

Energie nucléaire de fission :

atouts et obstacles

Marc Ernoult

*IJCLab, pôle Energie & Environnement
CNRS/IN2P3 – Université Paris-Saclay*

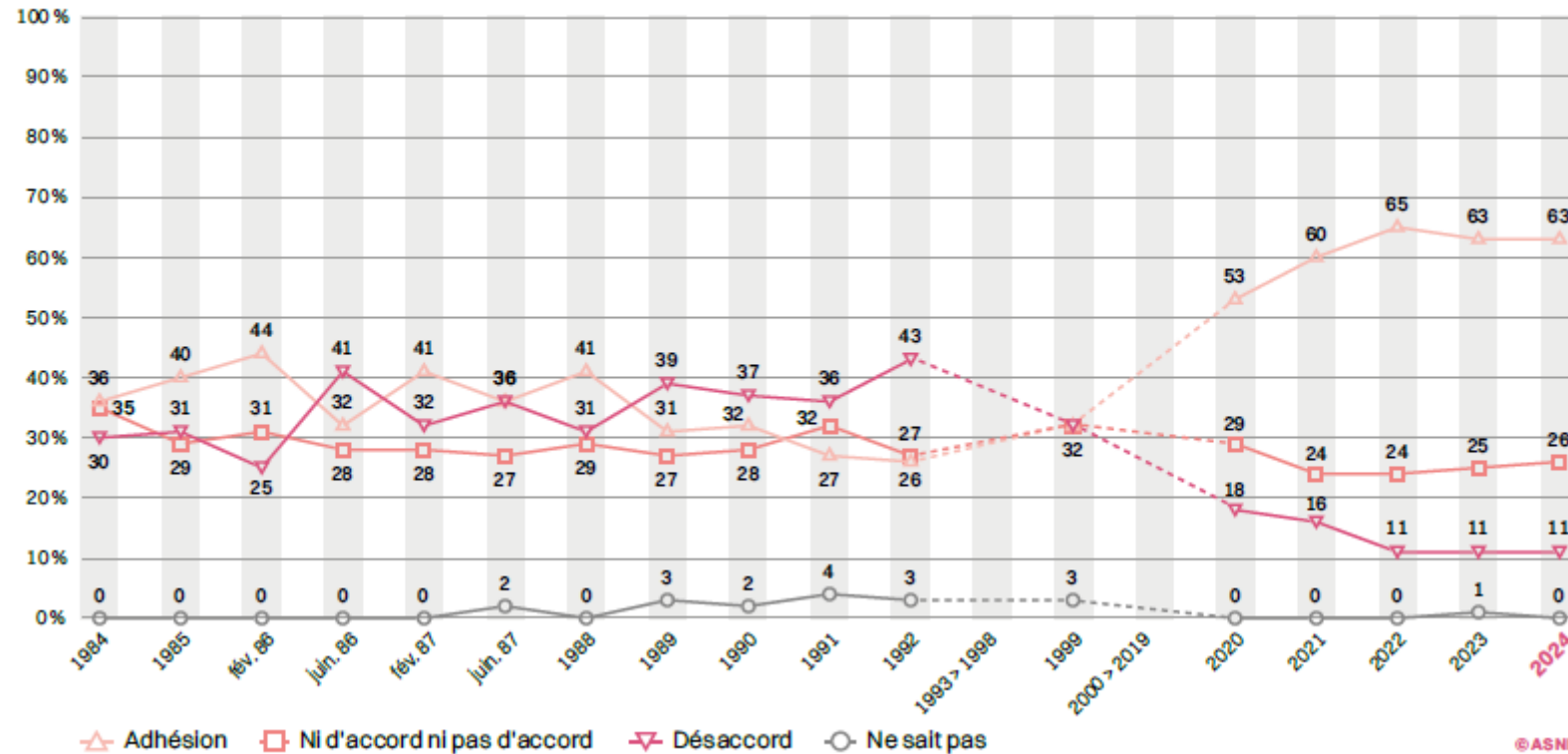


- Contexte: Une source d'énergie très discutée
- Quelques rappels de physique
 - Fission nucléaire
 - Réaction en chaîne
 - Combustible et déchets nucléaires
- Facile de construire des nouveaux réacteurs nucléaires?
 - EPR 2
 - Gen IV
- Energie nucléaire et transition énergétique
 - Interactions avec les ENR



Contexte: Une source d'énergie très discutée

2 • La construction des centrales nucléaires a été une bonne chose

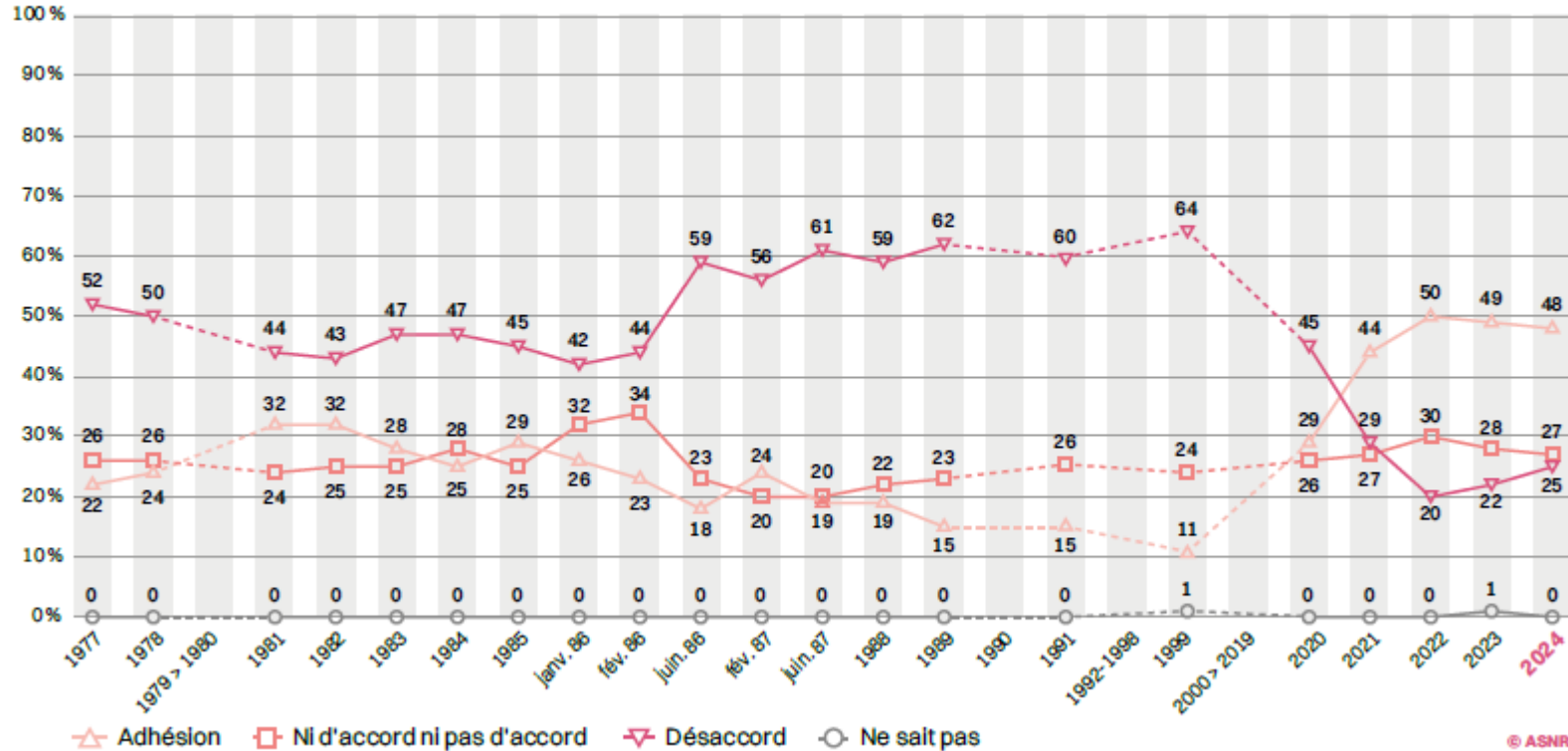


(Baromètre ASNR 2025 : <https://barometre-perceptiondesrisques.asnr.fr/>)



Contexte: Une source d'énergie très discutée

1 • Il faut continuer à construire des centrales nucléaires



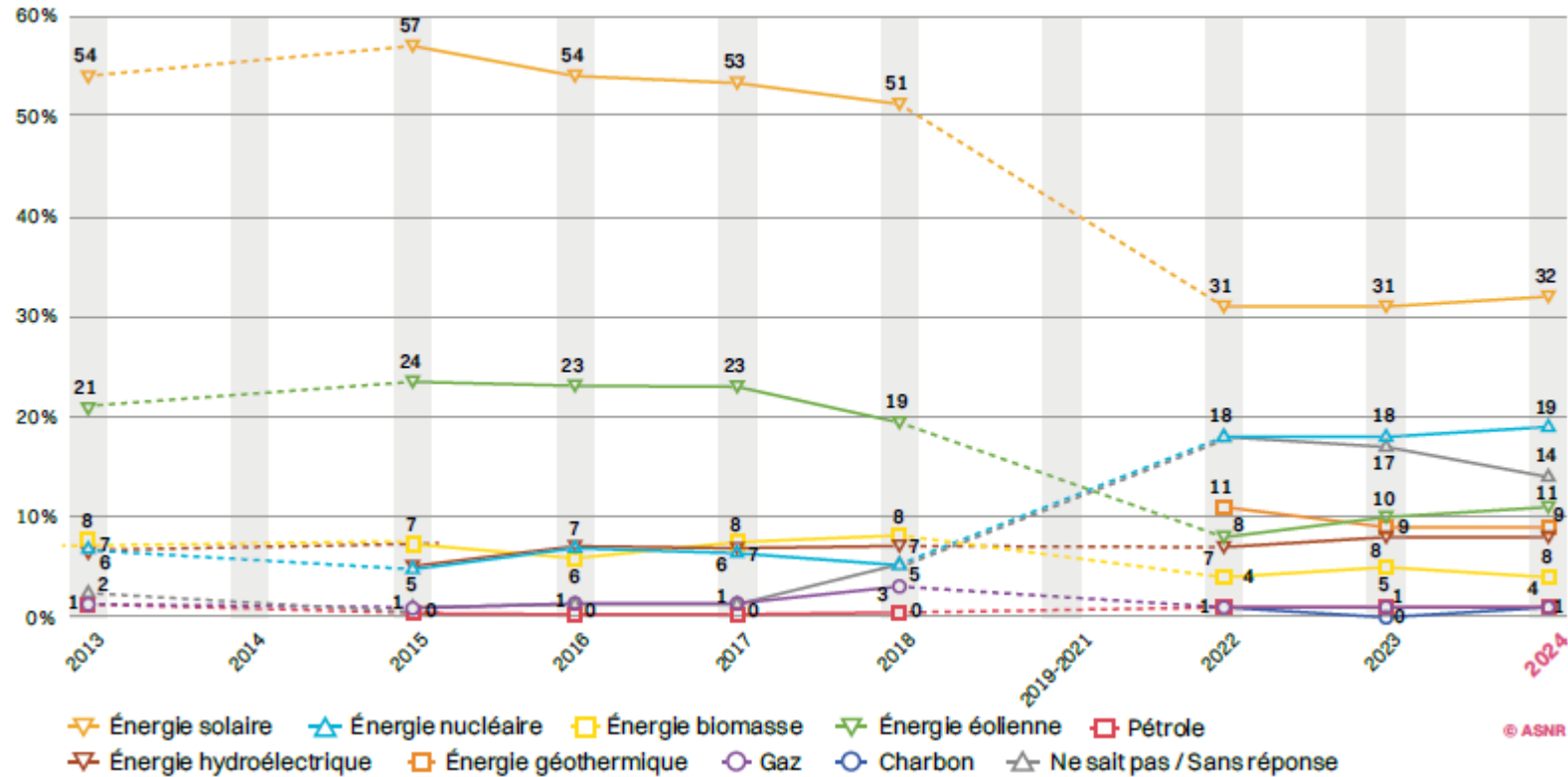
© ASNR

(Baromètre ASNR 2025)



Contexte: Une source d'énergie très discutée

1 • L'énergie d'avenir



(Baromètre ASNR 2025)



Depuis 2021 : positionnement fort de l'état

Fin 2022 : Projet de loi relatif à l'accélération des procédures liées à la construction de nouvelles installations nucléaires à proximité de sites nucléaires existants et au fonctionnement des installations existantes :

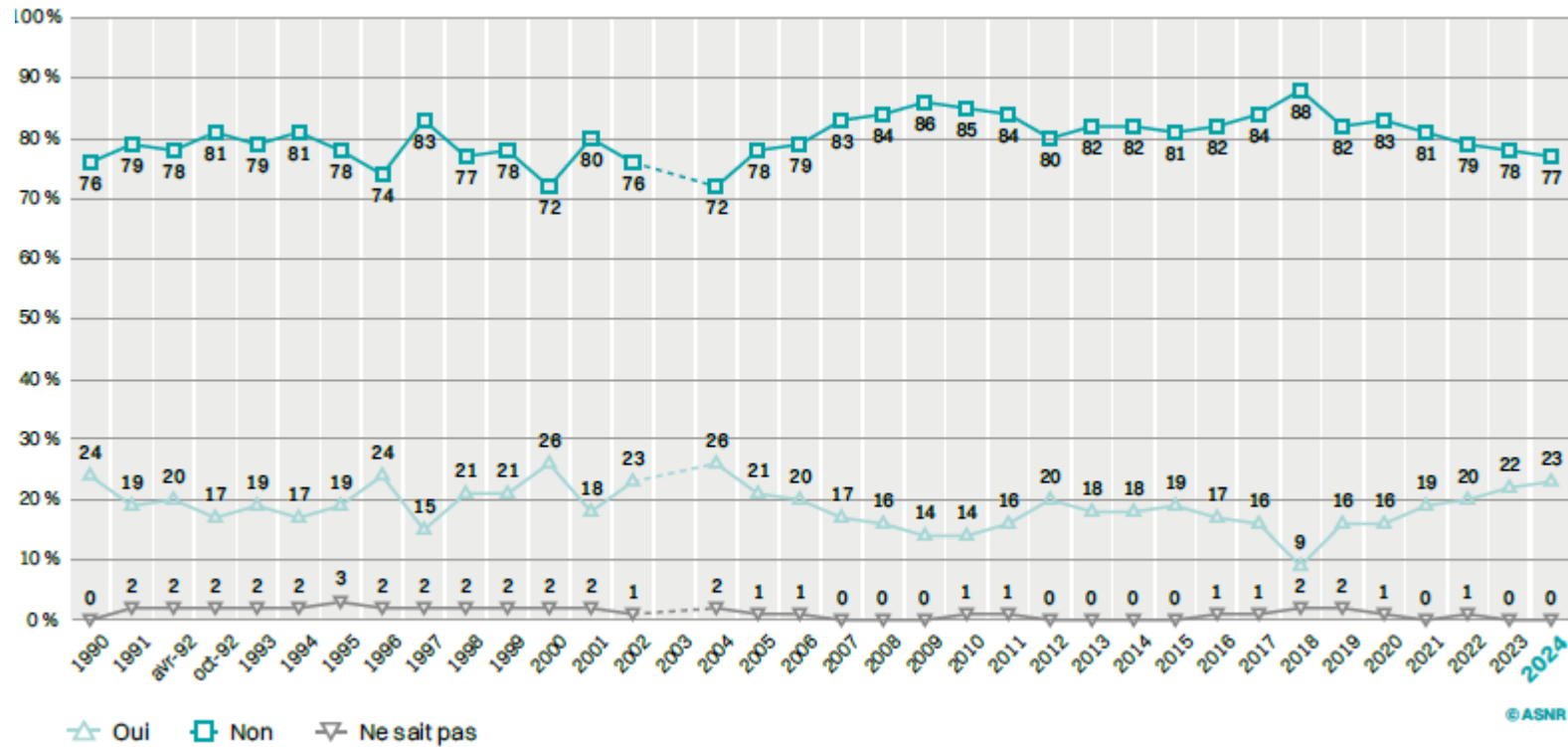
- supprime l'objectif de réduction à 50% de la part du nucléaire
- acte la construction de nouveaux réacteurs :
 - (EPR2 et petits réacteurs modulaires (SMR))
- **On part sur un scénario de maintien de la puissance proche du niveau actuelle jusqu'à la fin du siècle**
- **Création du « Conseil de Politique Nucléaire »**



- **Avis du Conseil National de la Transition Ecologique :**
 - **Création de réacteurs : « Projet d'intérêt général majeur complémentaires au développement accéléré des énergies renouvelables »**
 - **Aimerait :**
 - Plus de consultation
 - Plus d'études d'impacts



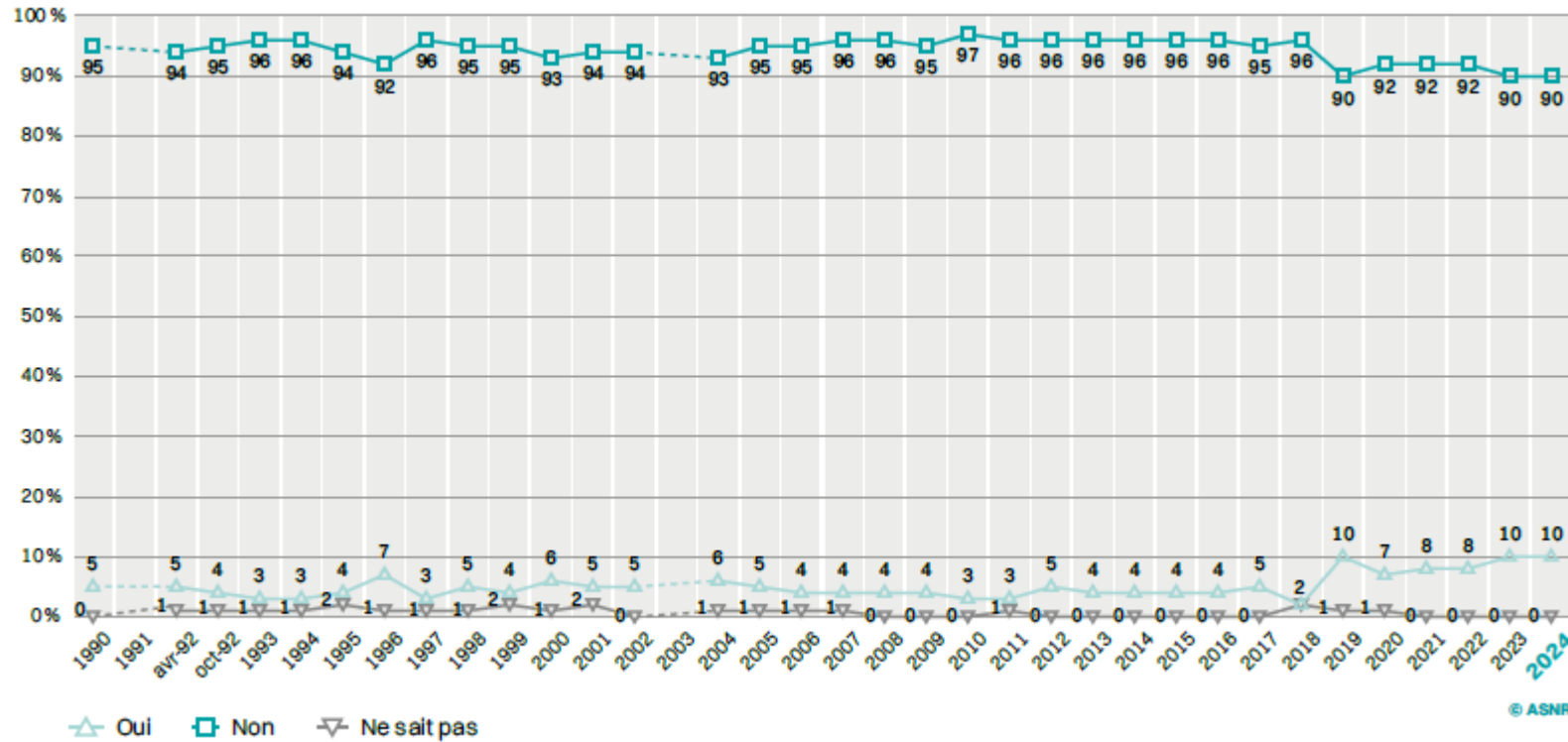
Contexte: Une source d'énergie très discutée



Accepteriez vous de vivre près d'une centrale nucléaire ?
(Baromètre ASNR 2025)



Contexte: Une source d'énergie très discutée



Accepteriez vous de vivre près d'un centre de déchet radioactif ?
(Baromètre ASNR 2025)



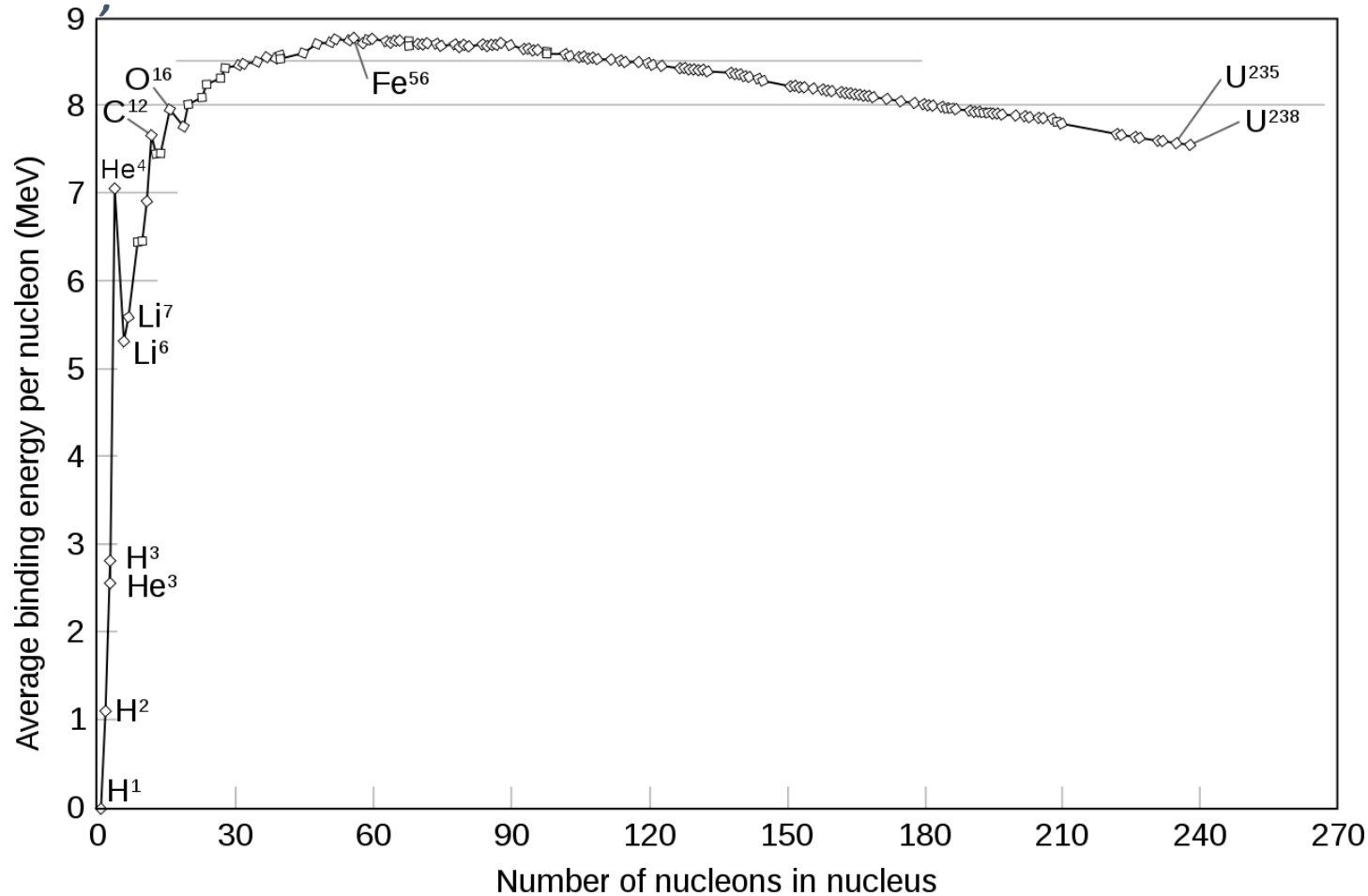
Plan de la présentation

- Contexte: Une source d'énergie très discutée
- Quelques rappels de physique
 - Fission nucléaire
 - Réaction en chaîne
 - Combustible et déchets nucléaires
- Facile de construire des nouveaux réacteurs nucléaires?
 - EPR 2
 - Gen IV
- Energie nucléaire et transition énergétique
 - Interactions avec les ENR



Quelques rappels de physique : La fission nucléaire

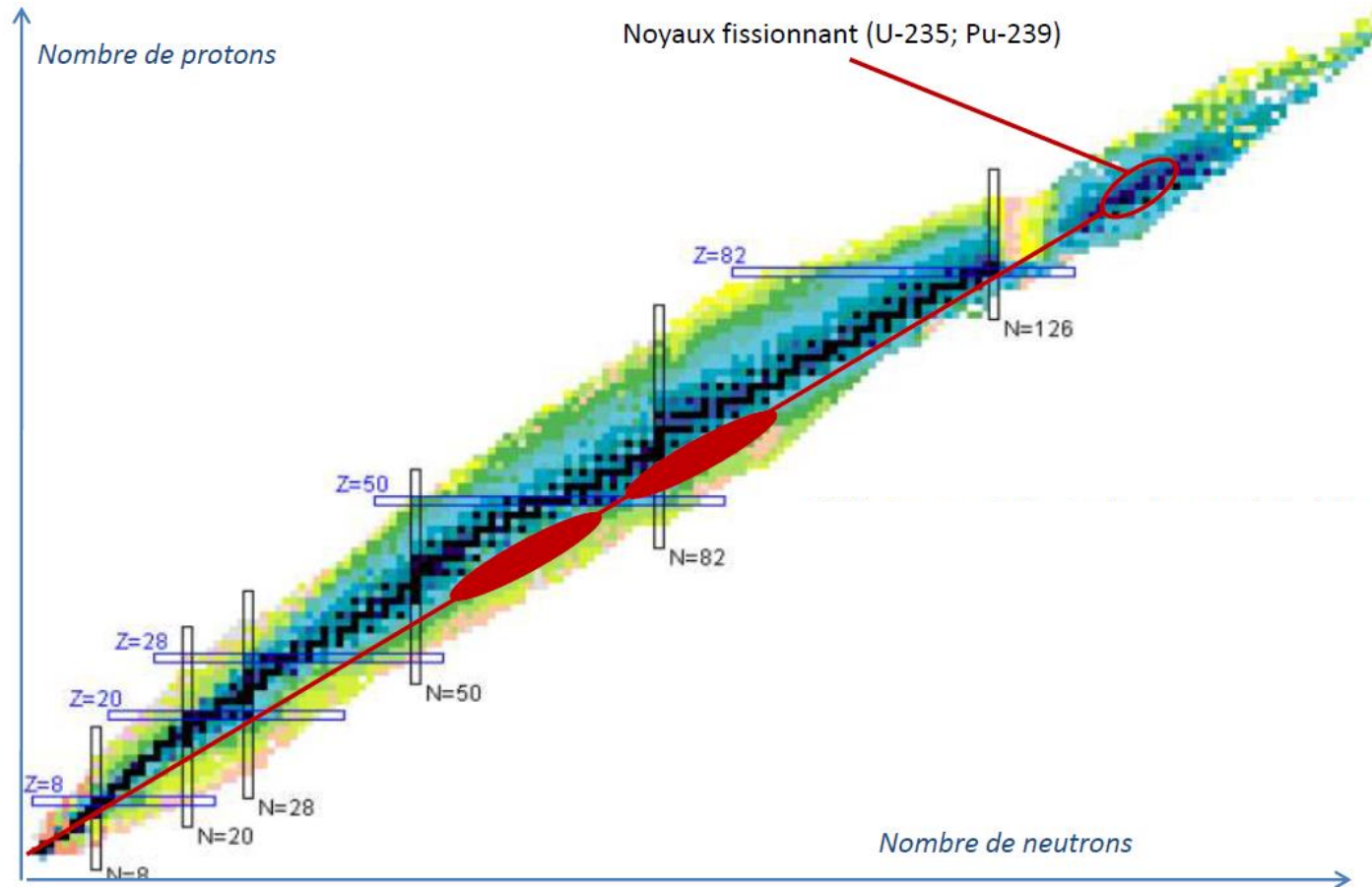
La fission des noyaux lourds libère une grande quantité d'énergie (200 MeV)





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*

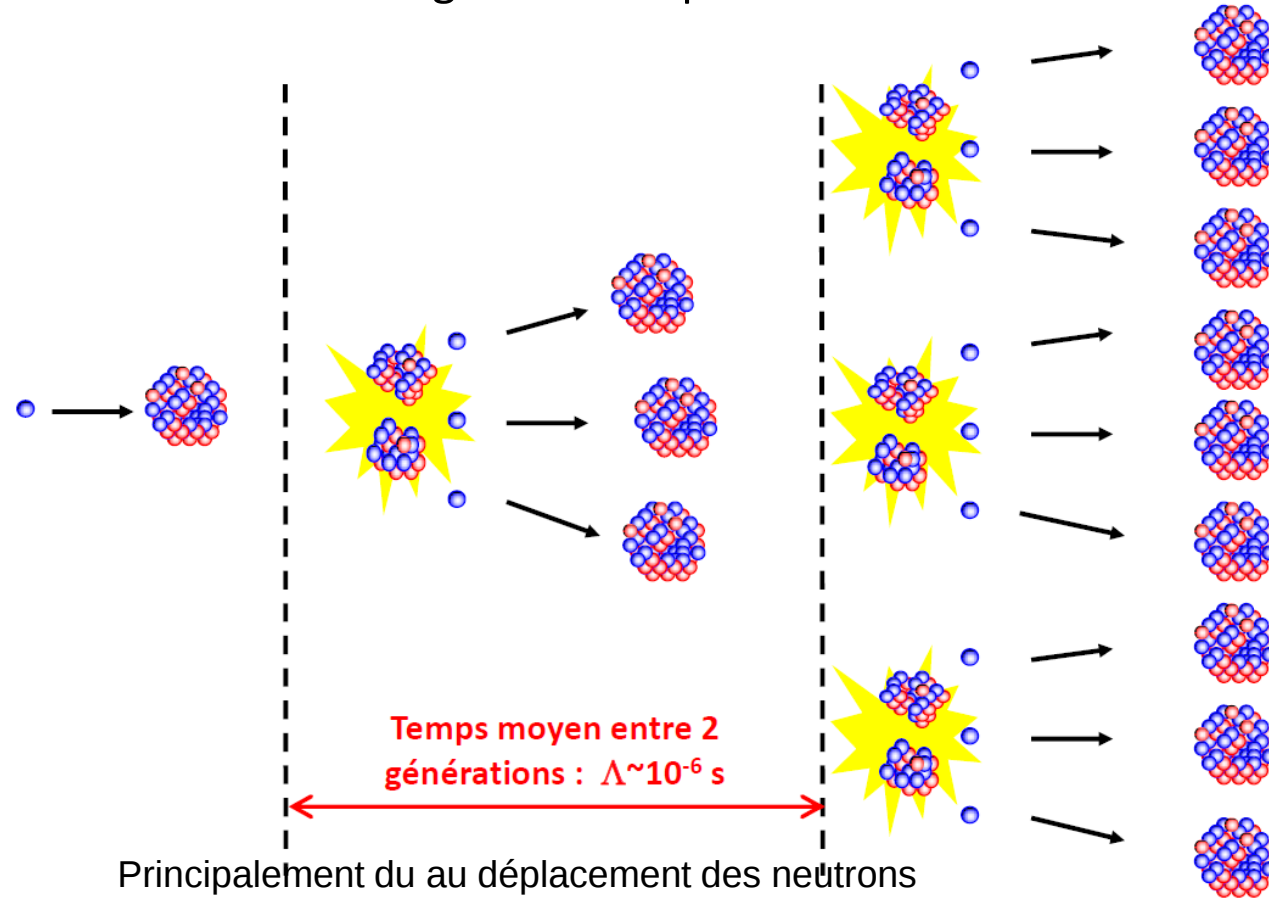




Quelques rappels de physique : Réaction en chaîne

1W => 3.10^{10} fissions par seconde

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

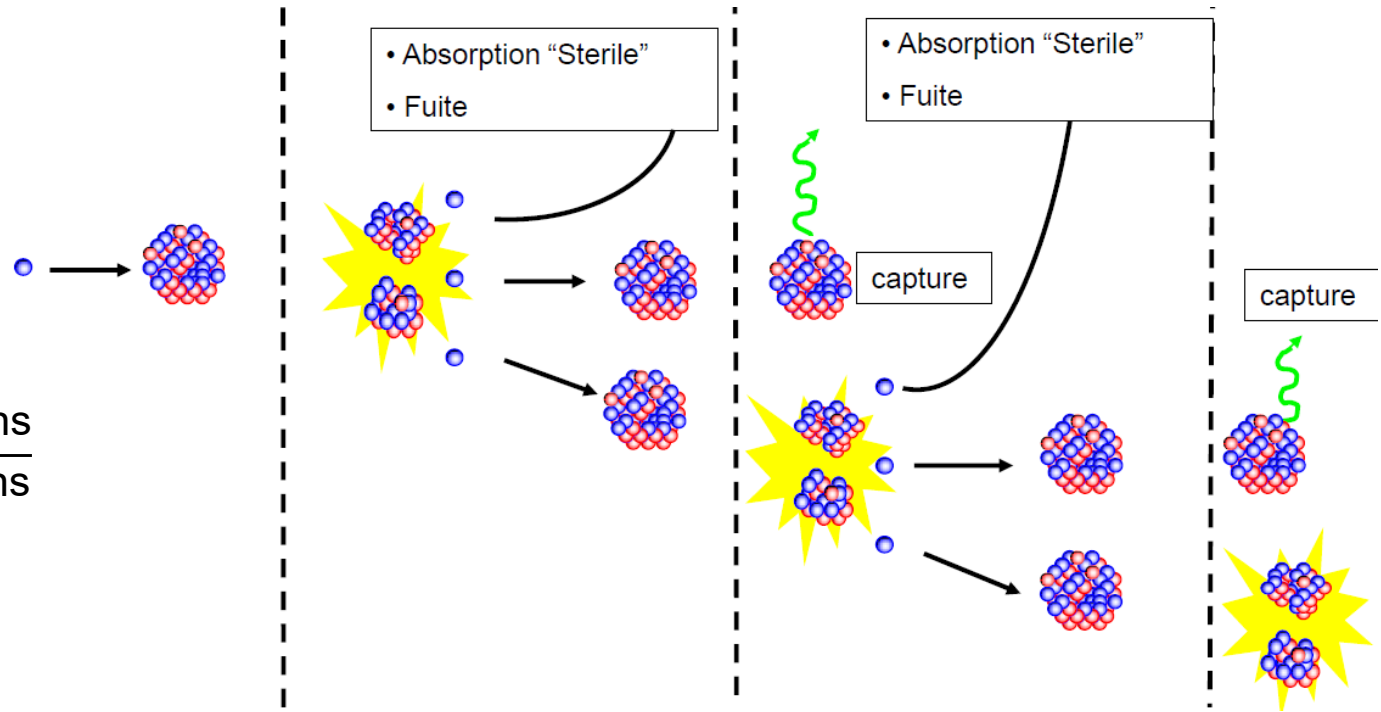




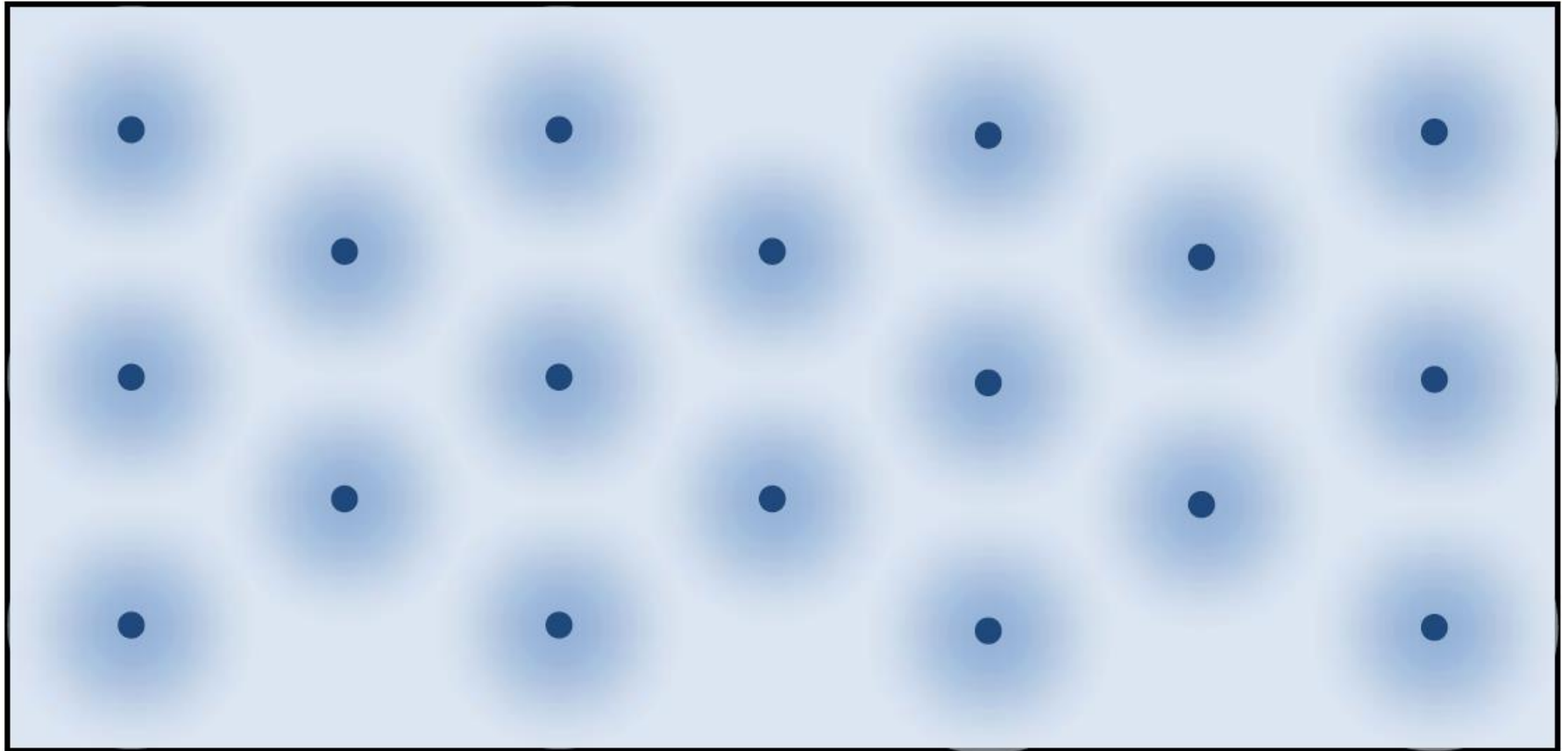
Quelques rappels de physique : Réaction en chaîne

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

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



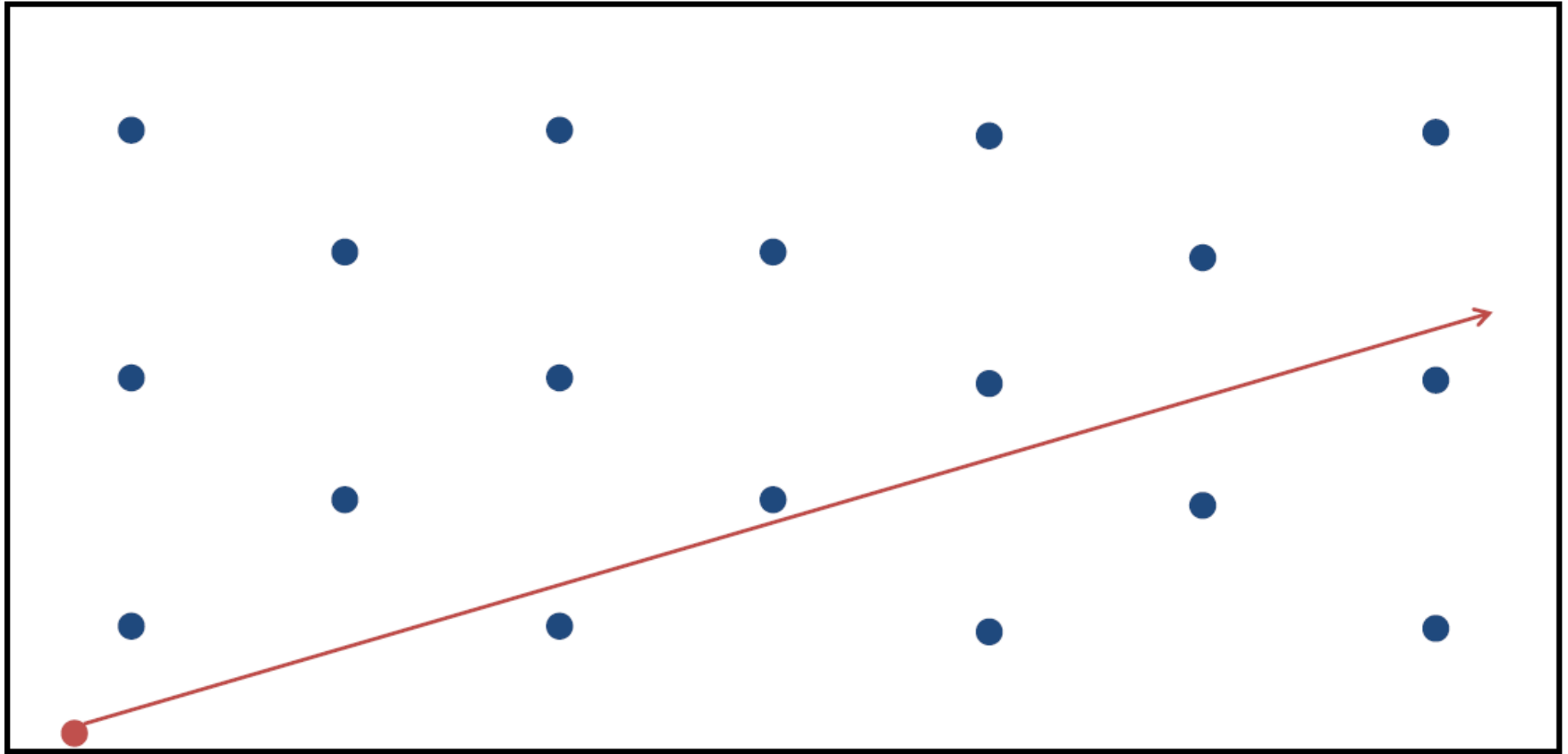
$k=1 \rightarrow$ Nombre de fission par seconde (= puissance) constant $\rightarrow$ Réaction stable



Neutrons neutres => interaction seulement avec les noyaux



Interaction des neutrons avec la matière



Les neutrons parcourent de grandes distances sans interagir avec la matière

- Pas de système nucléaire de taille « microscopique »



Interaction des neutrons avec la matière

Taux de réaction :

Flux de neutrons (*neutrons. s⁻¹. cm⁻²*) (c'est une densité)

$$R_{r,i} = N_i \times \sigma_{r,i} \times \Phi$$

Densité de noyau i (*noyau. cm⁻³*)

$\sigma_{r,i}$: section efficace de la réaction r sur le noyaux i

Si on peut négliger les fuites et considérer que les générations sont successives :

$$k = \frac{\text{Production}}{\text{Absorption}} = \frac{\nu R_f}{R_a} = \frac{\sum_i \nu N_i \sigma_{f,i}}{\sum_i N_i \sigma_{a,i}}$$



Interaction des neutrons avec la matière

Taux de réaction :

$$R_{r,i} = N_i \times \sigma_{r,i} \times \Phi$$

Flux de neutrons (*neutrons. s⁻¹. cm⁻²*)

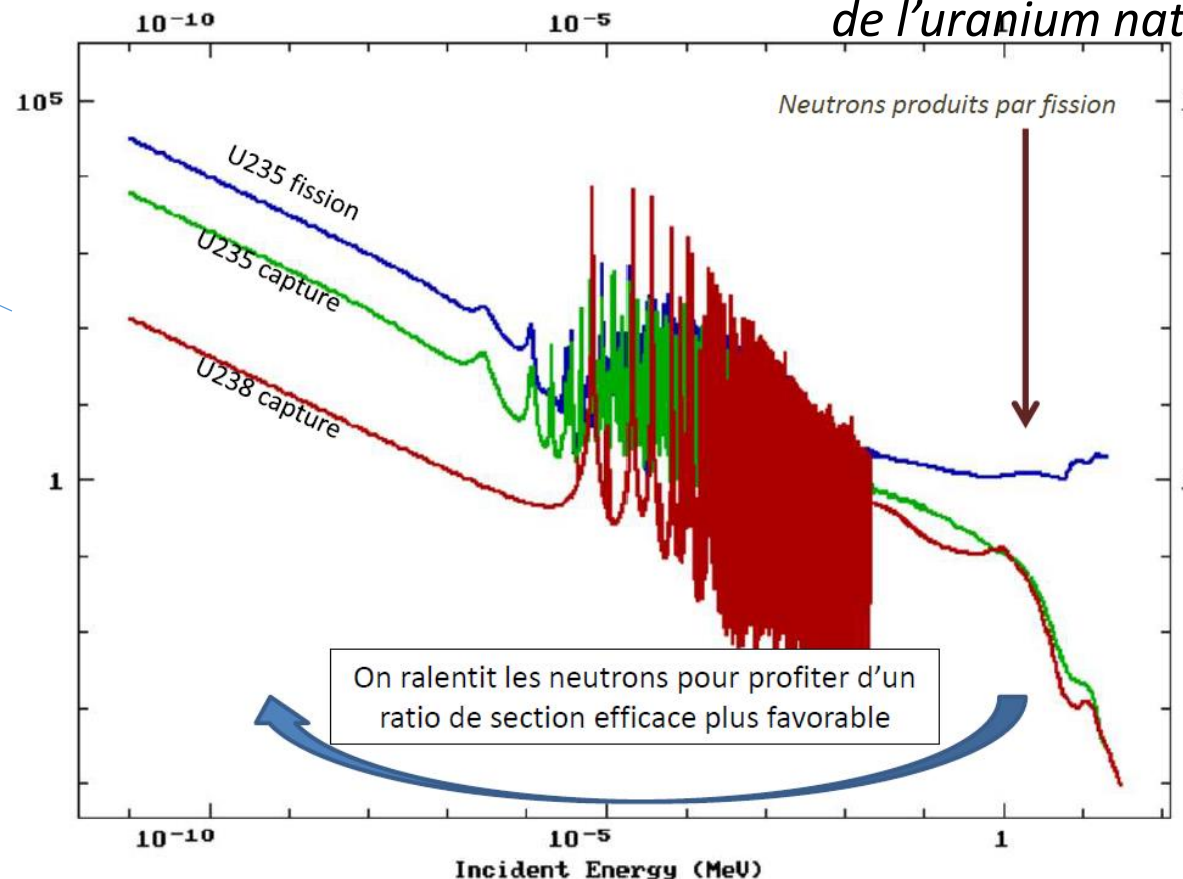
Densité de noyau i (*noyau. cm⁻³*)

$\sigma_{r,i}$ dépend de l'énergie du neutron et de la matière traversée.

Pour intégrer l'interaction avec la matière, on considère

$$\Sigma_{r,i} = N_i \sigma_{r,i}$$

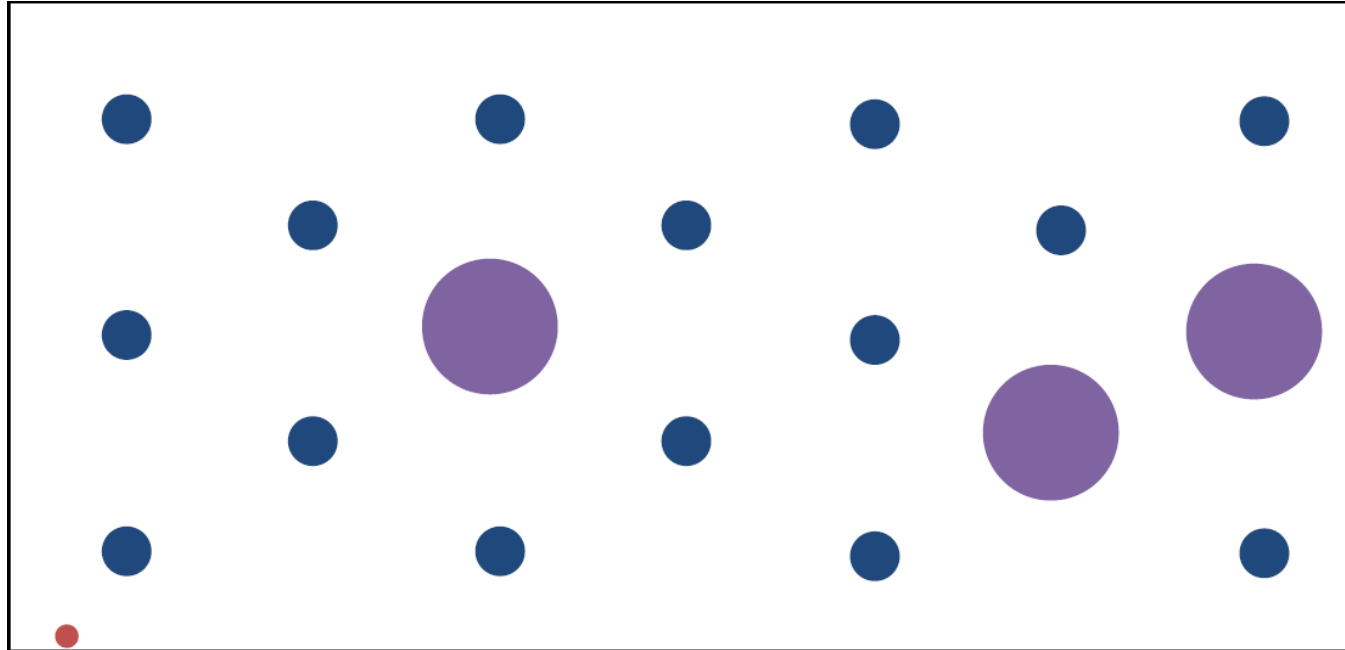
L'uranium 235 ne représente que 0,7% de l'uranium naturel





Interaction des neutrons avec la matière

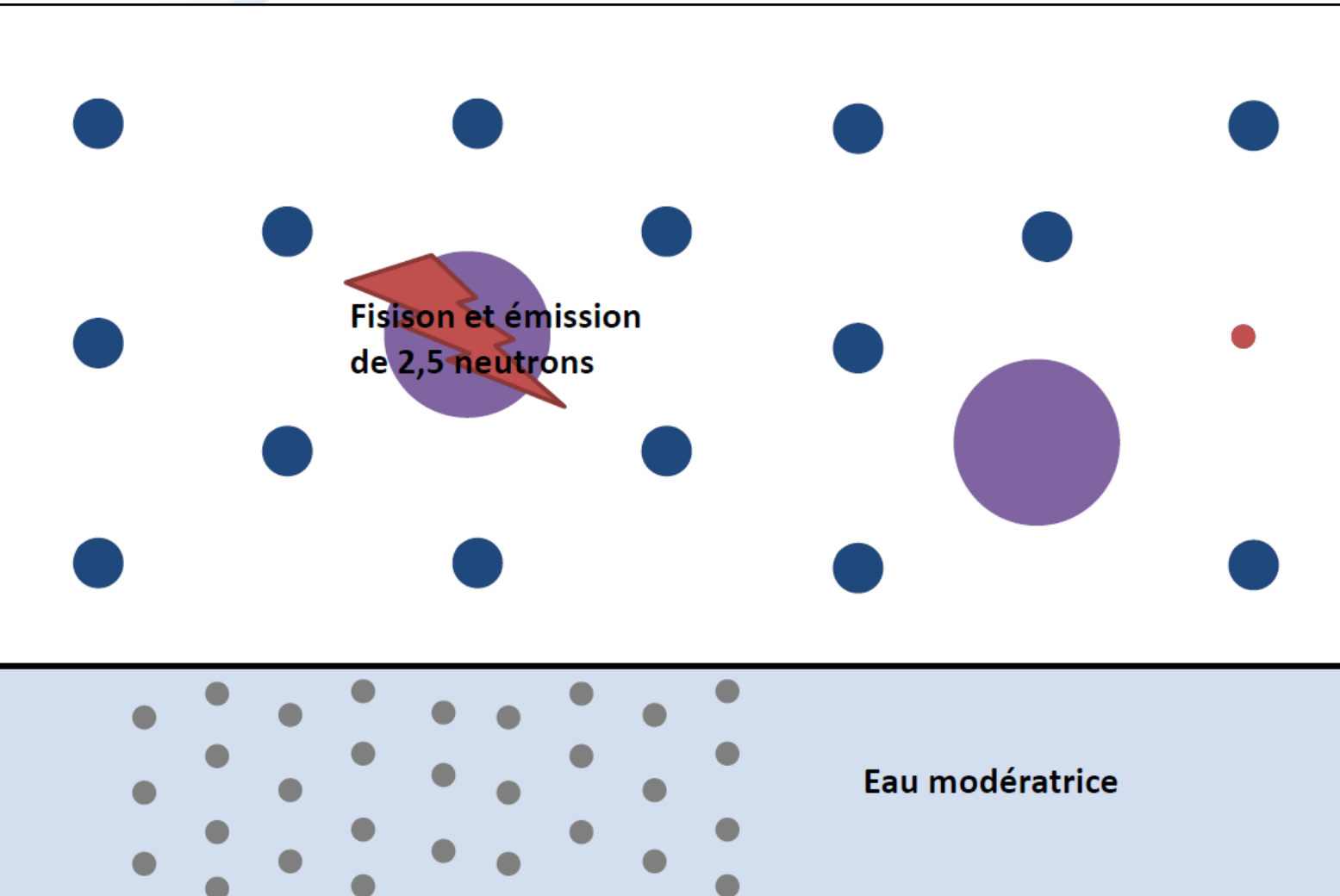
Tout ce passe comme si le volume des noyaux dépendait de la vitesse du neutron
→ Quand les neutrons sont lents, la taille relative des noyaux d' ^{235}U augmente



Pour économiser les ressources et le travail d'enrichissement on peut ralentir les neutrons



1 Interaction des neutrons avec la matière



L'eau dans les réacteurs est indispensable pour :

- Ralentir les neutrons
- Refroidir le combustible

Dans 1 réacteur:

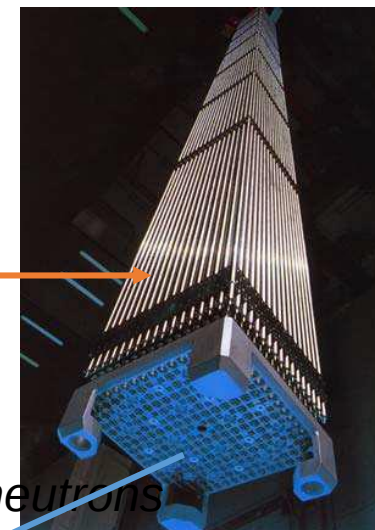
Sur les 2,5 neutrons émis par la fission, 1 seul provoque une autre fission. Les autres sont absorbés par d'autre noyaux



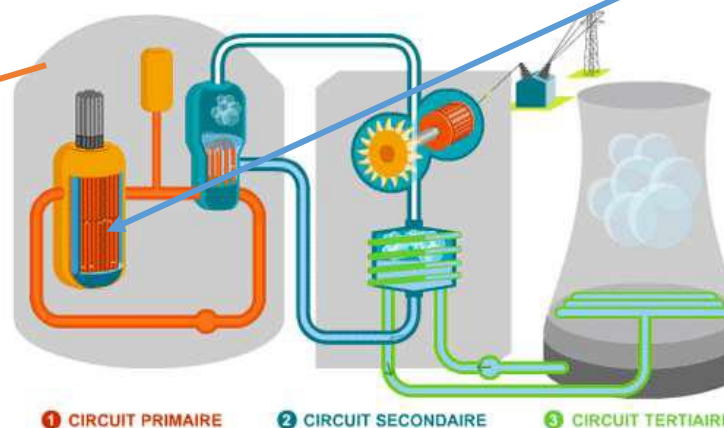
1.3 Les réacteurs à eau sous pression

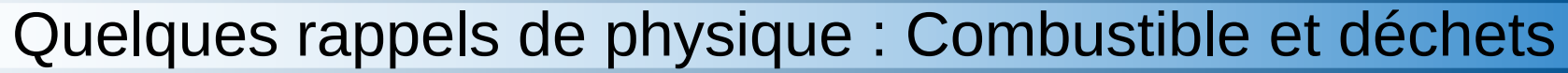
Résultat d'un compromis entre ralentissement et enrichissement

- Uranium enrichi entre 3 et 5%
- Chaque assemblage est constitué de 264 crayons (17 x 17)



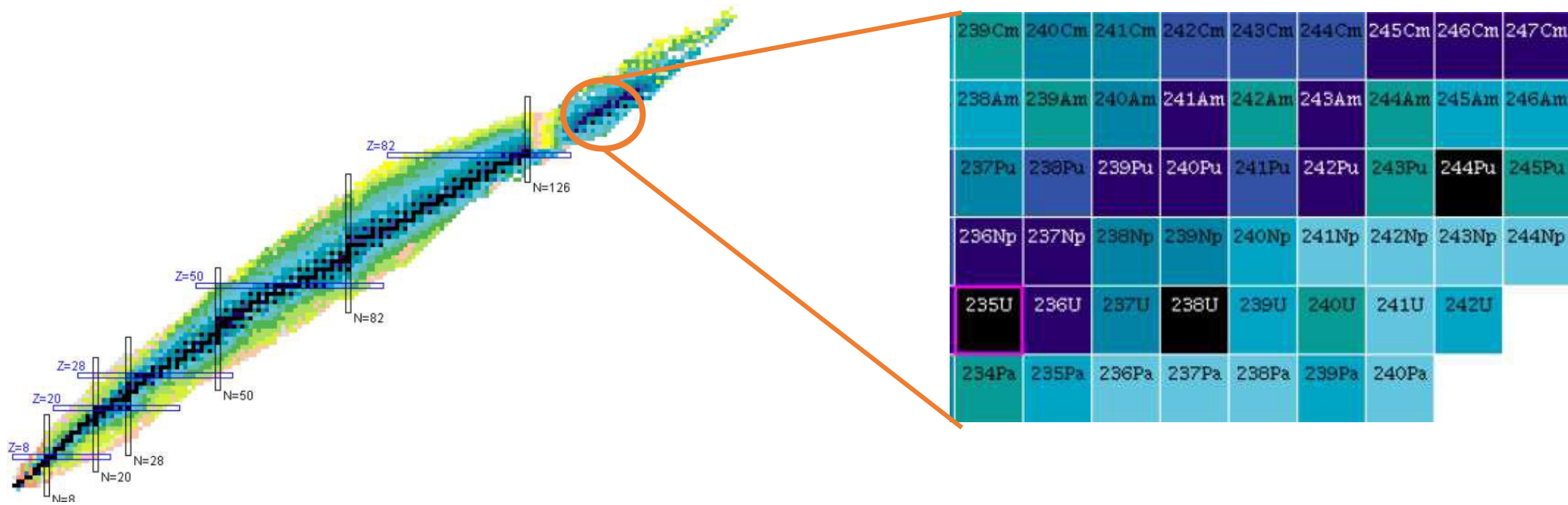
L'eau circule dans l'espace entre les crayons - refroidit le combustible et ralentit les neutrons







Quelques rappels de physique : Combustible et déchets

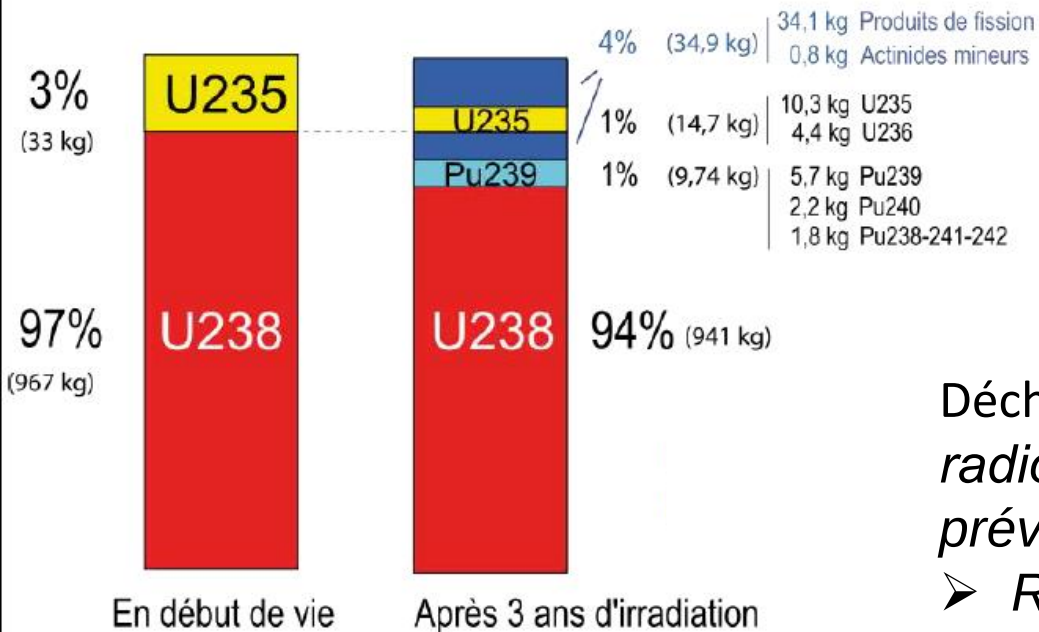


L'irradiation produit des noyaux lourds par captures neutroniques :

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



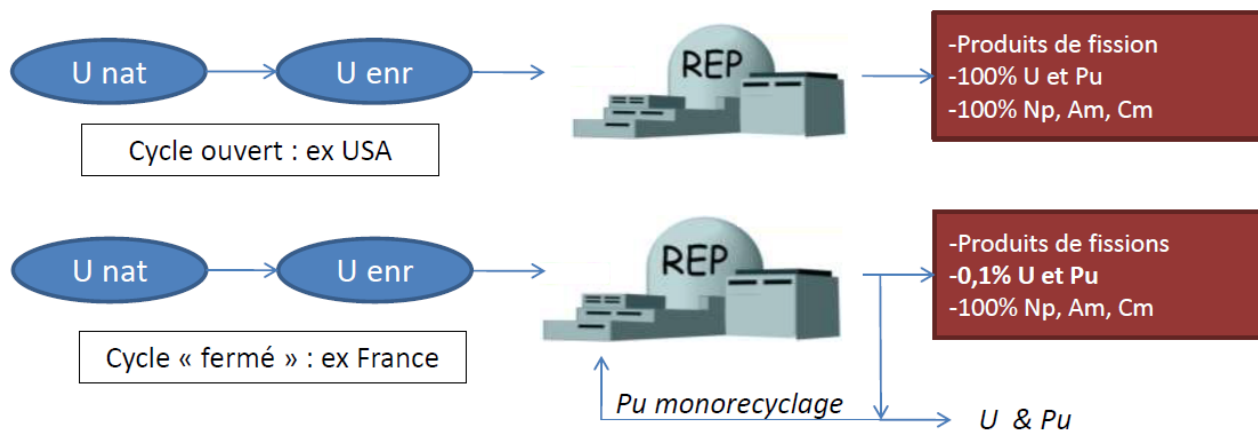
Quelques rappels de physique : Combustible et déchets



96 % des combustibles usés sont « ré-utilisables »

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





2.2 Solutions de gestion des déchets

Depuis 2006, 5 plans nationaux de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR).
Plusieurs débats publics :

2013 - Débat public organisé autour du Projet de centre de stockage réversible profond de déchets radioactifs

2019 - Débat public organisé sur la gestion des matières et déchets radioactifs

- Chaque débat nécessite la rédaction d'un rapport par les experts pour expliquer les conséquences de chaque choix proposé

Solution actuellement retenue :

***Stockage géologique profond dans un centre en Meuse/Haute-Marne
CIGEO***

Autres solutions proposées :

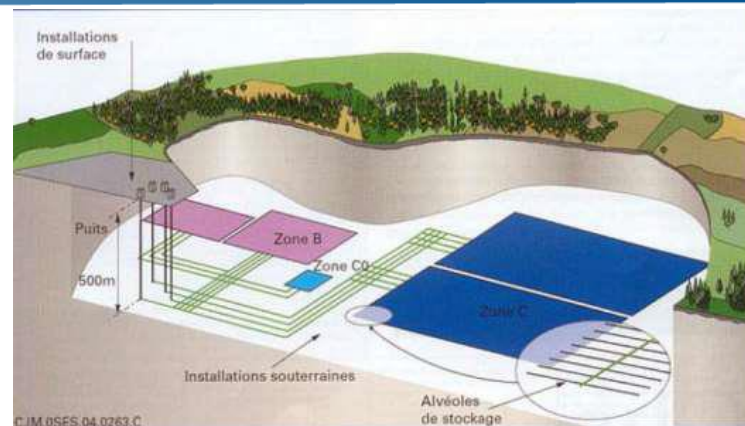
- Entreposage sous surveillance
- Stockage en sub-surface
- Transmutation poussée

Note : Il y a eu d'autres débats publics sur le nucléaire notamment celui préalable au lancement du Projet Flamanville 3

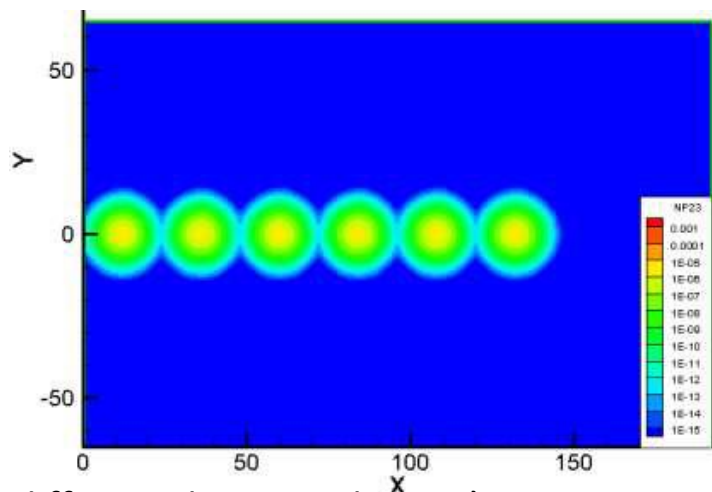


2.2 Solutions de gestion des déchets

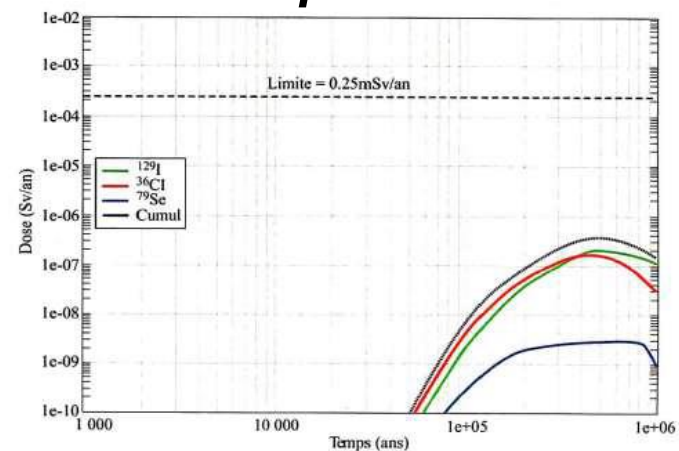
Design de colis et choix du site pour minimiser la contamination sans intervention humaine pendant des temps très longs



Est-ce sur ? Les simulations disent que oui



Exemple : diffusion des actinides après 500 000 ans ~ 15 m



Dose maximale à la surface du au stockage

2.2 Solutions de gestion des déchets



L'inventaire prévu pour CIGEO :

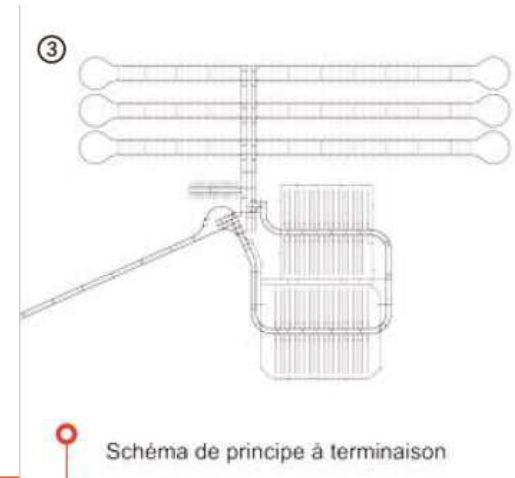
Le projet actuel de CIGEO concerne les déchets produits et « à produire » des **réacteurs construits avant 2006 (donc pas FLA 3)**

60 % des MA-VL et 30% des HA-VL de CIGEO sont déjà produits

La surface totale représente environ 15 km² à terme

5% du total des déchets HA seront installés en 2027 dans CIGEO pour observation pendant 50 ans.

- Le stockage industriel des HA ne débutera donc pas avant 2077 .





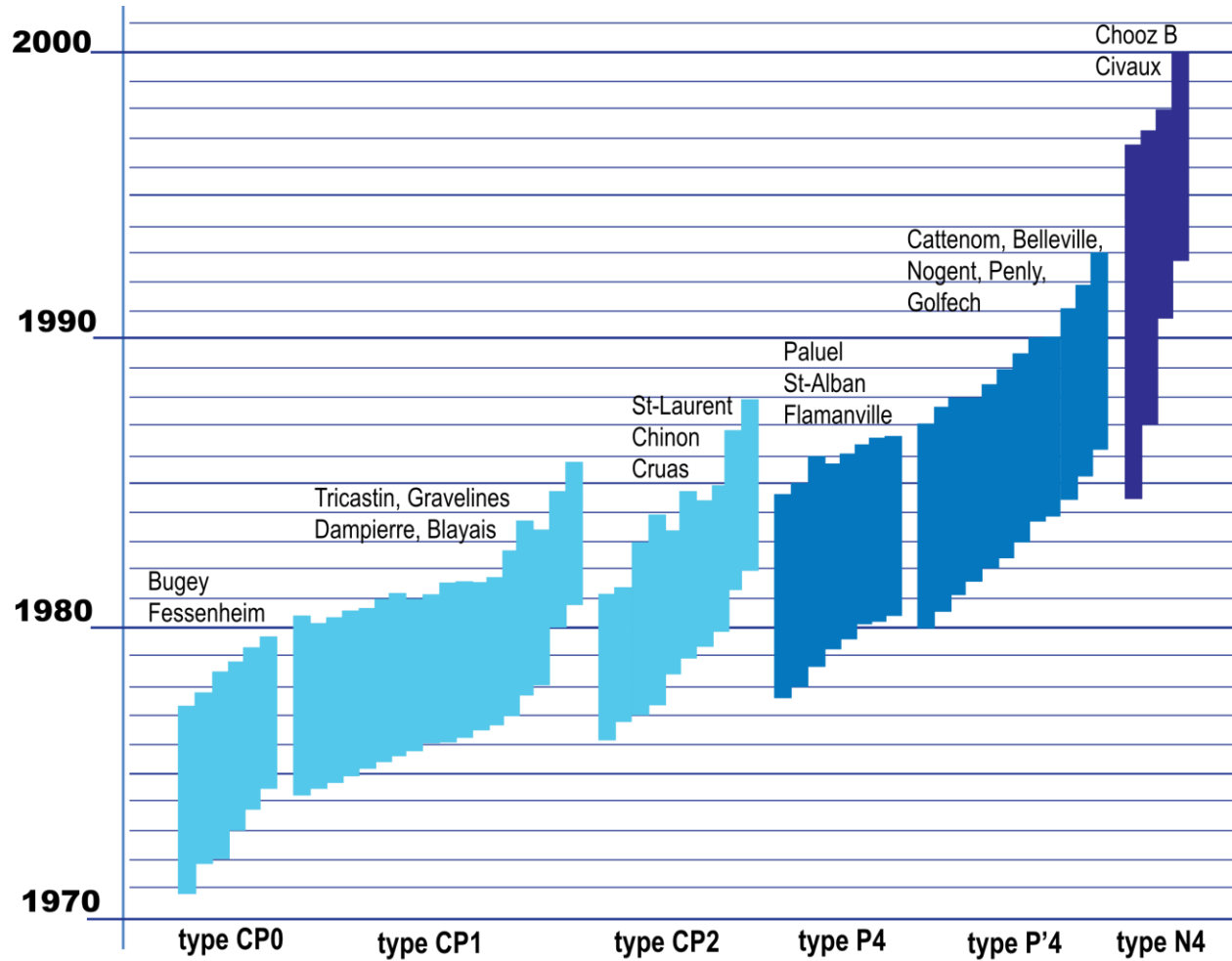
Plan de la présentation

- Contexte: Une source d'énergie très discutée
- Quelques rappels de physique
 - Fission nucléaire
 - Réaction en chaîne
 - Combustible et déchets nucléaires
- Facile de construire des nouveaux réacteurs nucléaires?
 - EPR 2
 - Gen IV
- Energie nucléaire et transition énergétique
 - Interactions avec les ENR



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)

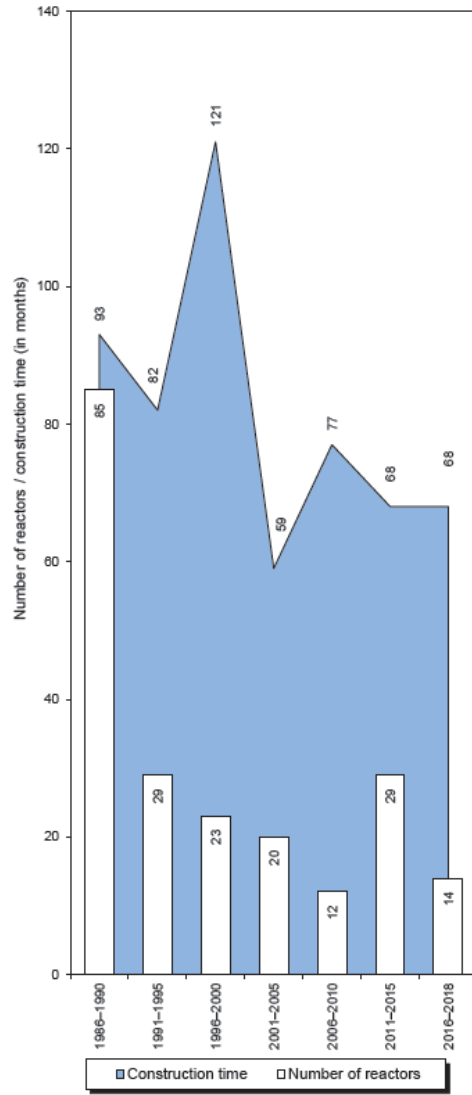
P4 : 8 en 3 ans (TC 7 ans)

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

N4 : 4 en 9 ans (TC 12 ans)



nouveaux réacteurs nucléaires? Quelques stats

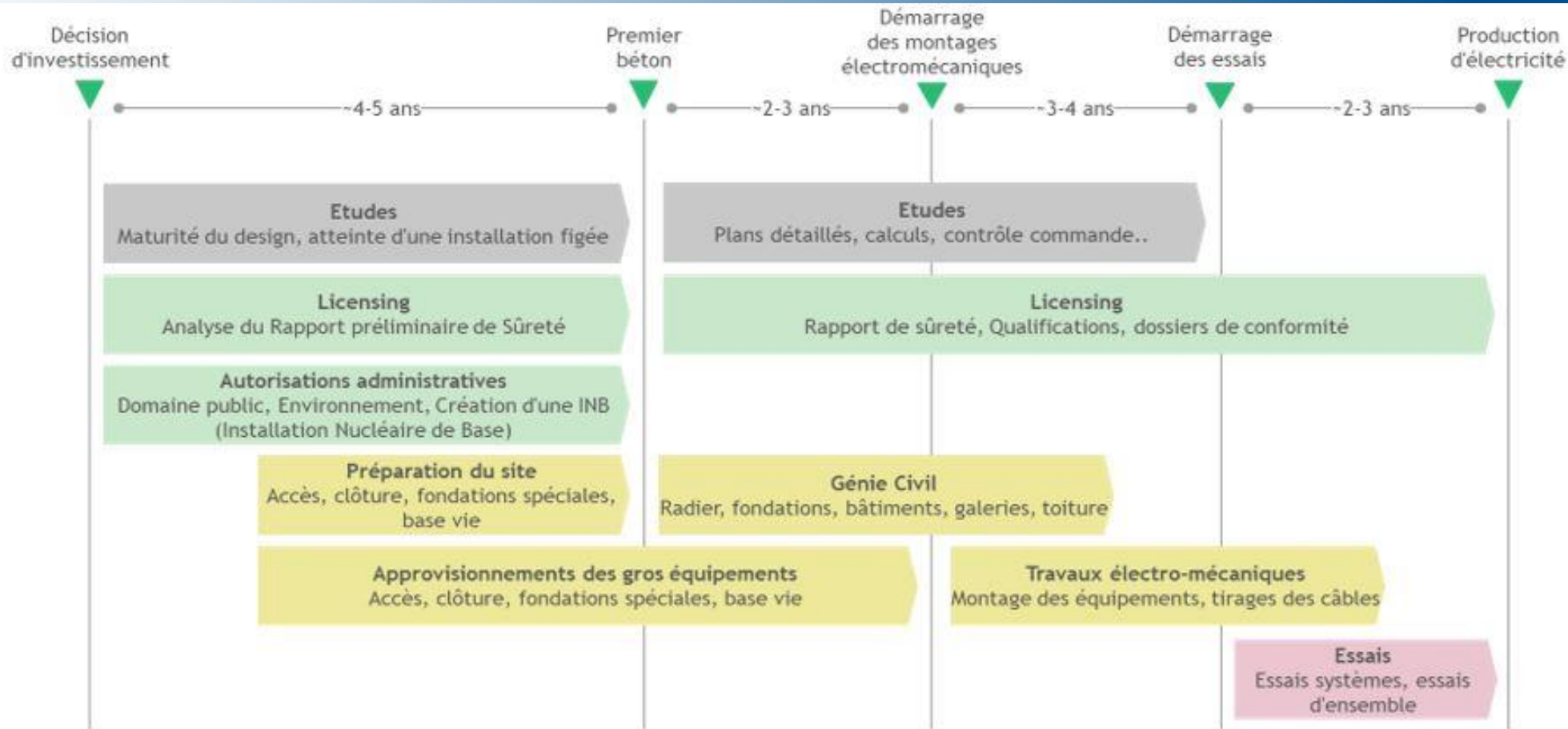


Réacteur	Pays	Type	Durée de construction (ans)
Shidao Bay 1	Chine	SMR	9.0
Taishan 1	Chine	EPR	9.2
Taishan 2	Chine	EPR	9.4
Olikiluoto 3	Finlande	EPR	16.5
Flamanville 3	France	EPR	17.6
Sanmen 1	Chine	AP1000	9.4
Sanmen 2	Chine	AP1000	8.9
Haiyang 1	Chine	AP1000	9.1
Haiyang 2	Chine	AP1000	8.6
Vogtle 3	Georgie	AP1000	9.8
Vogtle 4	Georgie	AP1000	9.9

Réacteur démarrés depuis 2020



nouveaux réacteurs nucléaires? Procédure nouveau réacteur



Plan pour les nouveaux réacteurs Français: 10-15 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
 - Avis ASN en janvier 2026 : recommandation d'ajustement => délai
 - Estimé à 17 milliards d'€ les 2
 - vise une entrée en service en 2038 (+15 ans)
 - **Gravelines 7 et 8**
 - Débat public : 17 septembre 2024 au 17 janvier 2025
 - Demande d'autorisation de création fin de l'année 2026
 - 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**

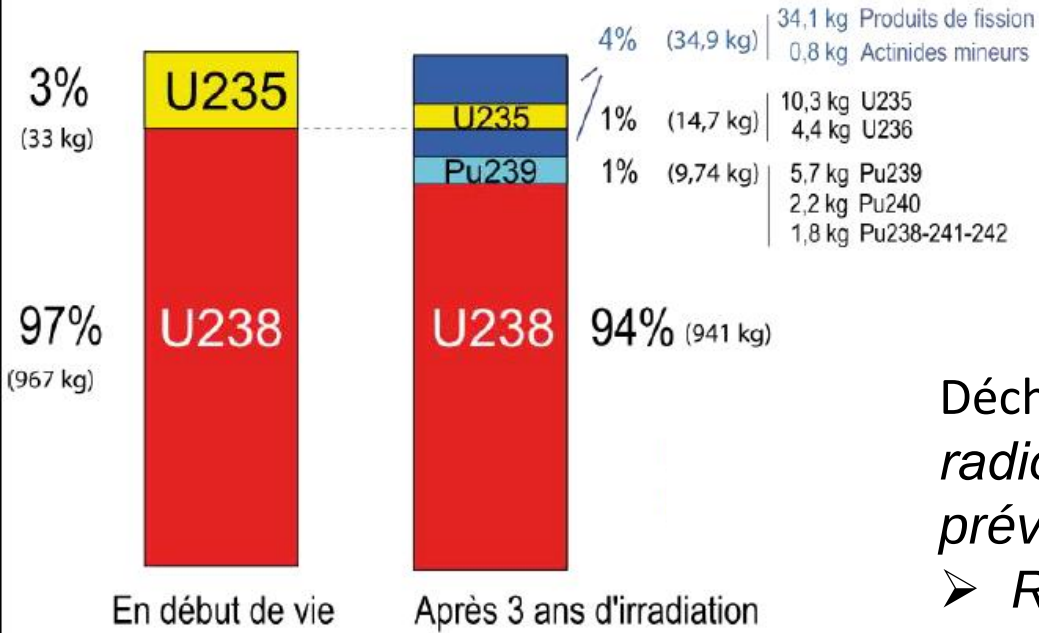


Plan de la présentation

- Contexte: Une source d'énergie très discutée
- Quelques rappels de physique
 - Fission nucléaire
 - Réaction en chaîne
 - Combustible et déchets nucléaires
- Facile de construire des nouveaux réacteurs nucléaires?
 - EPR 2
 - Gen IV
- Energie nucléaire et transition énergétique
 - Interactions avec les ENR



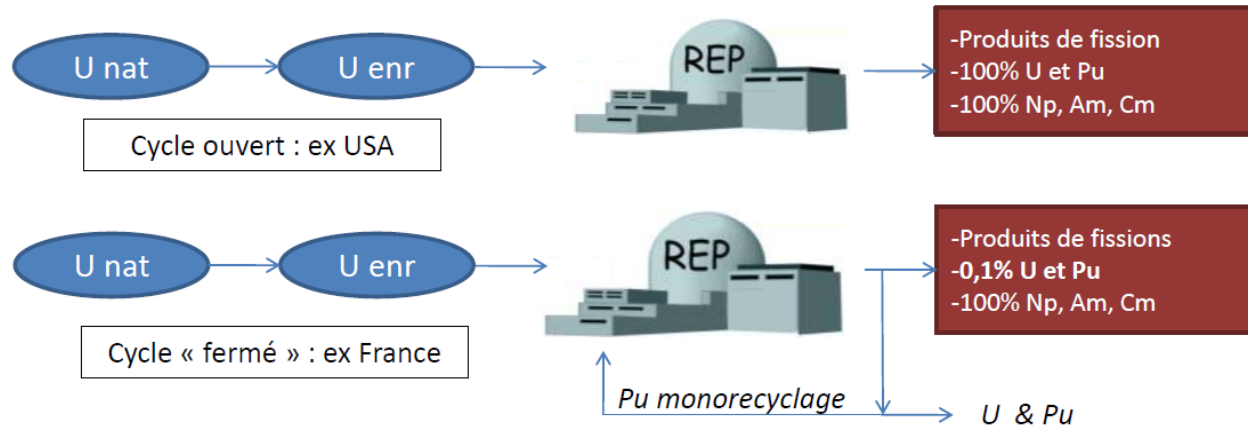
Quelques rappels de physique : Combustible et déchets



« 96 % des combustibles usés sont ré-utilisables »

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

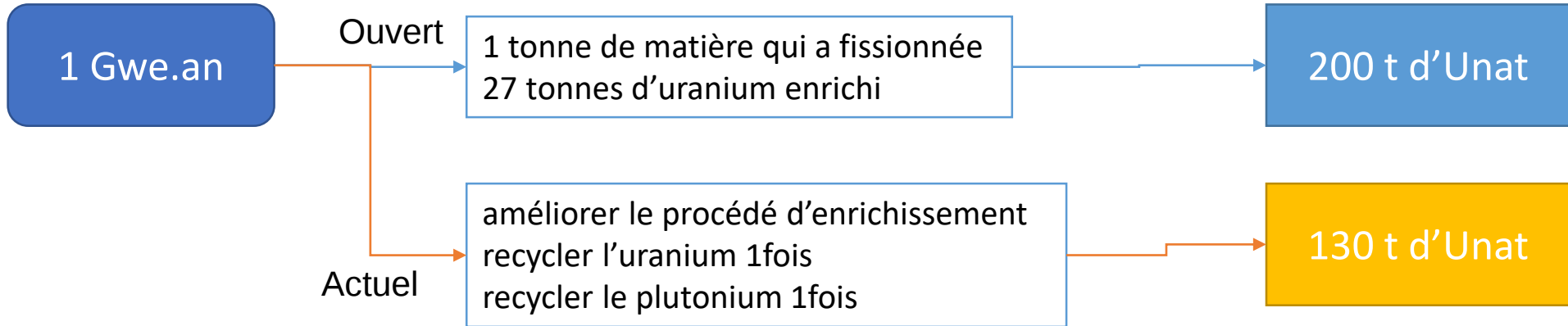
➤ Recycler pour diminuer les déchets



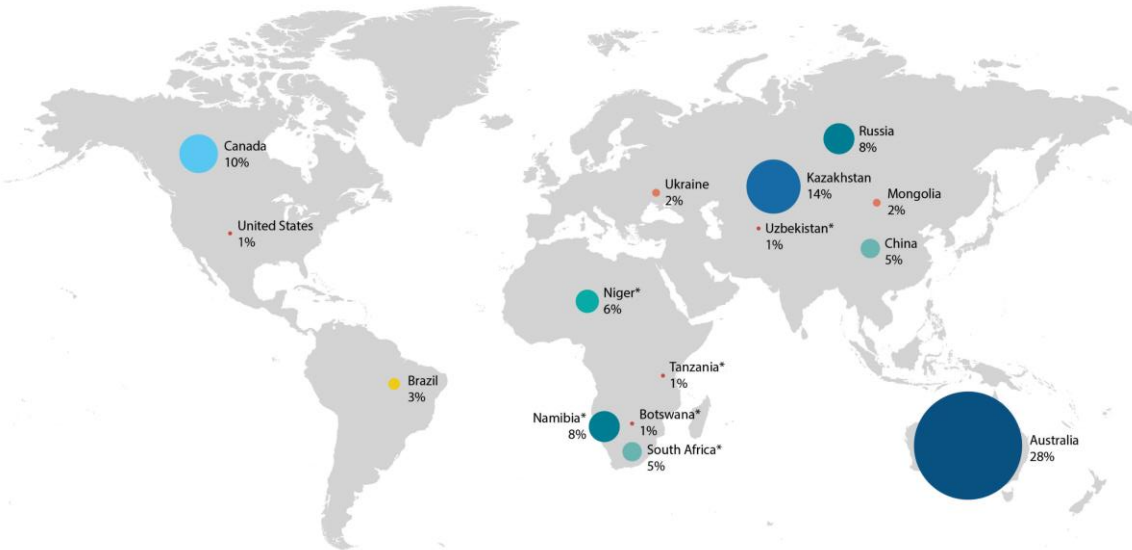


Recyclage et ressources

Cycle traditionnel : *Basé sur l'utilisation de l' ^{235}U (0,7% de l'uranium naturel)*



Ressources en uranium (Livre rouge OCDE/IAEA)

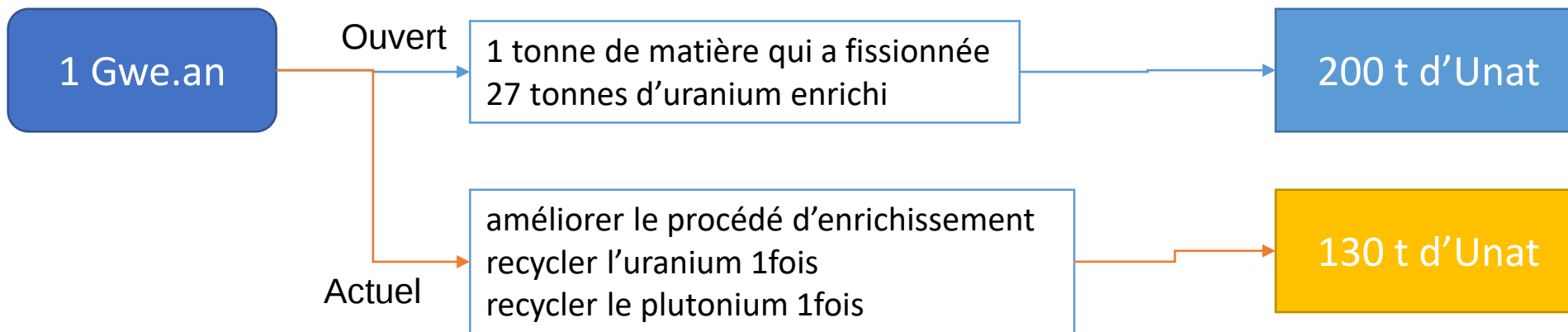


Ressource	Masse (kt)	/200	/Demande actuelle
<80\$/kg	2 313	11 565	40 ans
<130\$/kg	7 944	39 720	134 ans
<260\$/kg	10 714	53 570	181 ans

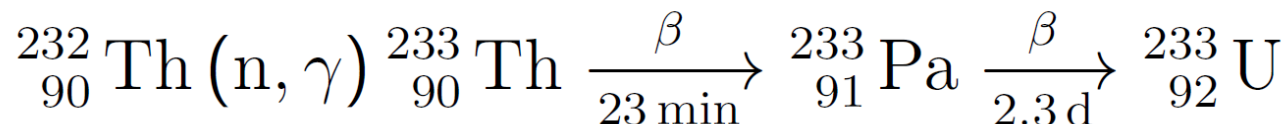
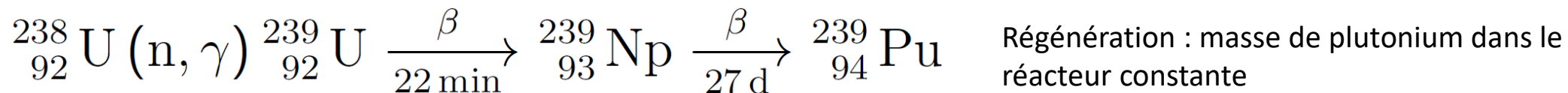


Recyclage et ressources

Cycle traditionnel : *Basé sur l'utilisation de l' ^{235}U (0,7% de l'uranium naturel)*



Il est possible de valoriser l' U-238 directement via la production de plutonium



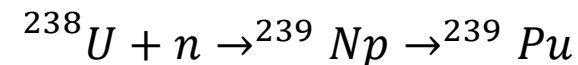
1 t d'Unat

Dans les deux cas, il « suffit » d'avoir la matière fissile au démarrage pour fonctionner « indéfiniment » (ressources en fertile : qqes 1000 ans)



Gen 4 et Transmutation

- 2001 : forum international Génération IV
 - Maturité technique vers 2030
 - Amélioration la sûreté nucléaire
 - Diminution du risque de prolifération nucléaire
 - **Incinération des stocks de plutonium**
 - Minimisation des déchets nucléaires
 - **Recyclage des actinides issus des réactions nucléaires**
 - Economie des ressources naturelles**
 - Diminution des coûts
 - Autres usages que la production d'électricité,
 - Hydrogène, eau potable, chaleur
- 6 concepts proposés :
 - Sodium Cooled Fast Reactor (SFR ou RNR-Na) ;
SuperPhenix, ASTRID
 - Gaz Cooled Fast Reactor (GFR)
 - Lead Cooled Fast Reactor (LFR)
 - Super Critical Water Reactor (SCWR)
 - Very High Temperature reactor (VHTR)
 - Molten Salt Reactor (MSR)
- + Accelerator Driven System (ADS) Myrrha



→ **Réaction de régénération du plutonium**

→ **Plus besoin d'uranium naturel !**

→ **Impose un spectre rapide**

Economie de la ressource

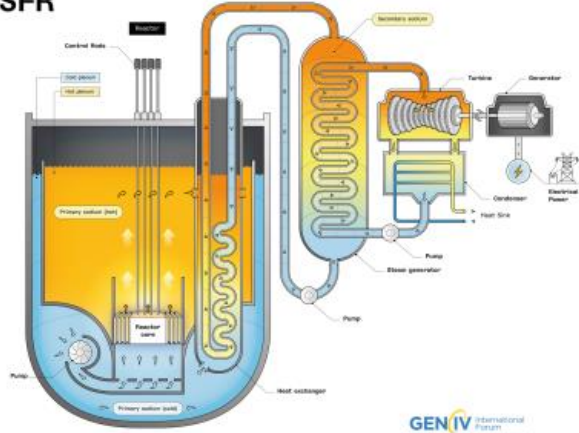
Recyclage du plutonium (qui n'est plus un déchet)

Pourquoi pas recyclage des actinides mineurs ?



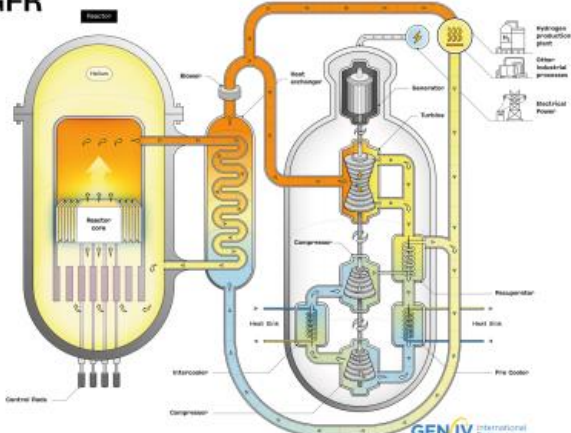
Gen-4 International Forum

SFR



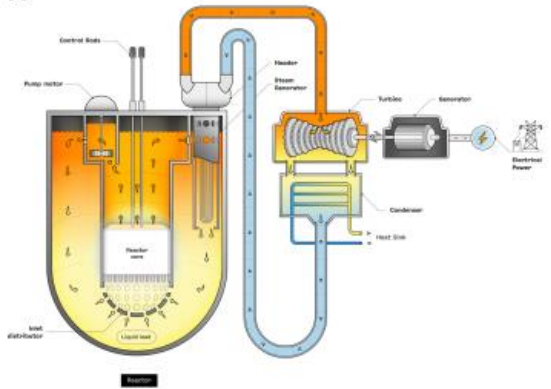
Sodium-cooled Fast Reactor

GFR



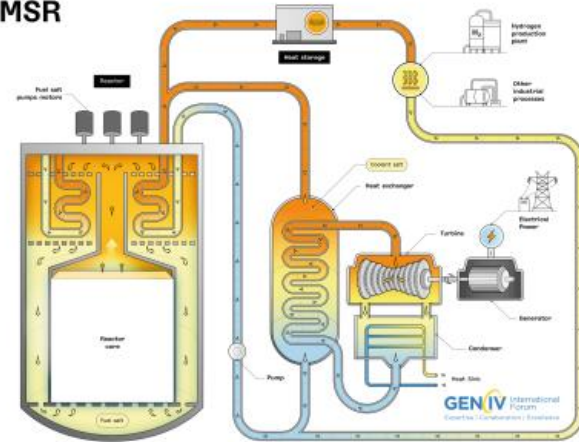
Gas-cooled Fast Reactor

LFR



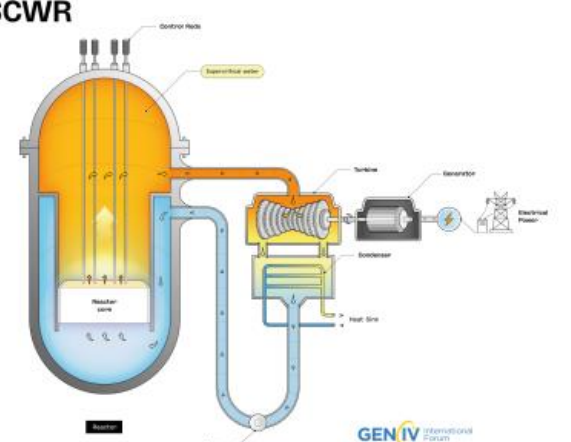
Lead-cooled Fast Reactor

MSR



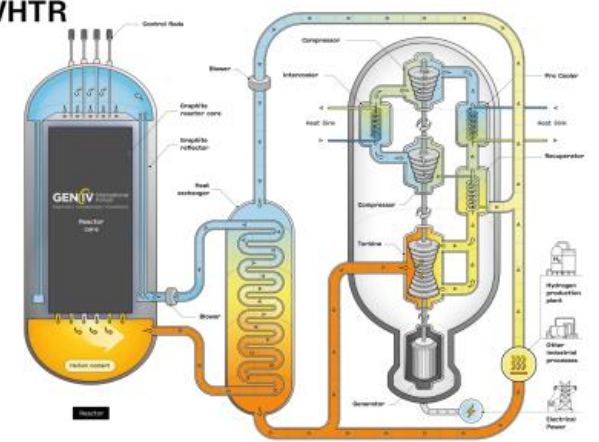
Molten Salt Reactor

SCWR



SuperCritical-Water-Cooled Reactor

VHTR



Very-High-Temperature Reactor



Gen-4 International Forum 2023 report

- **SFR** : Le plus mature
 - Phénix (250 MWe, 1974-2010) et Superphénix(1240 MWe, 1984-1997) ont fourni de l'électricité au réseau en France
 - BN-600/BN-800 (Russie) en opération commerciale
 - BN-1200M (Russie) premier béton annoncé pour 2027
 - CFR-600 (Chine) : L'unité 1 a divergé dès 2023, en essais, raccordement réseau attendu 2026 + unité en construction
 - Natrium (USA, Terrapower – 345 MWe) : Permis de construire NRC voté le 4 mars 2026, construction nucléaire démarrée le 23 avril 2026
- **MSR** :
 - TMSR-LF1 chinois (2 MWth) pleine puissance 17 juin 2024, preuve de conversion Th-U-233 en novembre 2025. Premier rechargement à la même époque.
 - Démo MSR Chinois (100MWth) annoncée pour 2035
 - MSR-1 (USA - Natura Resources) 1 MWt de recherche, permis NRC sept. 2024, cible criticité sous pilote DOE au 4 juil. 2026.
 - Kairos Power « Hermes » (USA) début construction mai 2025, , cible criticité sous pilote DOE au 4 juil. 2026.



Gen-4 International Forum 2023 report

- **VHTR :**
 - HTR-PM (Chine – 210 Mwe) en opération commerciale depuis 2023
 - Cogénération : chaleur connectée au réseau local en mars 2024 ;
 - HHTR (Japon – 30 MWth) redémarré en 2024)
 - Xe-100 (USA, 80 Mwe). Autorisation de construction mai 2026.
- **LFR :**
 - Construction du BREST-OD-300 terminée en Russie (criticité fin 2026, connection au réseau S1 2027)
 - Configuration critique de MYRRHA (Belgique) annoncée pour 2036
 - Réacteurs tests visent déploiement d'ici 2030 (Newcleo?)
- **GFR :**
 - Le projet de démonstration ALLEGRO (75 MWt) comme démonstrateur principal
 - aucun calendrier de déploiement spécifique fourni.
- **SCWR :**
 - Aucun projet de construction
 - Pas de design finalisé

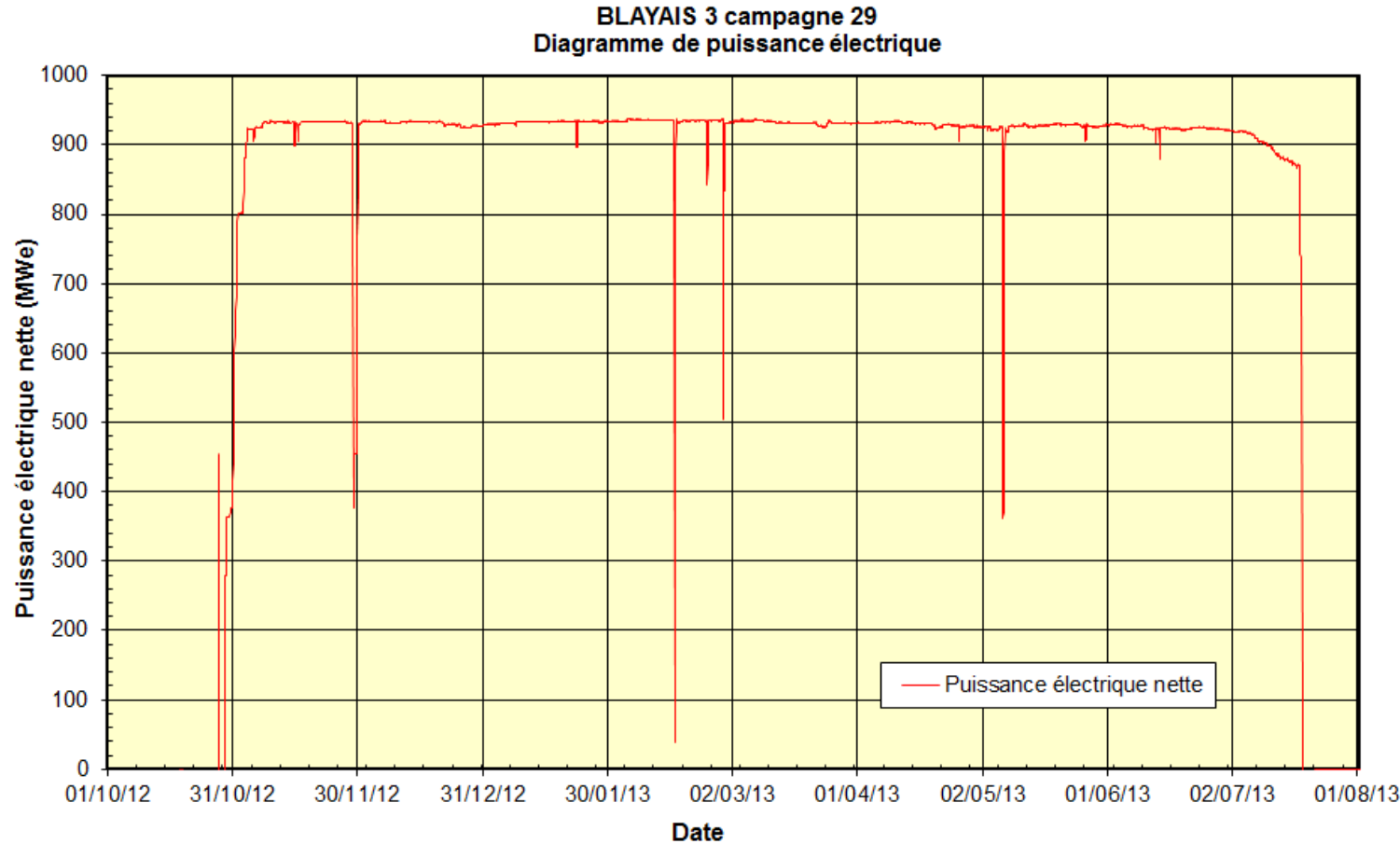


Plan de la présentation

- Contexte: Une source d'énergie très discutée
- Quelques rappels de physique
 - Fission nucléaire
 - Réaction en chaîne
 - Combustible et déchets nucléaires
- Facile de construire des nouveaux réacteurs nucléaires?
 - EPR 2
 - Gen IV
- **Energie nucléaire et transition énergétique**
 - Interactions avec les ENR



Nucléaire et transition énergétique : interaction ENR



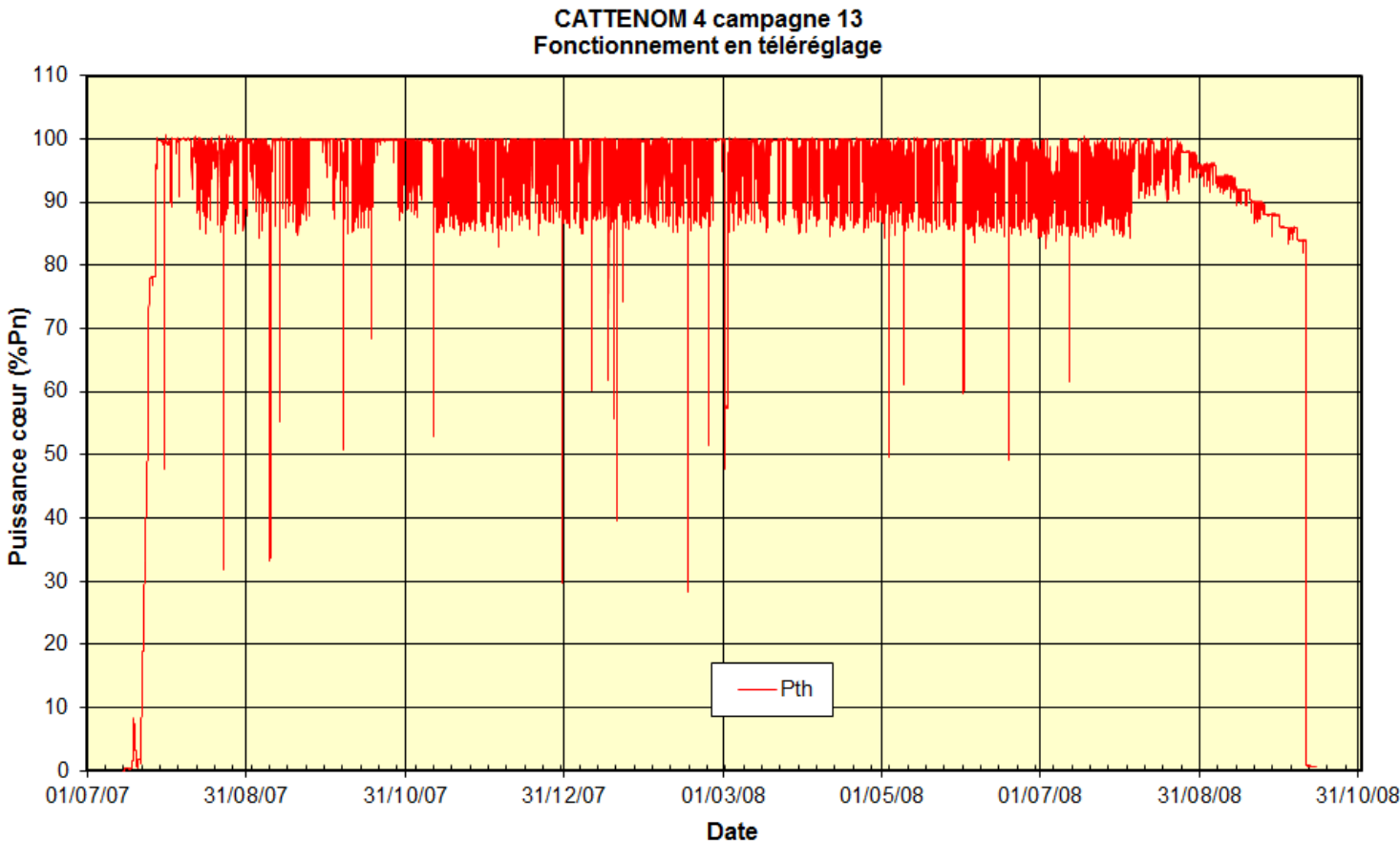
Le nucléaire est souvent utilisé en base

Puissance constante entre démarrage et arrêt

Arrêt pour rechargement et maintenance
=> Programmable l'été



Nucléaire et transition énergétique : interaction ENR



Participent au réglage des fréquences primaires, secondaires
(On veut garder du 50Hz sur le réseau)

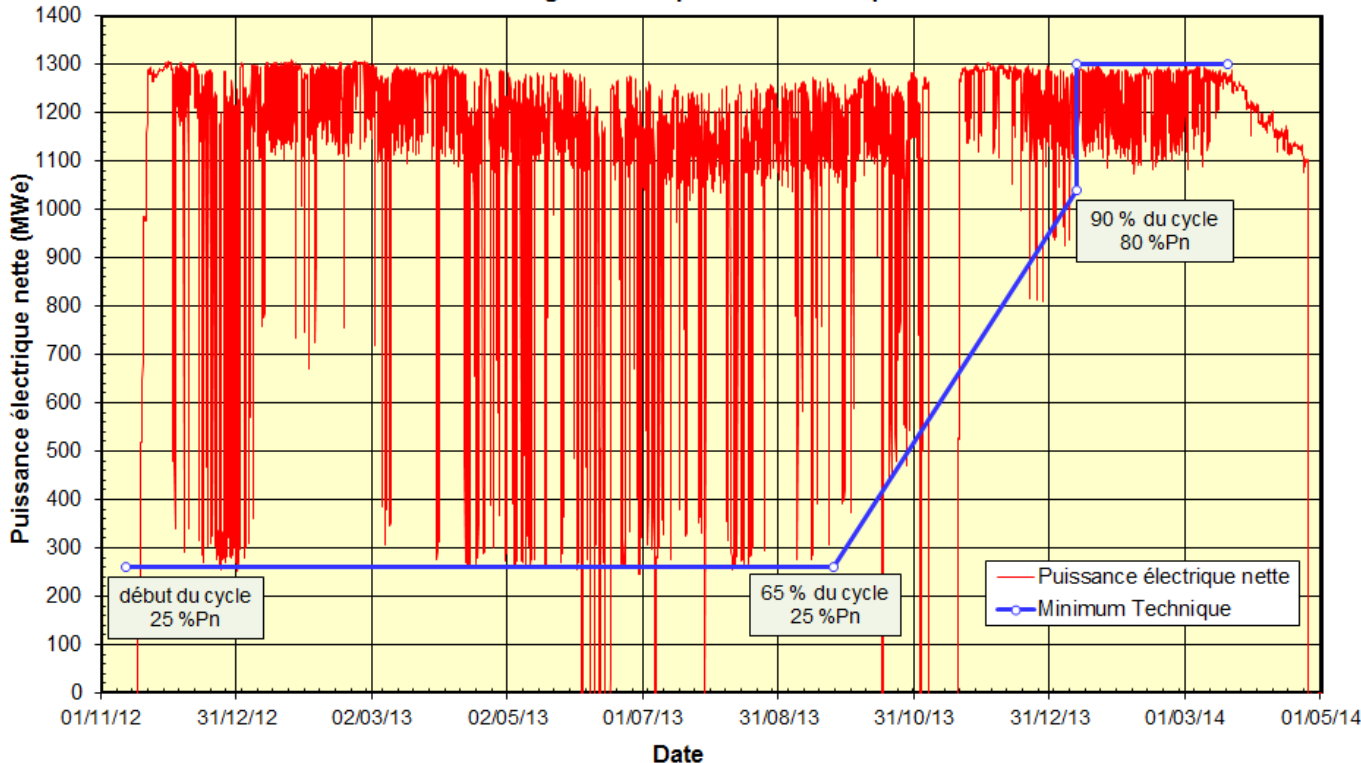
Variation [90% , 100%] :
pas de changement de température du cœur
Insertion faible des barres

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.



marc.ernoult@ijclab.in2p3.fr

N'hésitez pas !