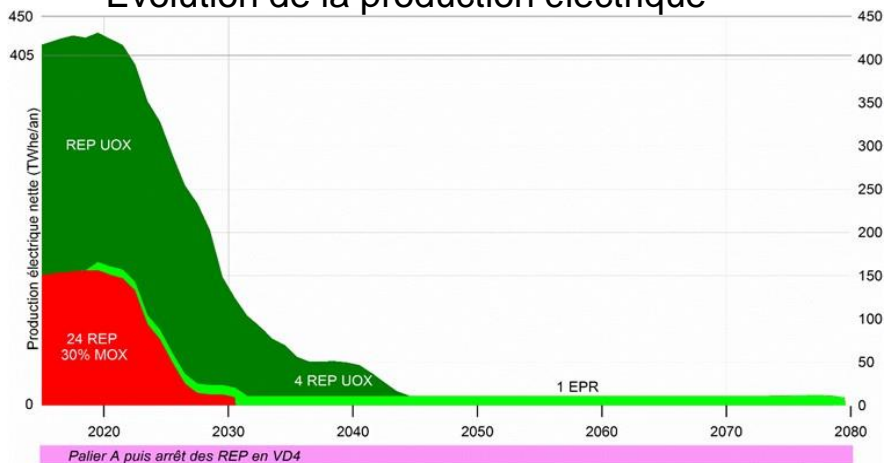


## Scenarios arrêt du parc

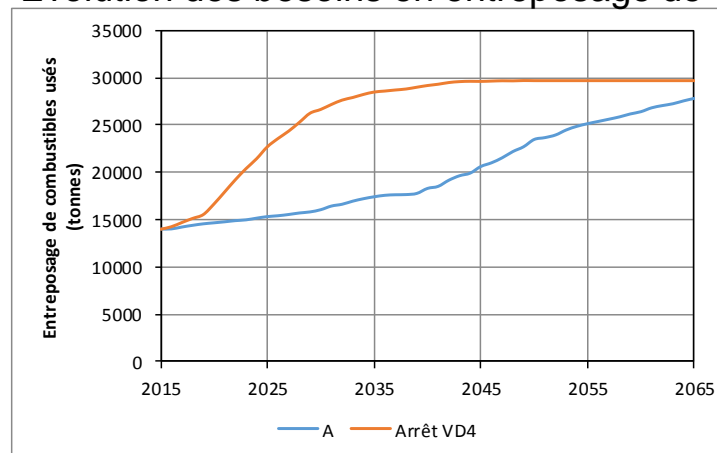
### Principe et hypothèses du scénario:

- Parc constitué des 58 réacteurs actuels et de l'EPR Flamanville 3 (FLA3)
- Arrêt du parc REP actuel après 40 ans de fonctionnement
- Arrêt de l'EPR FLA3 après 60 ans de fonctionnement
- Adaptation du flux de traitement à la fermeture des tranches moxées

### Evolution de la production électrique



### Evolution des besoins en entreposage de CU



Arrêt du parc:

Accroissement rapide des inventaires de combustibles usés en entreposage

	Arrêt REP à VD4 (stock en 2040)
CU UOX	# 25 000 t
CU URE	# 700 t
CU MOX	# 3 270 t



## Etude réalisée en collaboration avec l'Andra

### Principales hypothèses:

- Roche argileuse similaire à la couche d'argilites étudiée en Meuse/Haute-Marne pour le projet Cigéo
- Critère de dimensionnement thermique: 90°C en paroi de colis de stockage
- Prise en compte de critères de dimensionnement THM → dimensionnant dans la majorité des cas

### Des études de sensibilité ont été menées:

- Sensibilité à la profondeur
- Sensibilité à la durée d'entreposage
- Sensibilité aux caractéristiques physiques de la roche argile (conductivité thermique, module d'Young, porosité)

## Estimation des emprises des déchets HA pour les différents paliers exploités 60 ans et après 80 ans d'entreposage



Paliers	Emprise Colis de verre (m <sup>2</sup> /TWh)	Surface Colis de verre (km <sup>2</sup> )	Puissance thermique annuelle des <b>Colis de verre</b> à stocker, après 80 ans d'entreposage (kW)	Puissance thermique annuelle des <b>Combustibles usés</b> à stocker, après 80 ans d'entreposage (kW)	Puissance thermique <b>totale</b> annuelle à stocker, après 80 ans d'entreposage (kW)	Type de combustible usé
0	-	-	0	553	553	UOX
A	165	4,1	188	335	523	URE MOX-REP
B	245	6,1	236	171	407	URE MOX-RNR
B Astrid	275	6,8	248	140	388	URE MOX-RNR
C	605	15,3	423	0	423	-
D1	340	8,6	300	0	300	-
D2	565	14,4	431	0	431	-
MIX 9,54 % URE	585	14,9	439	0	439	-
MIX 12 %	620	15,7	460	0	460	-
CORAIL	595	15,0	446	0	446	-

Emprises HA (verres):

Paliers MIX et CORAIL : emprises voisines de celles des paliers C et D2

Palier D1 (100% RNR): emprise la plus faible par rapport à C, D2, MIX et CORAIL (plus faible production d'AM)

Emprises Combustible usés (cycle ouvert, palier A, palier B) : restent à préciser

## ■ Déploiement progressif des RNR avec multi-recyclage de l'U et du Pu

*Les caractérisations complémentaires menées par rapport aux études rapportées dans le Dossier 2015 confirment que l'évolution du cycle « mono-recyclage » vers un cycle fermé conduit à améliorer, à chacun des paliers, les grandeurs caractéristiques d'une gestion durable du cycle lorsque l'évolution du marché de l'U justifie l'investissement dans un parc RNR*

*Consommation en Unat, valorisation des CU MOX et URE, production de déchets ultimes*

## ■ Multi-recyclage de l'U et du Pu en REP

*Les 1<sup>ères</sup> évaluations sur les concepts MIX et CORAIL indiquent une capacité à recycler les CU MOX et URE → stabilisation de tous les inventaires de combustibles usés et de l'inventaire Pu (potentiellement à un niveau < à celui requis en cas déploiement volontariste RNR à puissance constante)*

*Economie supplémentaire de ≈10% en Unat par rapport au mono-recyclage actuel si associé au recyclage total de l'URT*

*Concept MIX mobilise ≈30% du parc; fraction supérieure pour le concept CORAIL-2000*

*Augmentation de la production d'actinides mineurs de l'ordre de +30% par rapport au mono-recyclage*

## ■ Emprise au stockage

*Evaluation au regard du critère THM en s'appuyant sur les résultats établis par l'Andra*

*Emprise des colis de verres (HA): palier A < palier B < palier D1 < paliers C, D2, CORAIL, MIX*

*Mais des combustibles usés à stocker pour les options A, B, cycle ouvert: emprise non encore évaluée*

**ÉLÉMENTS PRÉLIMINAIRES DE  
FAISABILITÉ INDUSTRIELLE SUR LE  
MULTI-RECYCLAGE EN REP**

## Premiers résultats obtenus en 2017 et 2018 :

- Calculs neutroniques préliminaires sur différents concepts MIX et CORAIL :
  - Effet de vidange, calculs de point chaud => **premiers résultats encourageants pour MIX 8% et CORAIL**
- Evaluation par Orano d'un **concept type CORAIL optimisé permettant plus de flexibilité et réduisant le nombre de réacteurs impactés** (nombre des crayons MOX plus élevé).

## Les études qu'il reste à mener sont :

- Domaine de qualification des codes et méthodes à étendre
- Calculs neutroniques complémentaires :
  - calculs de vidange
  - calculs sur les cœurs de transition et de démarrage, réversibilité.
- Calculs de sûreté (bilan des marges, scénarios accidentels) et évaluation des modifications à apporter à la chaudière (grappes, C Bore)

**Si les études confirment la faisabilité, il faudra réaliser une campagne exhaustive d'essais de qualification en réacteur afin d'obtenir le licensing des nouveaux produits combustibles de multi-recyclage**

## Premiers résultats obtenus en 2017 et 2018 :

### - Identification des capacités des usines du cycle pour un déploiement sur l'ensemble du parc:

#### - Cas du MIX :

- capacité de fabrication d'assemblage MIX jusqu'à 300 t/an avec autorisation de mélanger du plutonium avec de l'uranium enrichi (limite actuelle de MELOX à 1,2%)

- capacité industrielle de traitement des MOX / MIX en mélange avec les UOX

#### - Cas du CORAIL :

- capacité de fabrication de crayons MOX jusqu'à 300 t/an et atelier d'assemblage de capacité environ x3 capacité crayons.

- capacité industrielle de traitement des MOX / CORAIL en mélange avec les UOX

### - Premier avis sur l'adaptabilité des usines actuelles pour une mise en œuvre progressive des produits MIX ou CORAIL :

- à partir du REX La Hague significatif de traitement des MOX étrangers (campagnes des années 2000) et du REX de fabrication d'assemblages REB MOX pour les clients étrangers.

=> Concept CORAIL plus « mature » industriellement

## Les études qu'il reste à mener sont :

- Gérer les transitions entre produits à la fabrication MOX / MIX ou CORAIL et entre produits MIX avec différents enrichissements en U235

- Optimiser les procédés des usines pour gérer l'augmentation des flux

- Evaluer la chaîne logistique

- Gérer l'augmentation de la production d'Actinides Mineurs à l'aval du cycle

*A fin 2018, les études préliminaires indiquent la possibilité de respecter les premiers critères de sûreté cœur investigués. L'ensemble des aspects fonctionnement et sûreté des réacteurs reste à instruire pour statuer sur la faisabilité. Pour un déploiement à l'échelle du parc, ces concepts nécessitent des capacités de gestion du plutonium triplées dans les usines du cycle et les périodes transitoires devront être ajustées aux capacités industrielles disponibles.*

*Dans le cas d'une mise en œuvre de façon transitoire entre le mono-recyclage actuel et le déploiement des RNR, les options de multi-recyclage en REP permettent de faire progresser les procédés et la maturité industrielle des usines du cycle nécessaires au développement des RNR, les flux de plutonium et de combustible MOX à l'équilibre se situant à un niveau intermédiaire entre ceux nécessaires au mono-recyclage et ceux qui seraient nécessaires pour une flotte de RNR. Des étapes de ces procédés industriels sont toutefois de TRL bas et requièrent des travaux de recherche significatifs.*