



# Energie Nucléaire :

*Faut-il croire aux promesses?*

Marc Ernout, Pole Energie & Environnement

IJCLab, CNRS-IN2P3 / Université Paris-Saclay



- Quelques rappels de physique
  - Fission nucléaire
  - Réaction en chaîne
  - Combustible et déchets nucléaires
- Energie nucléaire et transition énergétique
  - Impact direct du nucléaire
  - Avec les ENR
- Vers des nouveaux réacteurs nucléaires?
  - Construire un nouveau réacteur
  - EPR 2
  - Start-ups

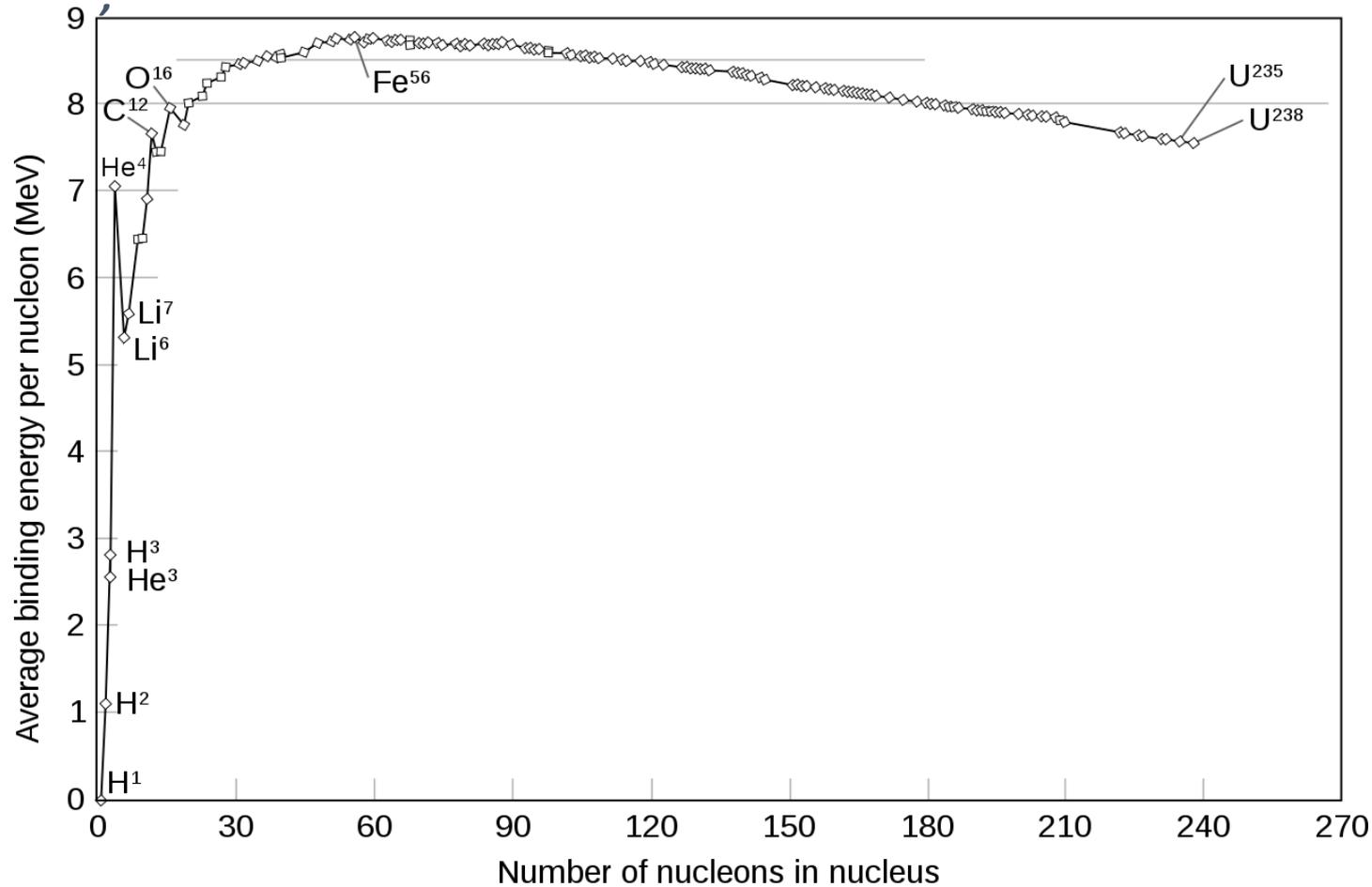


- Quelques rappels de physique
  - Fission nucléaire
  - Réaction en chaîne
  - Combustible et déchets nucléaires
- Energie nucléaire et transition énergétique
  - Impact direct du nucléaire
  - Avec les ENR
- Vers des nouveaux réacteurs nucléaires?
  - Construire un nouveau réacteur
  - EPR 2
  - Start-ups



# Quelques rappels de physique : La fission nucléaire

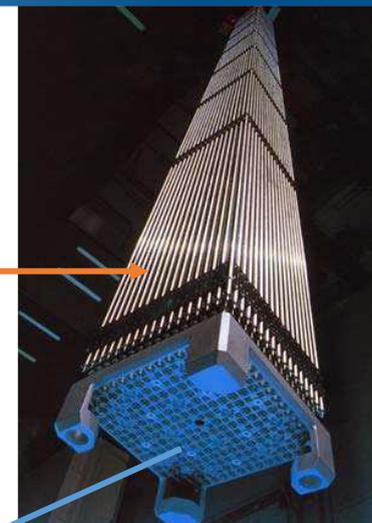
*La fission des noyaux lourds libère une grande quantité d'énergie (200 MeV)*



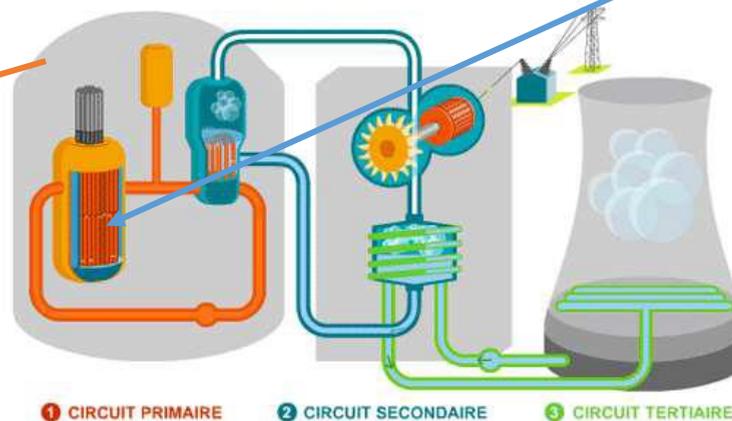


# Quelques rappels de physique : le réacteur

- Les noyaux lourds sont encapsulé dans les crayons
- Chaque assemblage est constitué de 264 crayons (17 x 17)



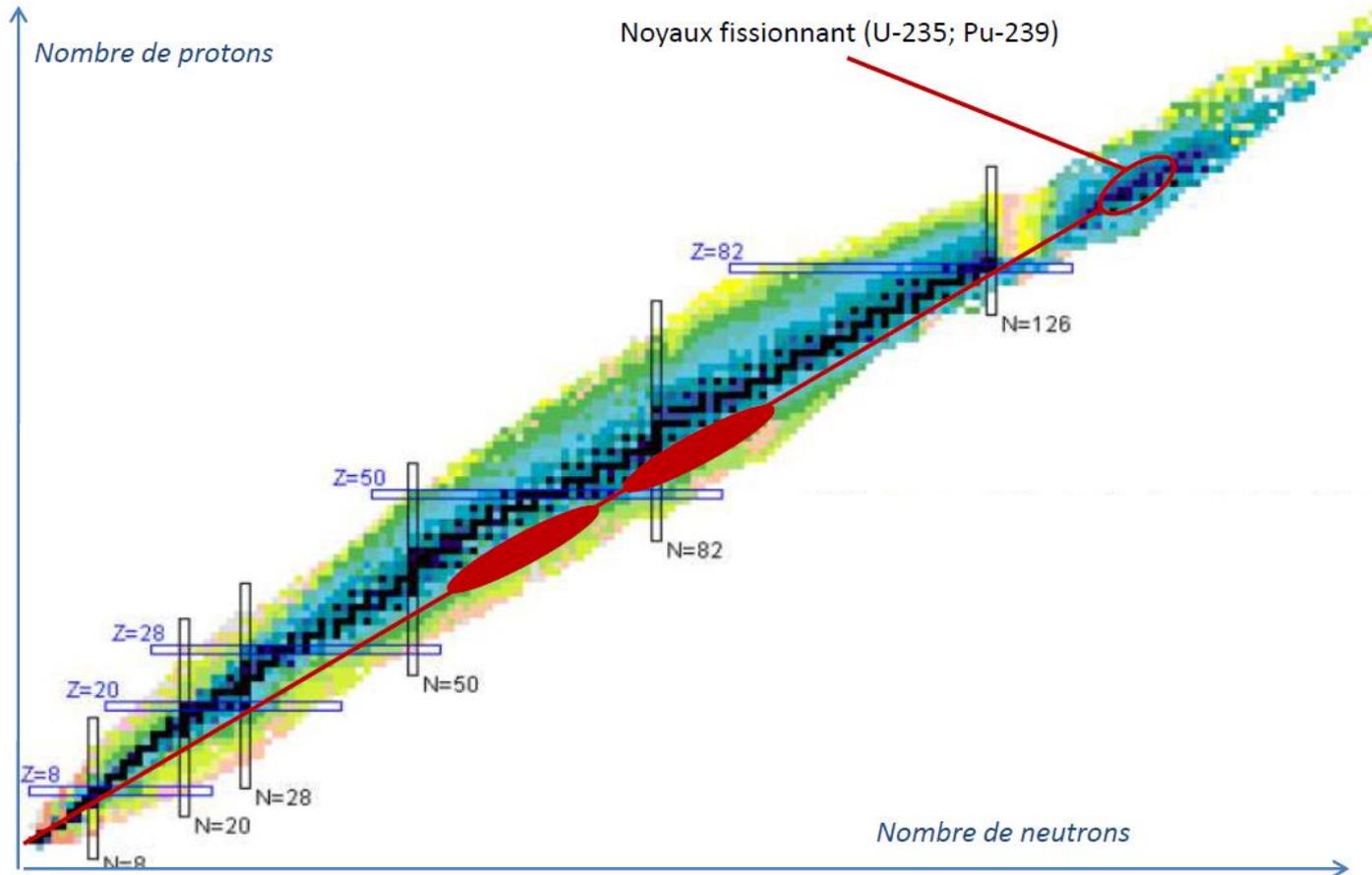
*L'eau circule dans l'espace entre les crayons - refroidit le combustible et ralentit les neutrons*





# Quelques rappels de physique : La fission nucléaire

*La fission des noyaux lourds libère une grande quantité d'énergie (200 MeV)  
produit deux fragments de fission et entre 2 et 3 neutrons*

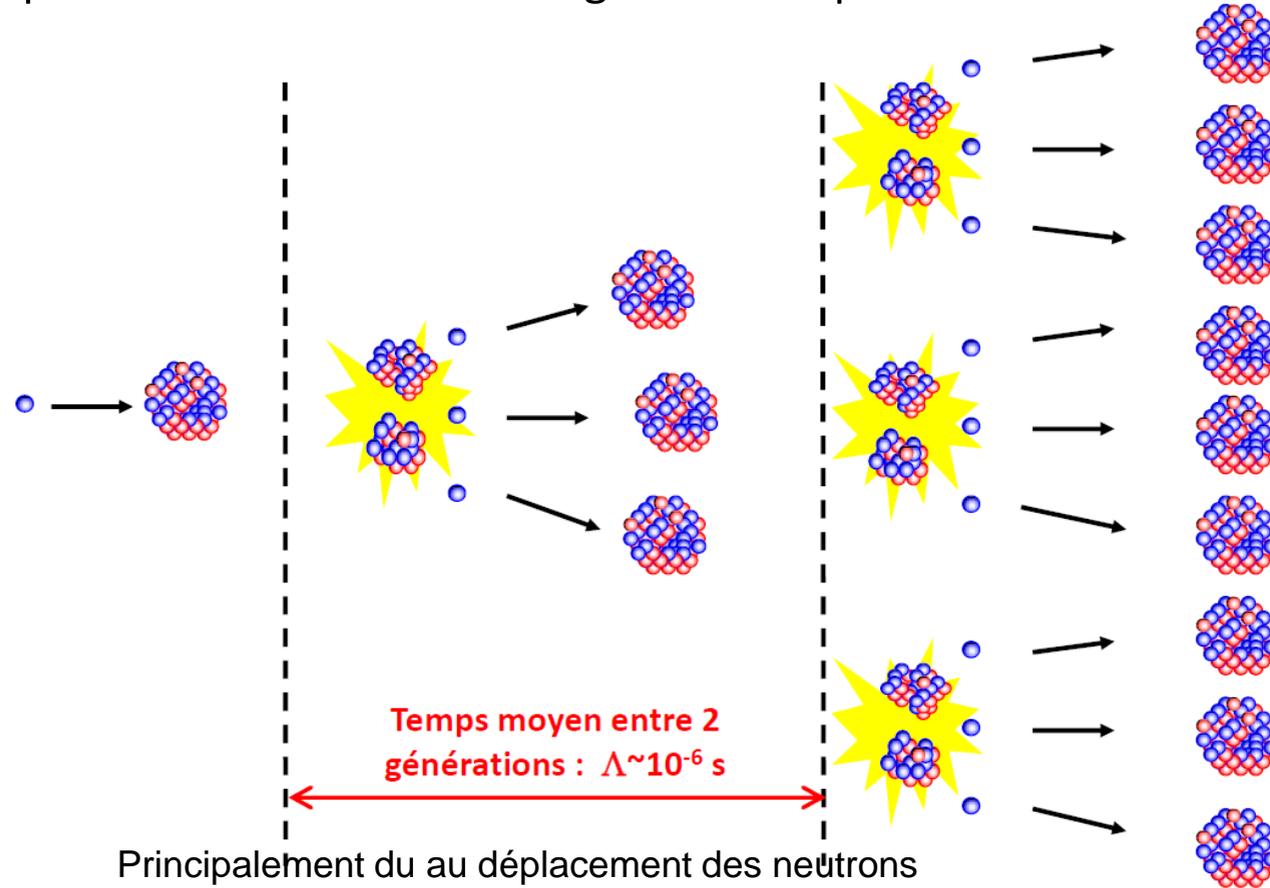




# Quelques rappels de physique : Réaction en chaîne

1W =>  $3 \cdot 10^{10}$  fissions par seconde

La production continue d'énergie est faite par le maintien de la réaction en chaîne

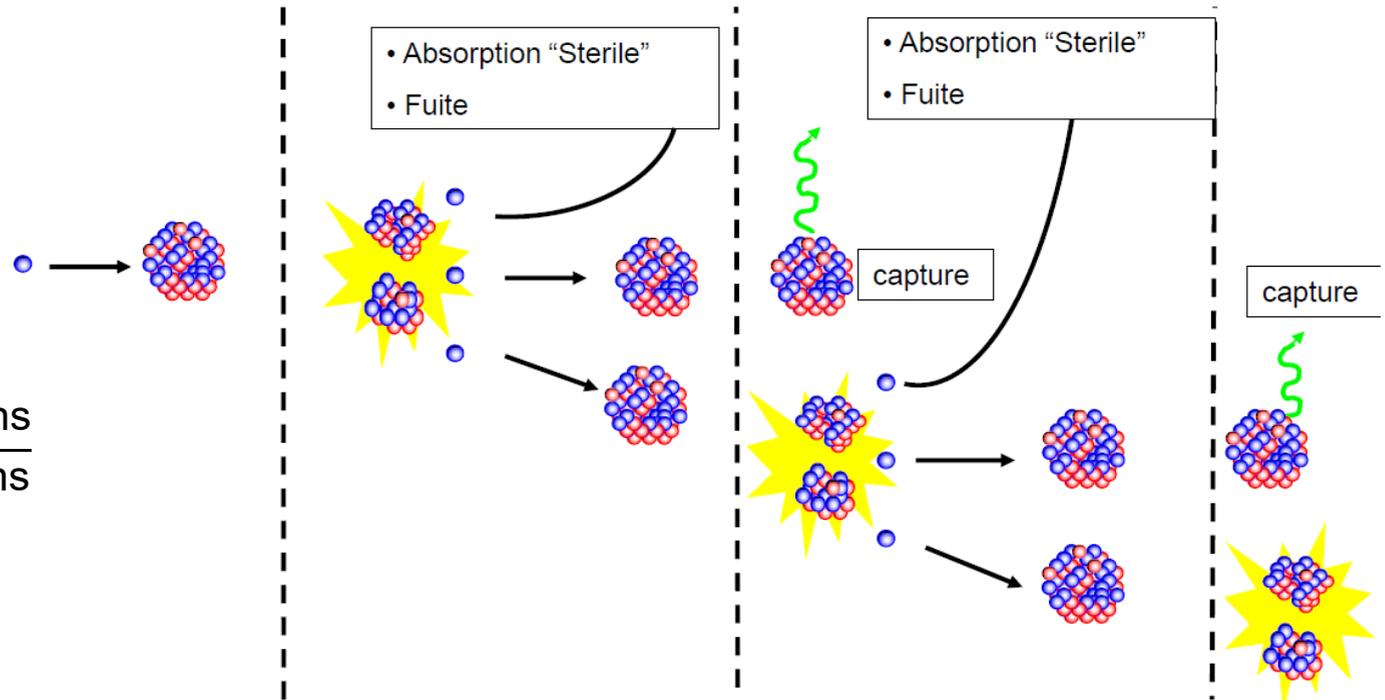




# Quelques rappels de physique : Réaction en chaîne

*On définit la criticité (ou la réactivité) ou la multiplication des neutrons ( $k$ )*

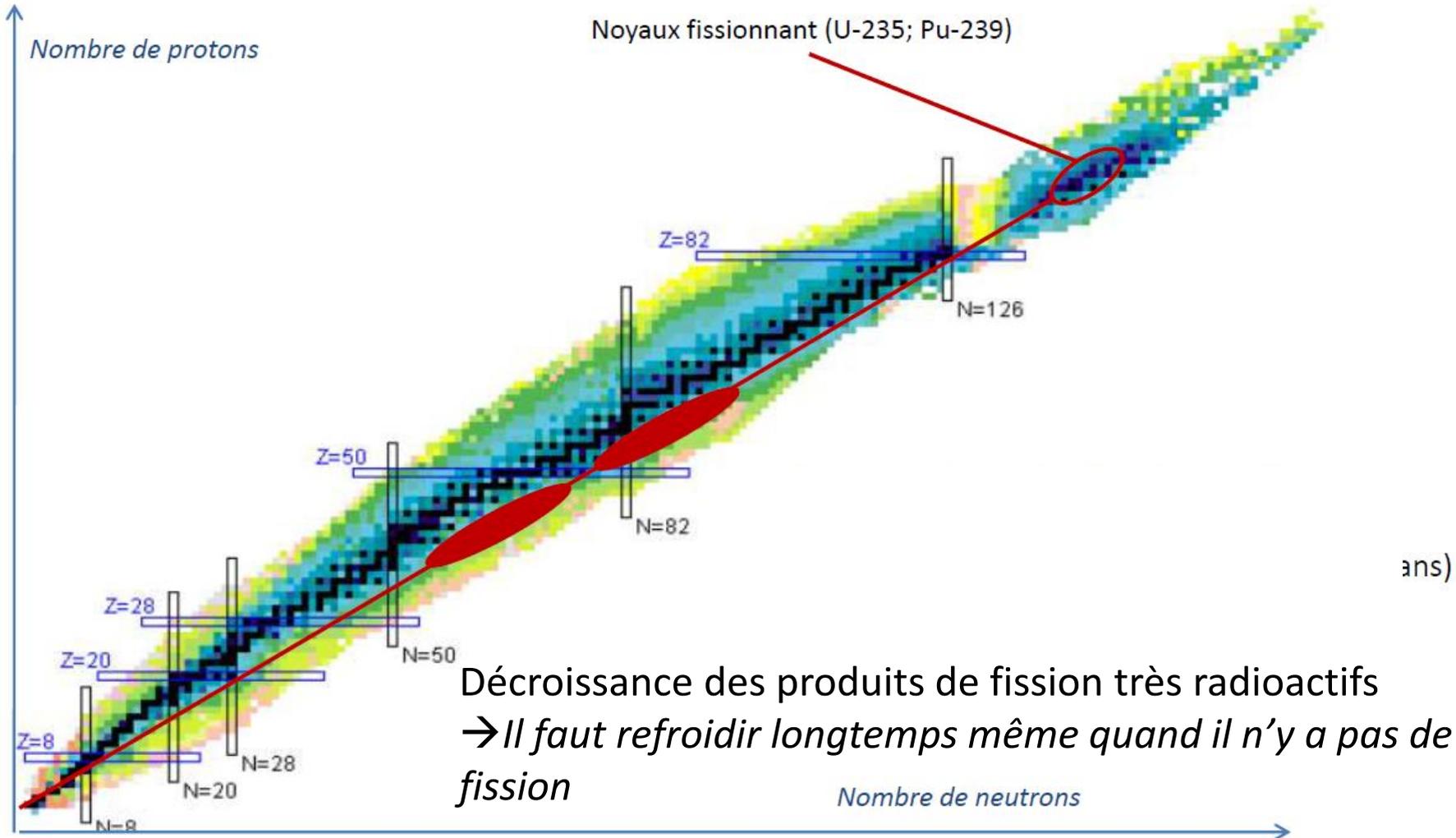
$$k_{eff} = \frac{\text{Production de neutrons}}{\text{Disparition de neutrons}}$$



**$k=1 \rightarrow$  Nombre de fission par seconde (= puissance) constant  $\rightarrow$  Réaction stable**

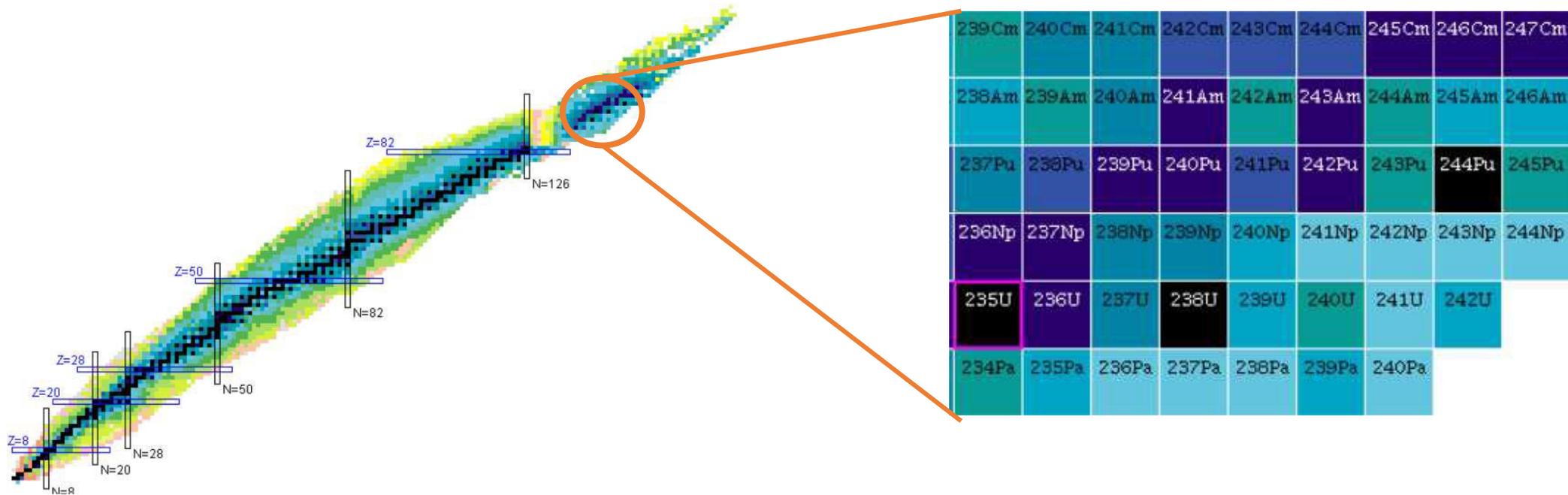


# Quelques rappels de physique : Combustible et déchets





# Quelques rappels de physique : Combustible et déchets

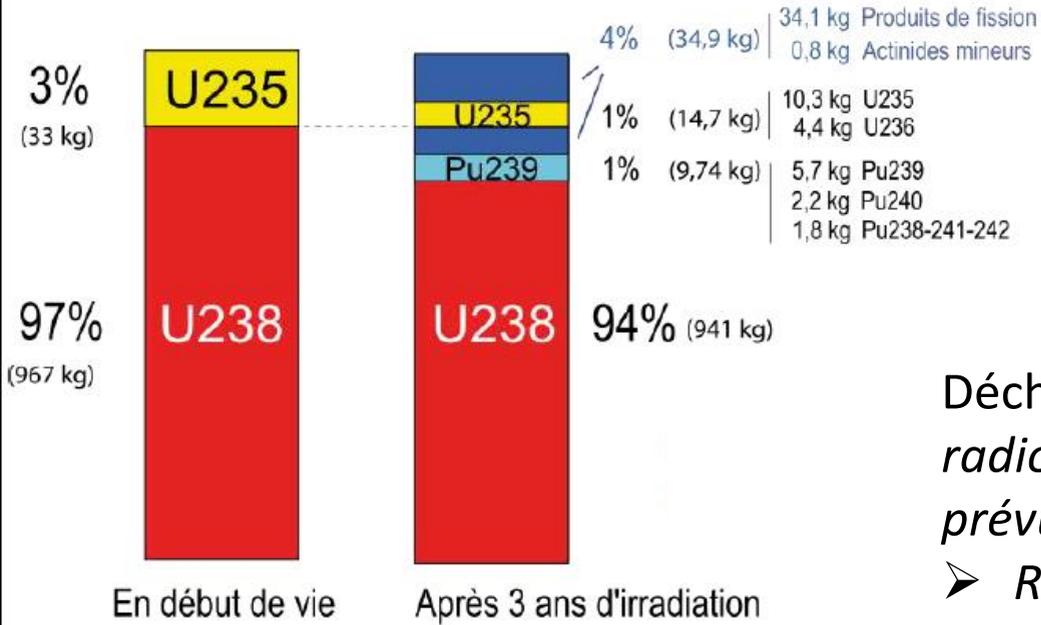


L'irradiation produit des noyaux lourds par captures neutroniques :

- Le plutonium est produit par capture sur l'238U
- Les autres éléments sont les actinides mineurs !



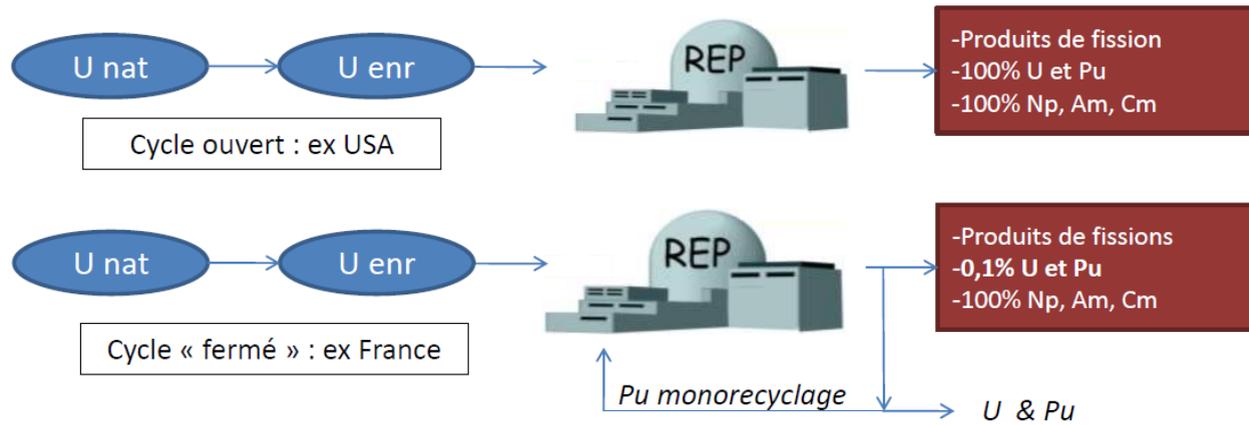
# Quelques rappels de physique : Combustible et déchets



« 96 % des combustibles usés sont ré-utilisable »

Déchets : « un déchet radioactif est une matière radioactive pour lequel aucune utilisation n'est prévue ni envisagée » loi française (2006)

➤ Recycler pour diminuer les déchets



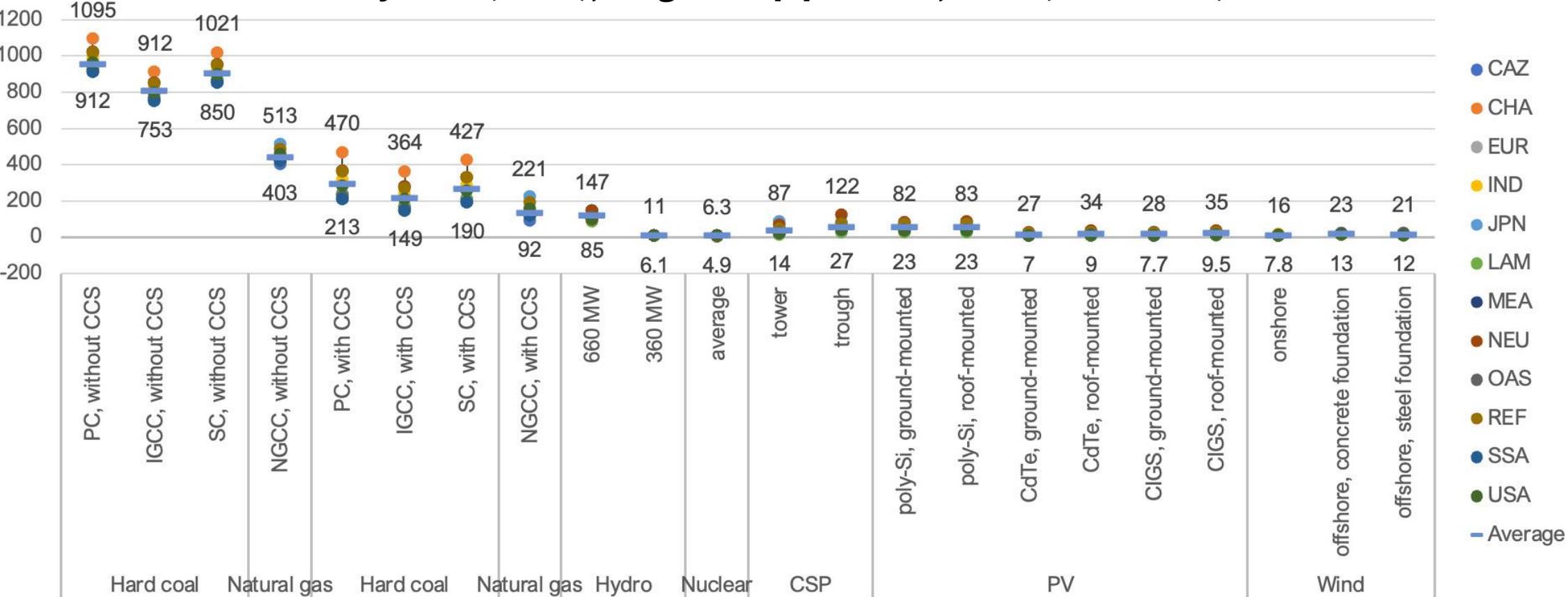


- Quelques rappels de physique
  - Fission nucléaire
  - Réaction en chaîne
  - Combustible et déchets nucléaires
- **Energie nucléaire et transition énergétique**
  - Impact direct du nucléaire
  - Avec les ENR
- Vers des nouveaux réacteurs nucléaires?
  - Construire un nouveau réacteur
  - EPR 2
  - Start-ups



# Nucléaire et transition énergétique : impact du nucléaire

**Emission moyenne ( ACV ), en g CO<sub>2</sub>eq. par kWh, 2020 (ONU 2022)**

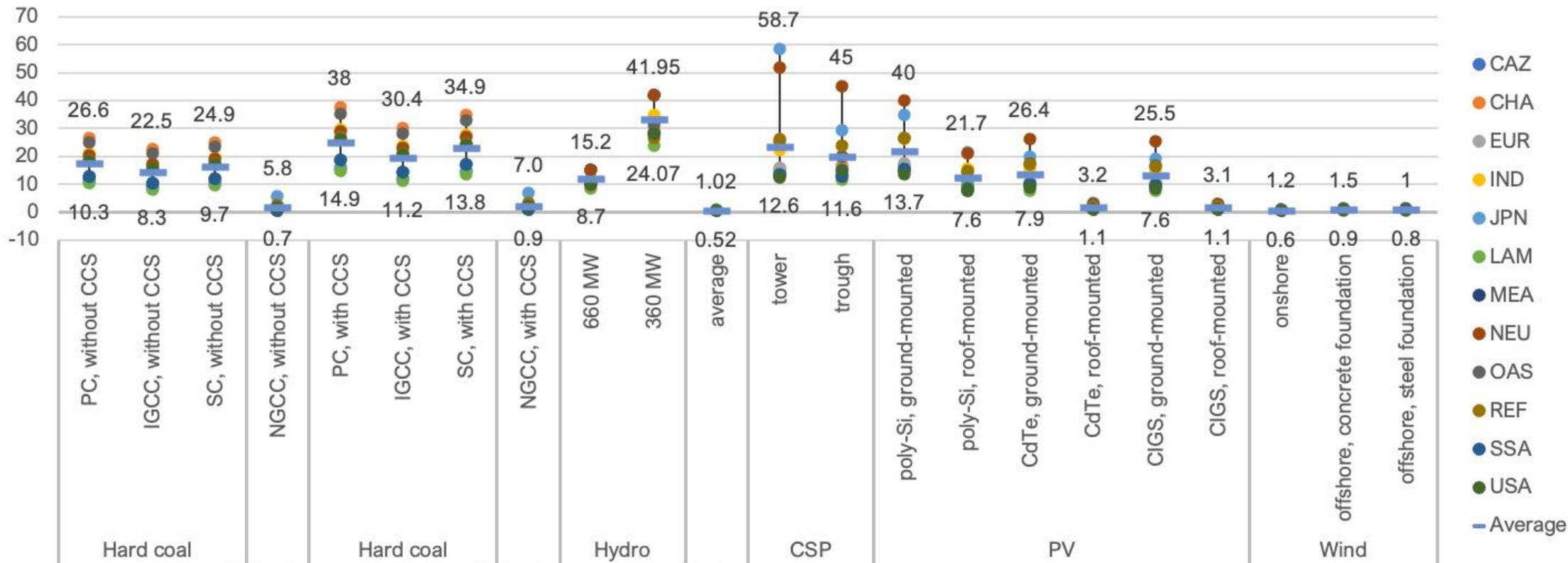


Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources  
 UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE, 2022



# Nucléaire et transition énergétique : impact du nucléaire

## Occupation spatiale, en m<sup>2</sup>.an par kWh, 2020 (ONU 2022)

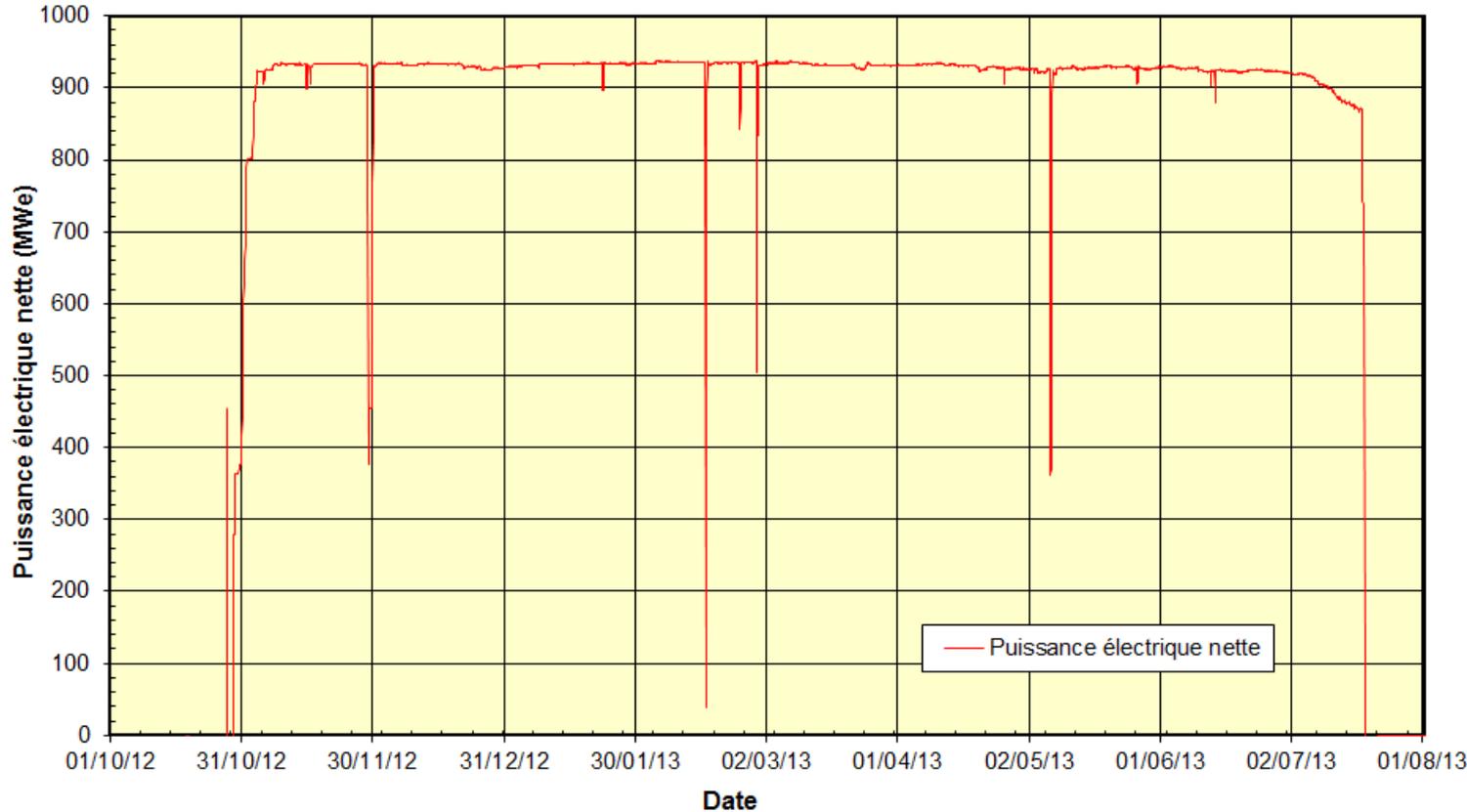


Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources  
UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE, 2022



# Nucléaire et transition énergétique : interaction ENR

BLAYAIS 3 campagne 29  
Diagramme de puissance électrique



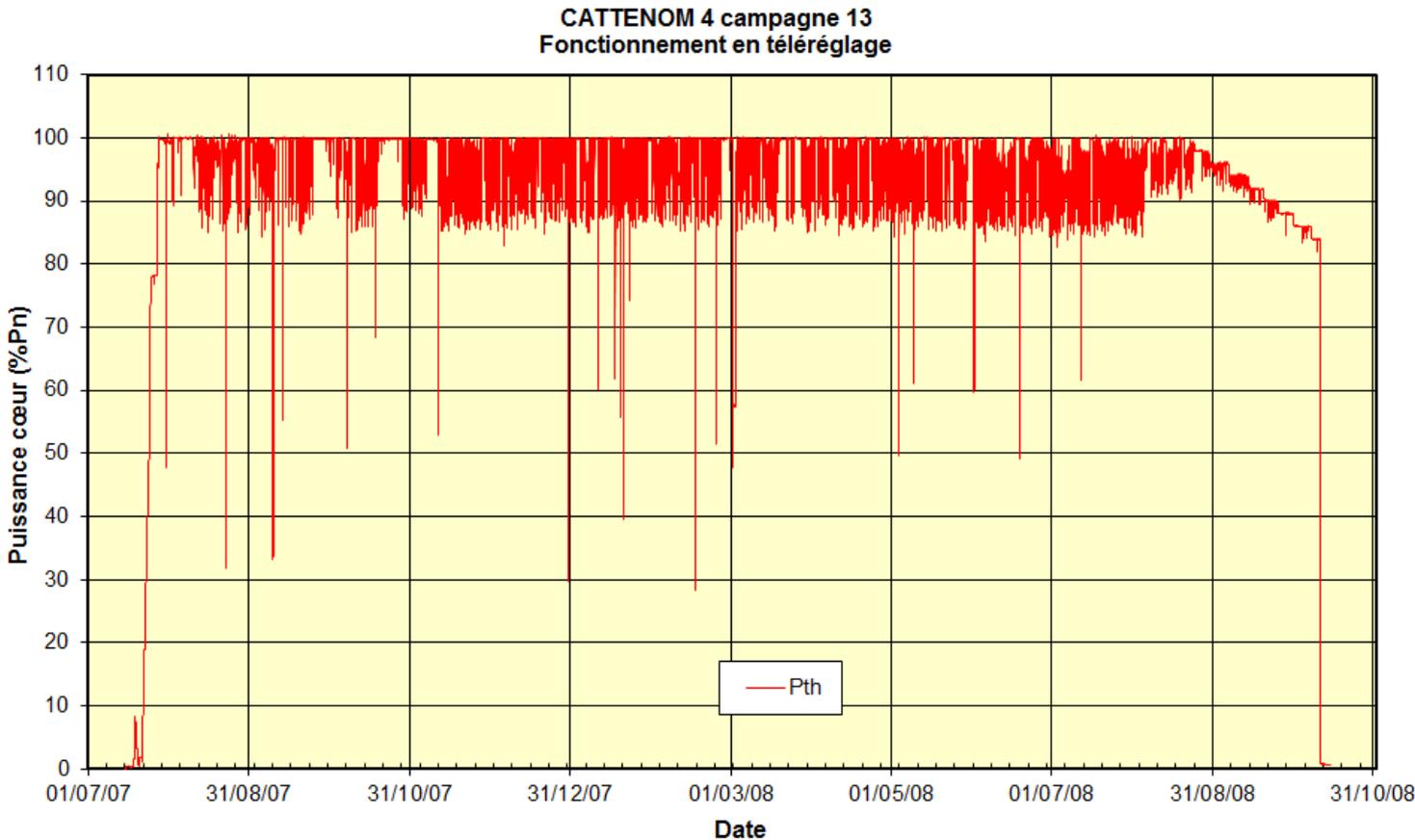
Le nucléaire est souvent utilisé en base

Puissance constante entre démarrage et arrêt

Arrêt pour rechargement et maintenance  
=> Programmable l'été



# Nucléaire et transition énergétique : interaction ENR



Participant au réglage des fréquences primaires, secondaires  
(On veut garder du 60Hz sur le réseau)

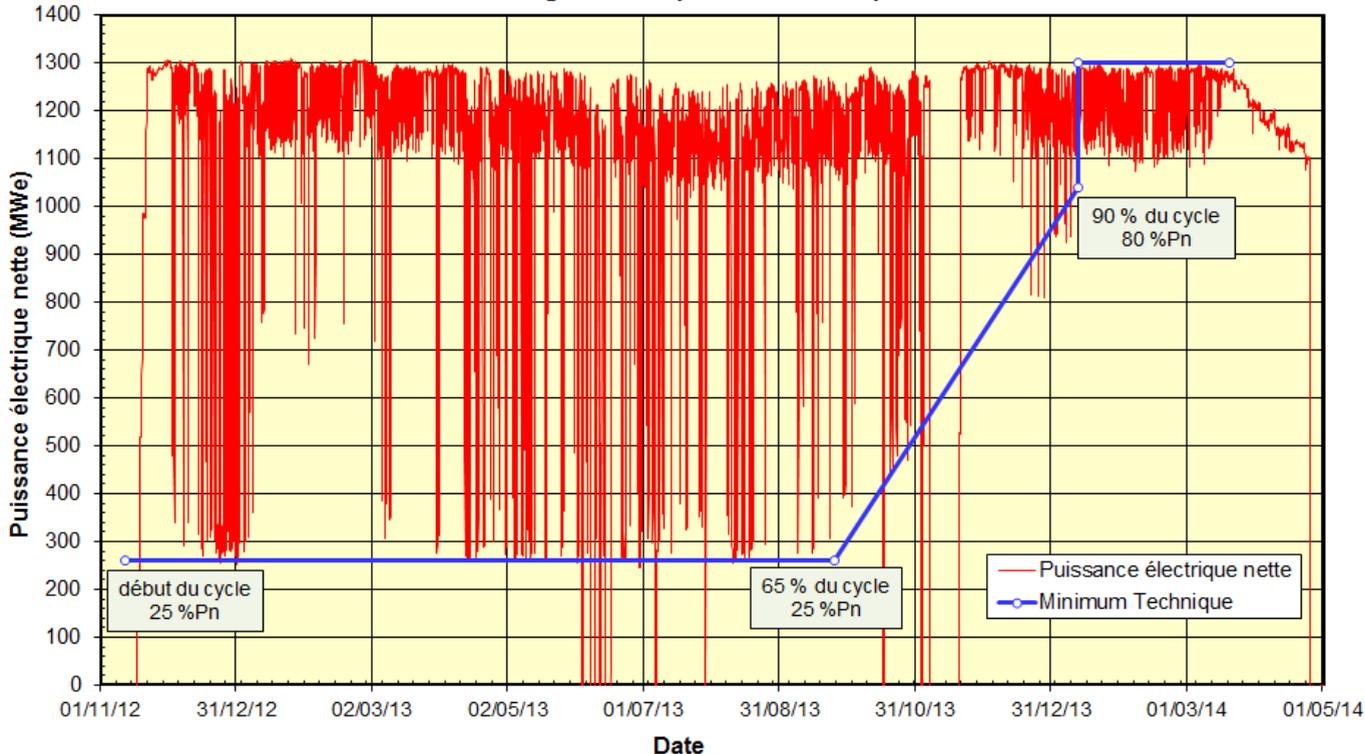
Variation [ 90% , 100% ] :  
pas de changement de température du cœur  
Insertion faible des barres

On peut le faire à volonté,  
mais c'est du travail en plus pour les opérateurs



# Nucléaire et transition énergétique : interaction ENR

GOLFECH 2 campagne 15  
Diagramme de puissance électrique



Baisse plus importante  
=> Changement de température de fonctionnement  
=> Stress sur les matériaux (dont le combustible)  
=> Nécessite réserve en réactivité pour remonter

Limites en nombre, durée et place dans le cycle.

Mais utilisé.

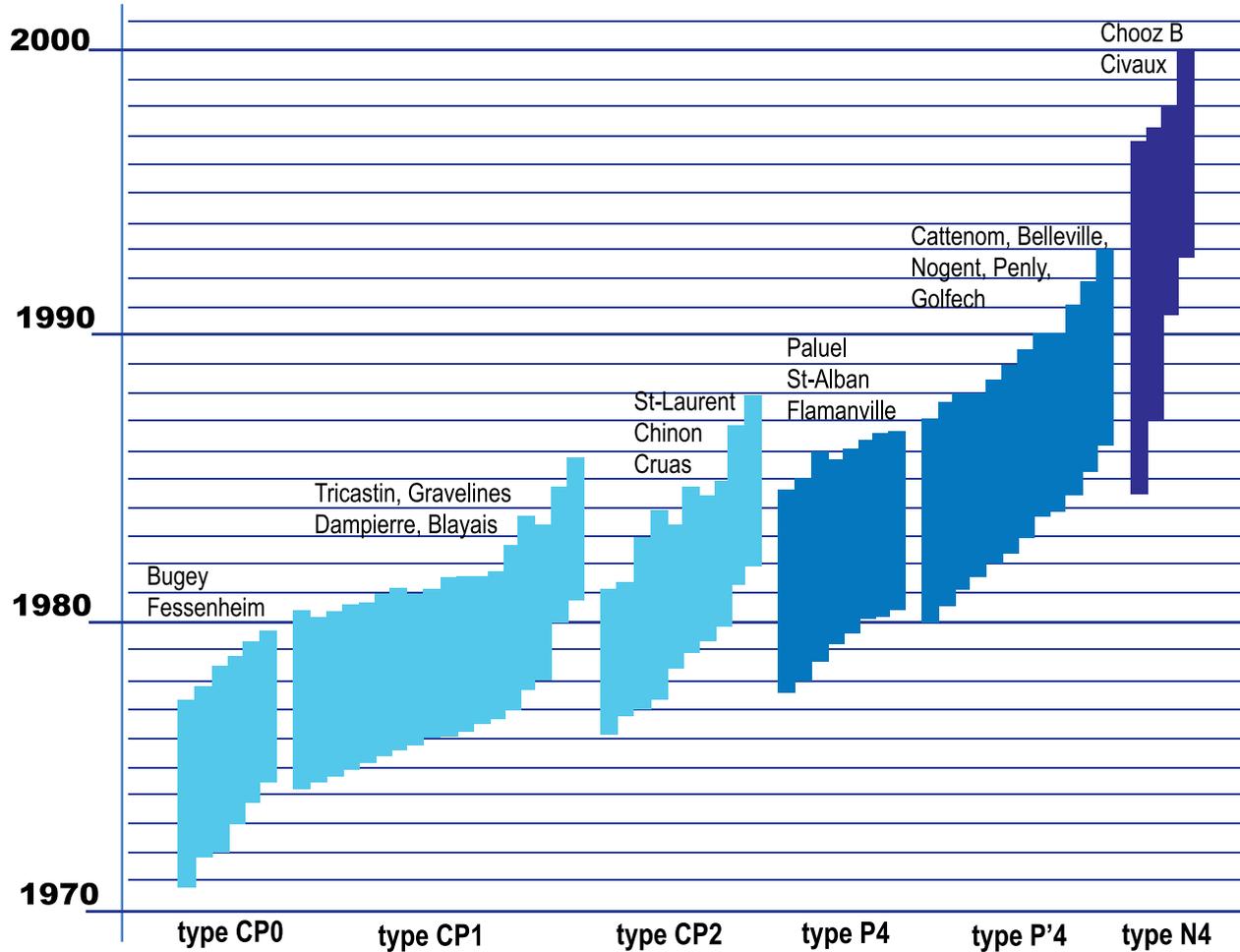


- Quelques rappels de physique
  - Fission nucléaire
  - Réaction en chaîne
  - Combustible et déchets nucléaires
- Energie nucléaire et transition énergétique
  - Impact direct du nucléaire
  - Avec les ENR
- **Vers des nouveaux réacteurs nucléaires?**
  - Construire un nouveau réacteur
  - EPR 2
  - Start-ups



# nouveaux réacteurs nucléaires?

Construire un réacteur c'est cher mais pas seulement



CP0 : 6 en 5 ans (TC 6 ans)

CP1 : 18 en 6 ans (TC 7 ans)

CP2 : 10 en 7ans (TC 6 ans)

P4 : 8 en 3 ans (TC 7 ans)

P'4 : 12 en 7 ans (TC 7 ans)

N4 : 4 en 9 ans TC 12 ans)



# nouveaux réacteurs nucléaires? Procédure nouveau réacteur

La procédure d'obtention d'une autorisation de création d'une INB comprend de nombreuses étapes.

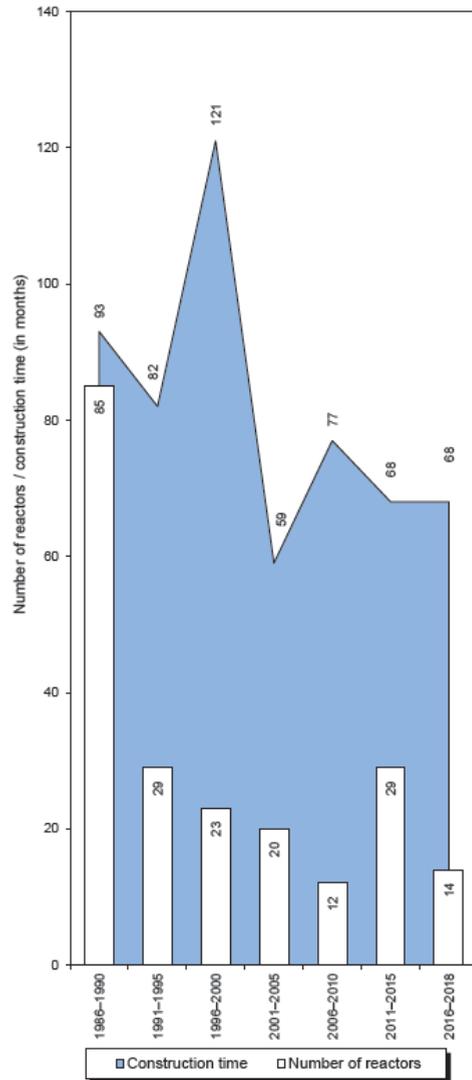
- **débat public** (par [Commission Nationale du Débat Public](#) (CNDP) )
  - **consultation facultative de l'ASN lors de la rédaction de la DAC**
  - **Demande d'autorisation de création (DAC)**
  - **consultation locale du public** : enquête publique (toutes communes <5km du site)
  - **consultation des experts nucléaires** : examen technique, évaluation des risques et des réponses (ASN, IRSN, ARSN)
  - **Consultation des autorités environnementales** : évaluation des risques et des réponses (Ministère)
- ⇒ **Délivrance du décret d'autorisation de création + prescriptions de l'ASN**



- **11 avril 2007** : DAC
  - **3 décembre 2007** : début construction, fin prévue en 2012
  - **décembre 2007 à janvier 2014** : génie civil
  - **janvier 2014 à juin 2017** : remplacement cuve et couvercle non-conforme
  - **mars 2017 à février 2020** : essais d'ensemble à froids puis à chaud
  - **janvier 2017 à mai 2023** : réparation de soudures du circuit secondaire
  - **janvier 2020 à février 2022** : renforcement soudures circuit primaires
  - **octobre 2023 à décembre 2023** : essais d'ensemble à froids puis à chaud
- => Mise en service 3 septembre 2024 (DAC+18 ans)



# nouveaux réacteurs nucléaires? Quelques stats

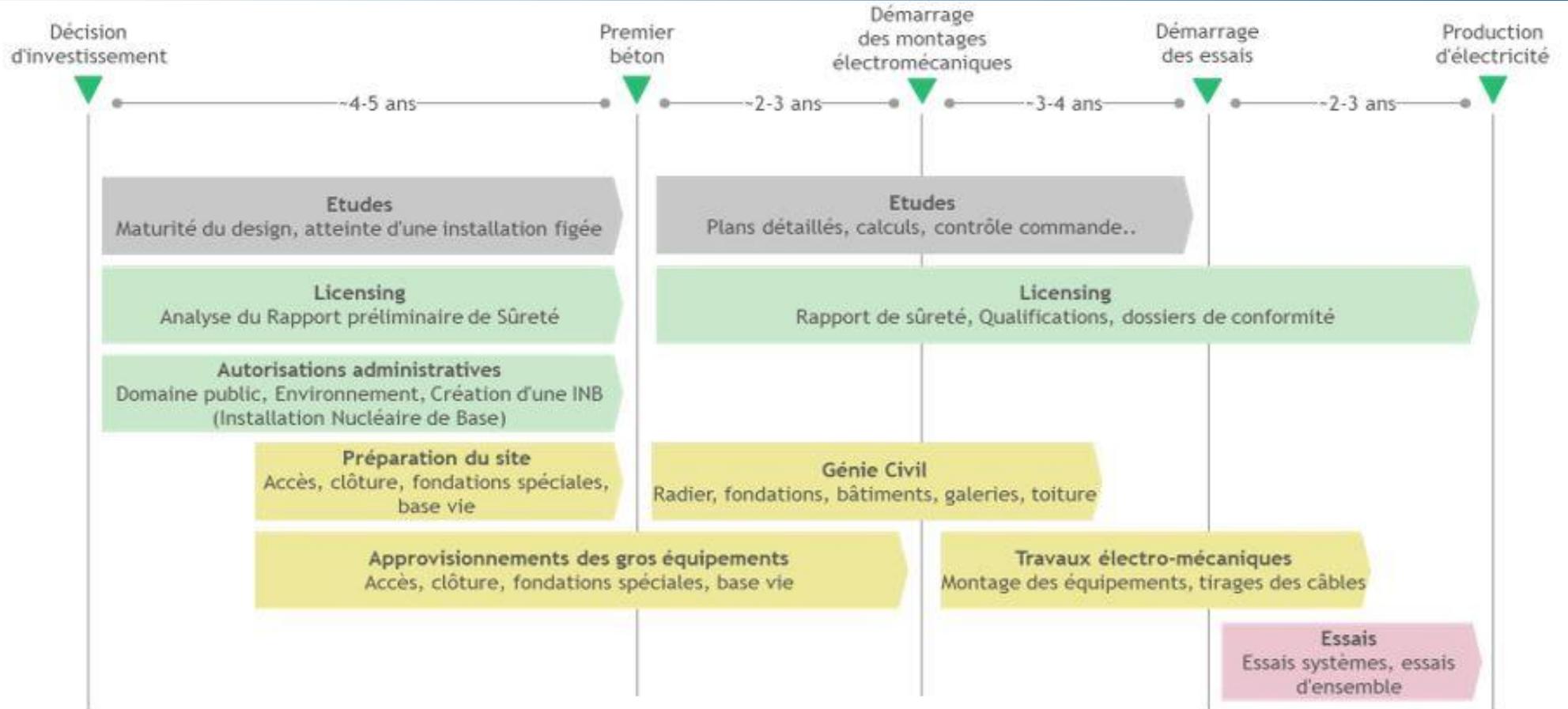


Réacteur	Pays	Type	Durée de construction (ans // mois)	
Shidao Bay 1	Chine	SMR	9.0	108
Taishan 1	Chine	EPR	9.2	110
Taishan 2	Chine	EPR	9.4	113
Olikiluoto 3	Finlande	EPR	16.5	198
Flamanville 3	France	EPR	17.6	211
Sanmen 1	Chine	AP1000	9.4	113
Sanmen 2	Chine	AP1000	8.9	107
Haiyang 1	Chine	AP1000	9.1	109
Haiyang 2	Chine	AP1000	8.6	103
Vogtle 3	Georgie	AP1000	9.8	118
Vogtle 4	Georgie	AP1000	9.9	119

Réacteur démarrés depuis 2020



# nouveaux réacteurs nucléaires? Procédure nouveau réacteur



Calendrier selon la SFEN : 14-15 ans  
DAC + 10 ans



# nouveaux réacteurs nucléaires? EPR 2

- **Penly 3 et 4**
    - Débat public : 27 octobre 2022 au 27 février 2023
    - demande d'autorisation de création : 29 juin 2023
    - Travaux préparatoire du site : début été 2024
    - Estimé à 17 milliards d'€ les 2
    - vise une entrée en service en 2035-2036 (+11-12 ans)
  - **Gravelines 7 et 8**
    - Débat public : 17 septembre 2024 au 17 janvier 2025
    - 17 septembre 2024 au 17 janvier 2025
    - Estimé à 17 milliards d'€ les 2
    - mise en service à l'horizon 2038 (+13 ans)
  - **Bugey 6 et 7**
    - Débat public : en cours d'organisation depuis le 5 juin 2024
    - Estimé à 15 milliards d'€ les 2
    - mise en service à l'horizon 2042 (+16 ans)
  - **Possible construction de 8 EPR2 supplémentaires**
    - sur les sites de centrales existantes
- 6 réacteur d'ici 2040, 8 de plus entre 2040 et 2050
- Environ 1 réacteur par an



## Delivering our Gen-IV vision

We have an ambitious timeline to deliver our vision step by step and a strategic plan to progressively deploy our innovative products and build our internal capabilities.

Discover more →

### ● 2026 - R&D and Precursor

An extensive R&D programme relying heavily on our own facilities, culminating in a non-nuclear prototype

### ● 2030 - MOX

First line of MOX fuel production for our Fast Reactors, starting from available, already separated material in France

### ● 2031 - LFR-AS-30

Our first nuclear reactor, a 30 MWe irradiation reactor, designed to support the nuclear industry and expand the potential of our commercial LFR-AS-200

### ● 2033 - LFR-AS-200

The First-Of-A-Kind of our commercial line, a 200 MWe nuclear reactor, for stand-alone or multi-module configuration

- Prototype 2031
- Commercial 2033

Début construction?  
ou  
mise en service?

Si début construction  
=> +10ans



# nouveaux réacteurs nucléaires? Start-up

NAAREA développera, concevra, construira, installera, exploitera, maintiendra, et assurera le recyclage, le retraitement et la destruction de ses micro générateurs.

NAAREA propose un ambitieux plan de développement articulé en 3 phases qui sont menées en parallèle : finalisation d'un jumeau numérique en 2023 ; constitution du dossier d'options de sureté pour une mise en service du prototype d'ici à 2028 et production en série à l'horizon 2030.

## PHASE 1 18 MOIS

D'une durée de 18 mois de préconception, elle comprend la réalisation d'un jumeau numérique complet, permettant notamment de valider les choix principaux, les fonctionnalités, le dimensionnement, de coordonner les interfaces entre les différents sous-systèmes et l'intégration du système global, de présenter un outil à disposition des autorités de sureté et de sécurité.

## PHASE 2 24 MOIS

D'une durée de 24 mois, elle intègre des tests en laboratoire et la réalisation de prototypes physiques, suivis de 12 mois d'observation de fonctionnement en retour d'expérience.

## PHASE 3 36 MOIS

D'une durée de 36 mois, elle permettra de développer le numéro 1 de série industrielle et la définition de tous les paramètres de fabrication, suivi de 12 mois de fonctionnement à blanc pour faire les ultimes tests et retours d'expérience.

- Prototype 2028
- Commercial 2030

Début construction?  
OU  
mise en service?

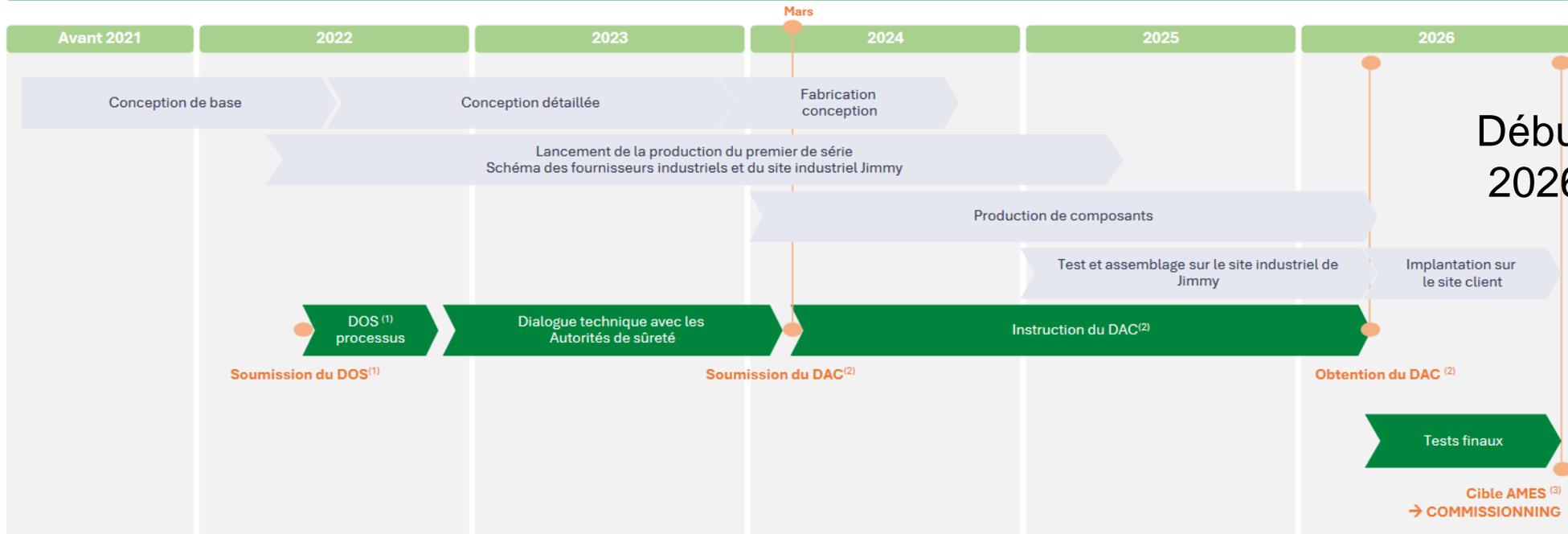
Si début construction  
=> +10ans



# nouveaux réacteurs nucléaires? Start-up

Jimmy dépose en ce moment la demande de DAC de son premier de série

Objectif de livraison du premier réacteur Jimmy en 2026



Début construction  
2026

Jimmy est conscient que le calendrier ci-dessus est jugé ambitieux par l'autorité nucléaire française (ASN), mais les délais confirmés par les fournisseurs et les progrès récents dans le lancement

Le 29 avril 2024 - Jimmy dépose un dossier de demande d'autorisation de création (DAC),

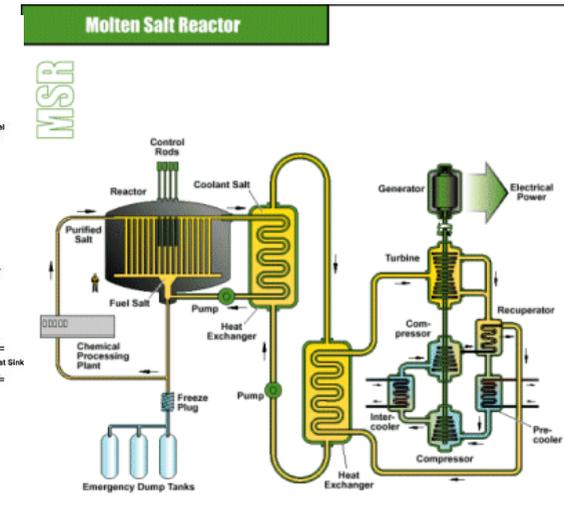
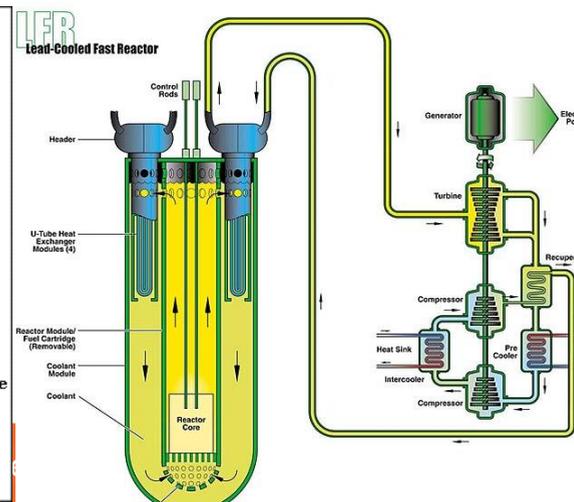
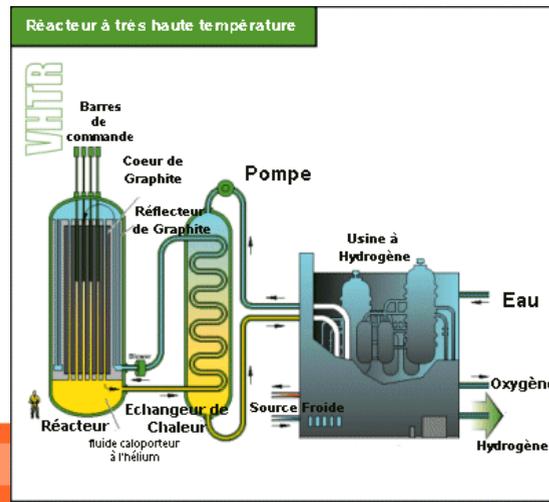
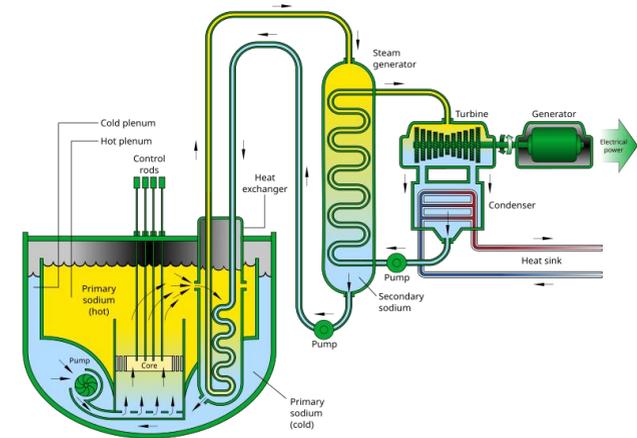


# nouveaux réacteurs nucléaires? Et les Gen4

Beaucoup de ces réacteurs n'ont pas la même technologie que les réacteurs actuels.  
Mais des concepts innovants :

- Jimmy : VHTR
- Newcleo : Lead-cooled Fast reactor
- Naarea : RSF
- Hexana : SFR

⇒ Ce sont des Concept issus du forum Gen-IV





# Gen-4 International Forum 2023 report

- LFR :
  - reactors operating at relatively modest primary coolant temperatures and power densities would be deployed by 2030
  - construction of the nuclear power plant with the BREST-OD-300 LFR (pilot demonstration prototype) began
    - on 8 June 2021 in Russia
- VHTR
  - High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) in Japan was restarted in 2021
  - first grid connection in December 2021 for the High-Temperature Gas-Cooled Reactor –Pebble-bed Module (HTR-PM) in China
- SFR
  - two CFR-600 units, which are demonstration SFR plants generating 600 MWe each, are under construction in Xiapu County, Fujian Province.
  - commercial SFRs such as the BN-600 and BN-800 are currently operating in Russia
- MSR
  - may be demonstrated in the near term (next few years),

