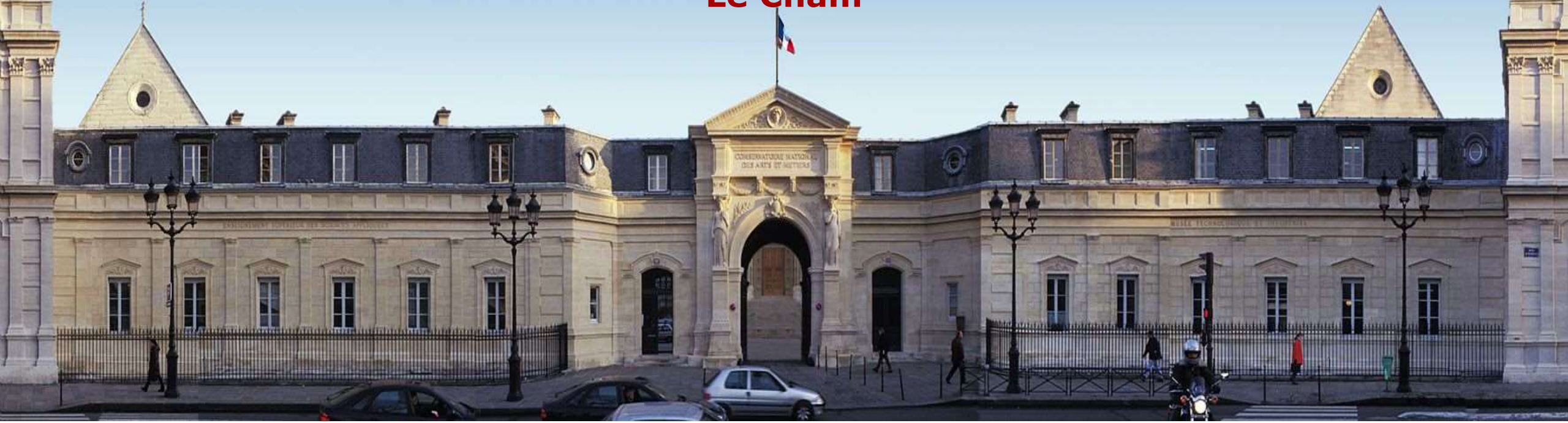
Atome, fission, combustible, centrale… l'énergie nucléaire sans tabou !

Emmanuelle Galichet

Enseignante-chercheure Sciences et Technologies Nucléaires

Le Cnam



L'énergie nucléaire pour une transition énergétique réfléchie

1. Situation énergétique et climatique actuelle
2. Histoire et état actuel de la filière
3. Comment marche un réacteur nucléaire pour produire de l'électricité ?

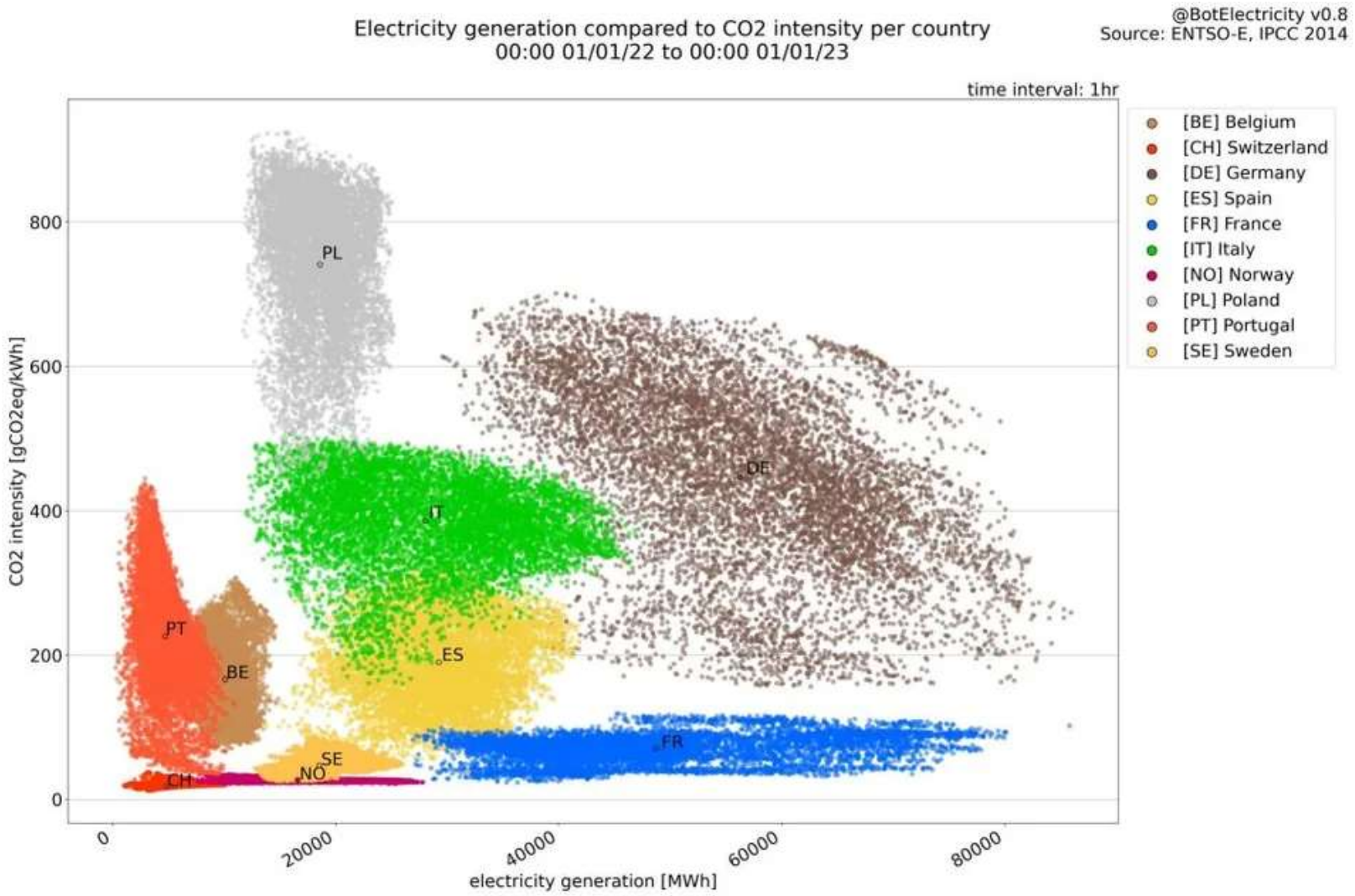
    a. La fission et la réaction en chaine
    b. La sureté nucléaire
    c. Le réacteur et la centrale
    d. Le cycle du combustible
    e. Les déchets

4. Futur

    a. Le futur proche
    b. Le futur plus lointain

1. Situation énergétique et climatique actuelle

En images (Europe)



- Plus gros producteurs en Europe : France et Allemagne.
- Plus gros émetteur de CO2 : La Pologne.
- Le moins émetteur de CO2: La France, la Suisse, la Norvège et la Suède.

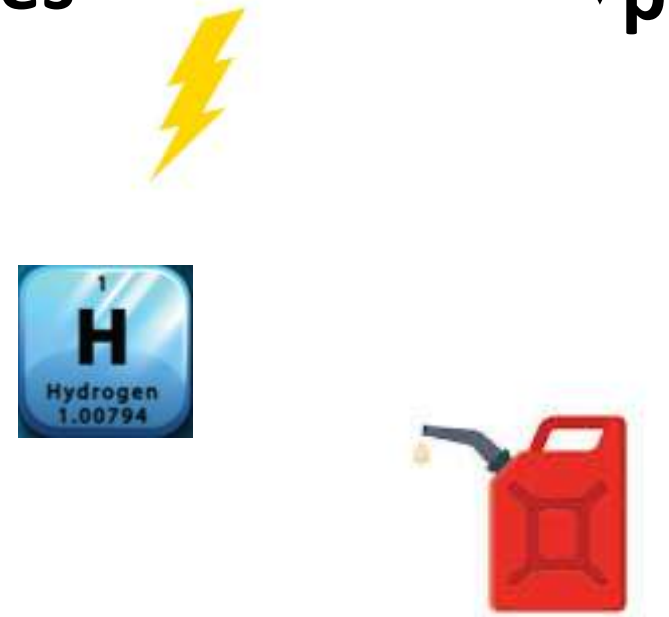
Quelques définitions

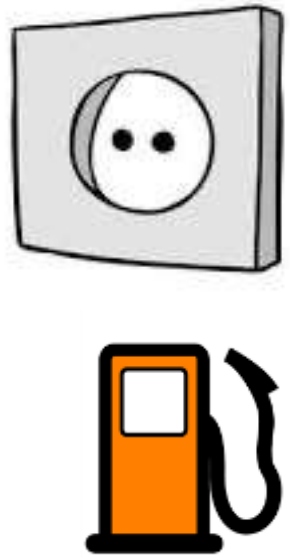
Energie primaire → **Energie secondaire** → **Energie finale** → **Energie utile**

pertes

pertes

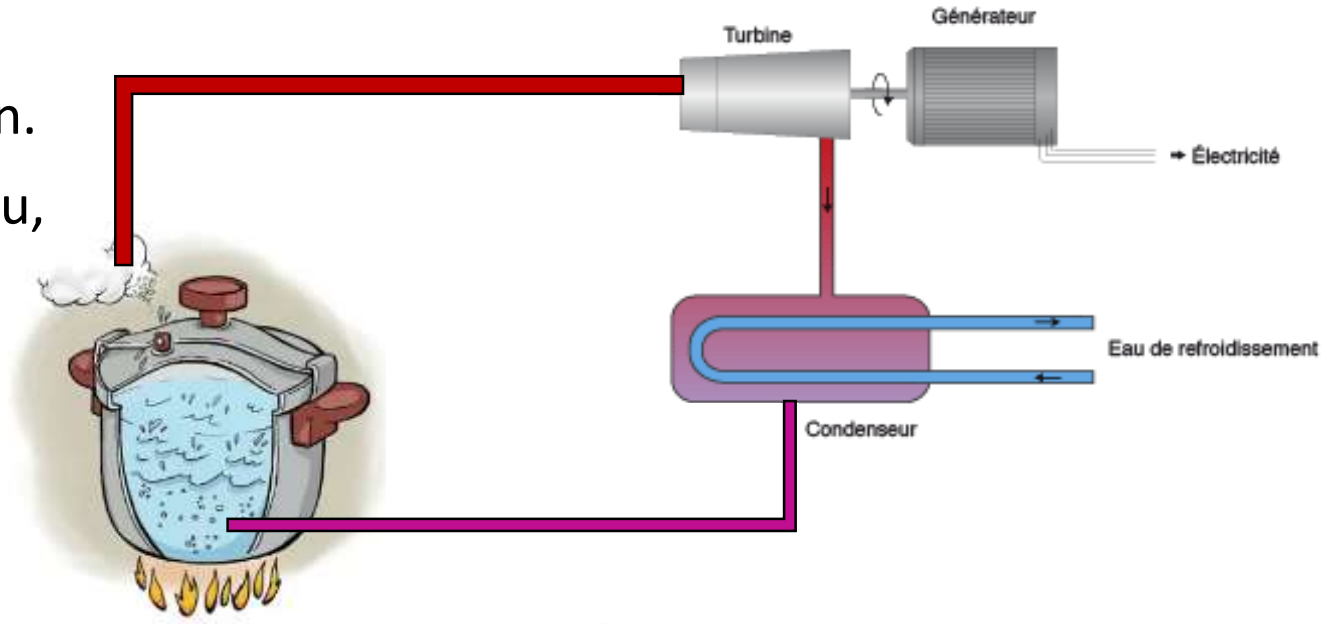
pertes

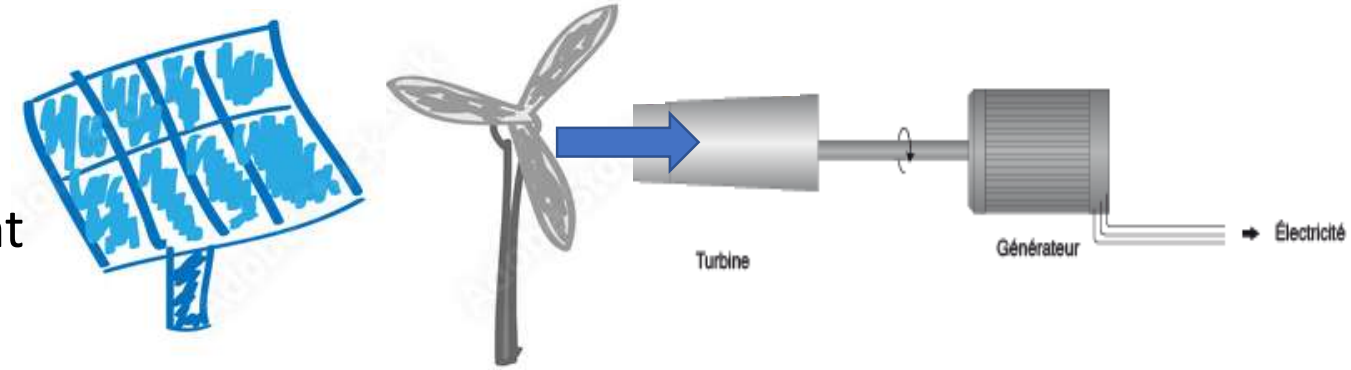




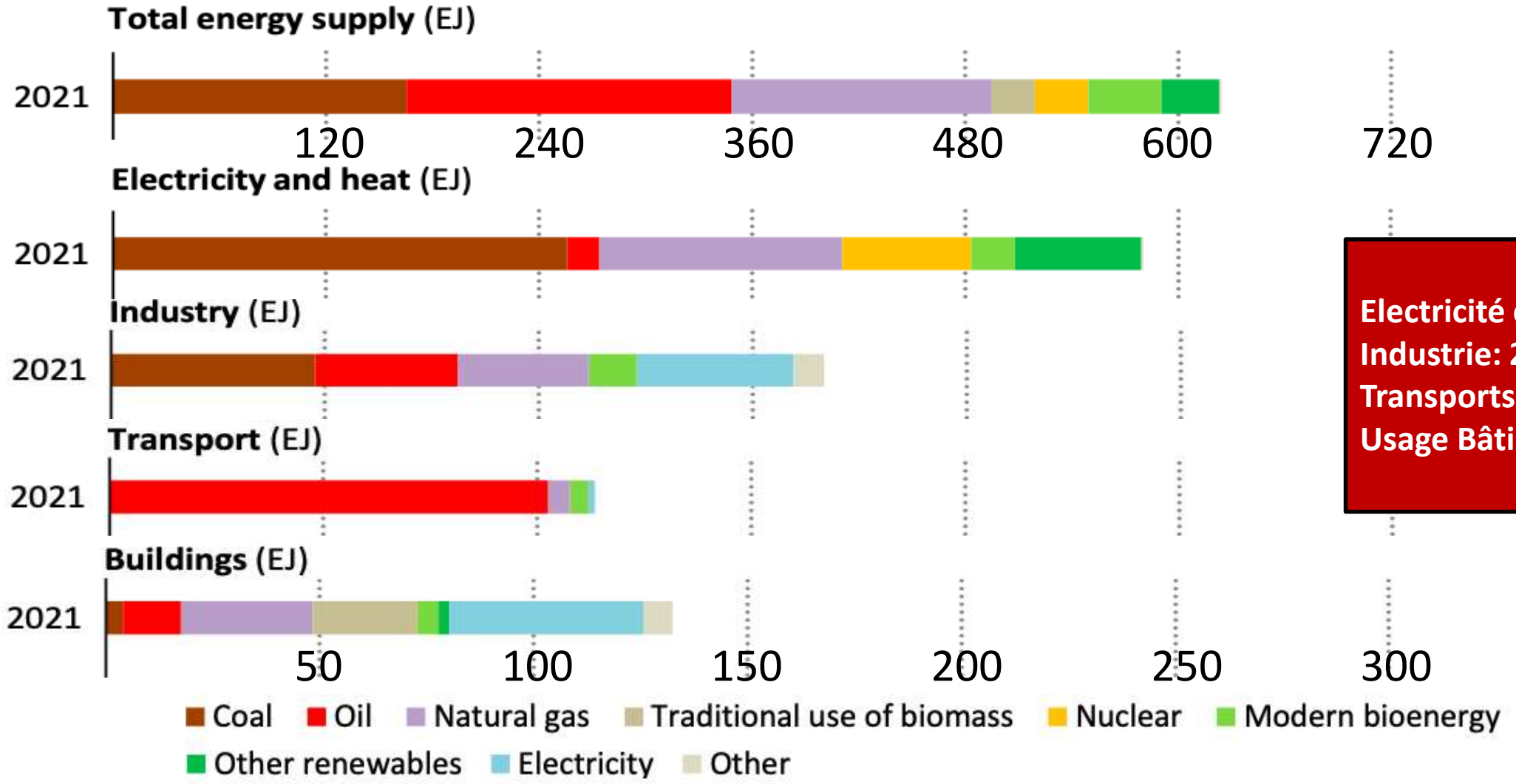
L'électricité

- L'électricité = énergie secondaire
- Pertes d'énergie importantes lors transformation.
- Mode de production principal = Chauffer de l'eau, avec combustibles fossiles (charbon…), énergies renouvelables (bois…) ou réactions nucléaires.
- Processus = vapeur d'eau injectée sous pression dans turbine entraînant la rotation d'un alternateur.
- Autres méthodes:
  - énergie du vent ou énergie hydraulique entraînant la rotation de l'alternateur.
  - Le rayonnement solaire converti directement en électricité dans les panneaux solaires via l'effet photoélectrique.





Offre mondiale d'énergie primaire et demande par secteur et combustible

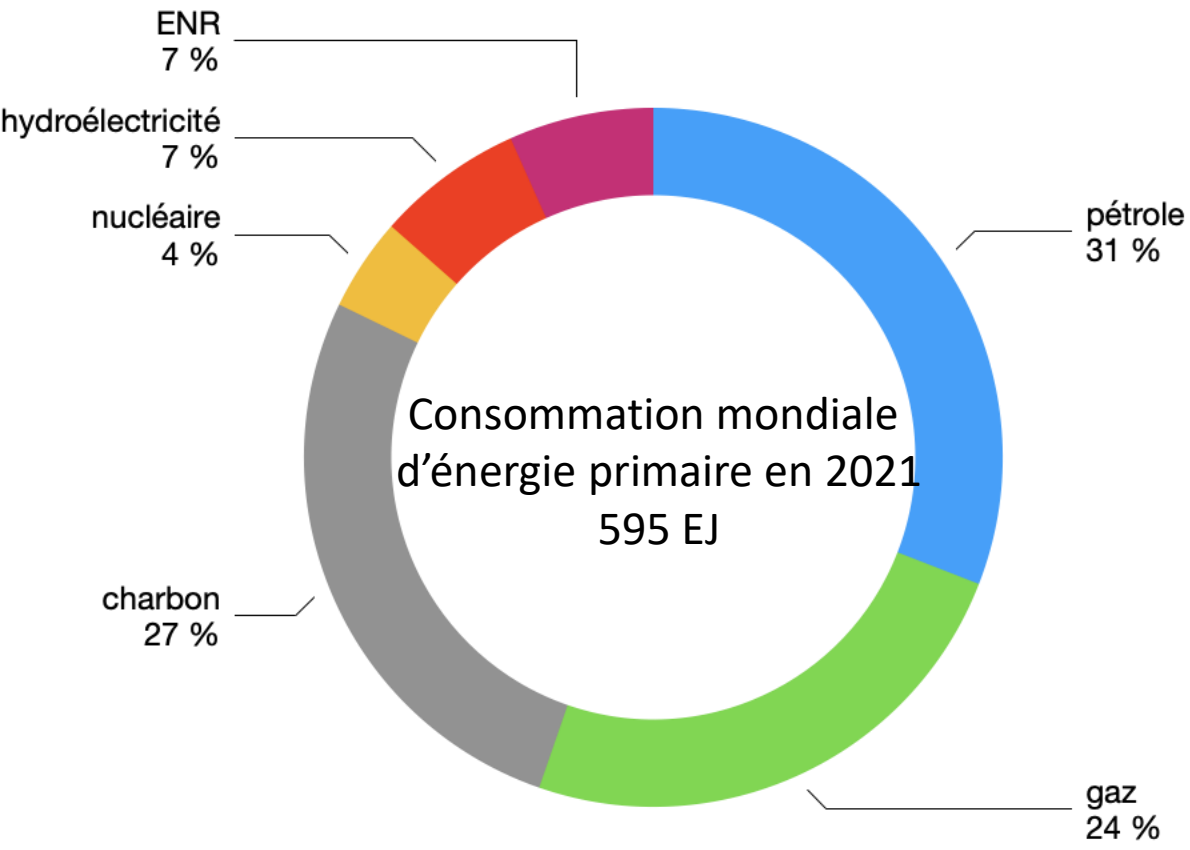


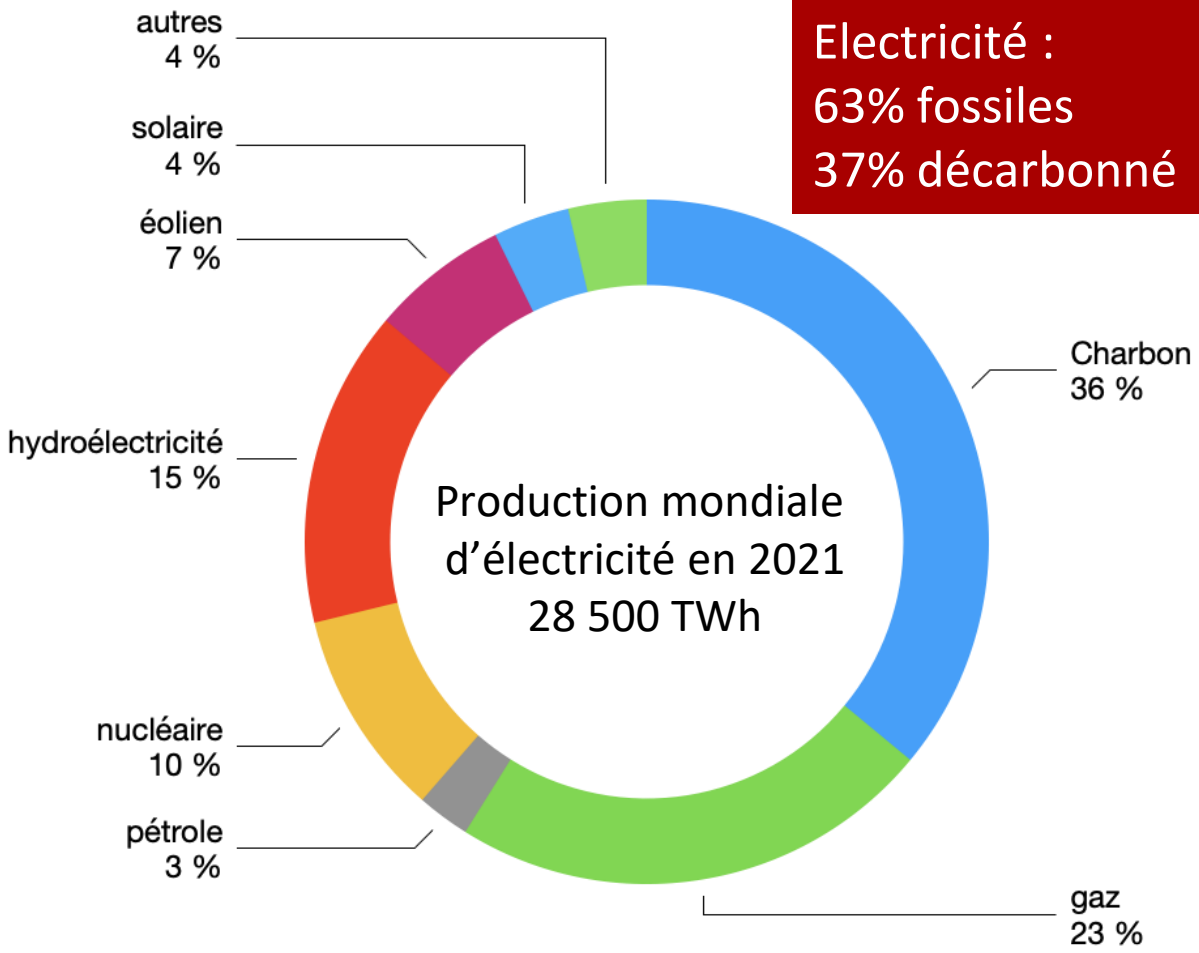
Electricité et chaleur: 40%
Industrie: 25%
Transports : 15%
Usage Bâtiments: 20%

(Source AIE 2022)

Les chiffres clés de l'énergie Monde

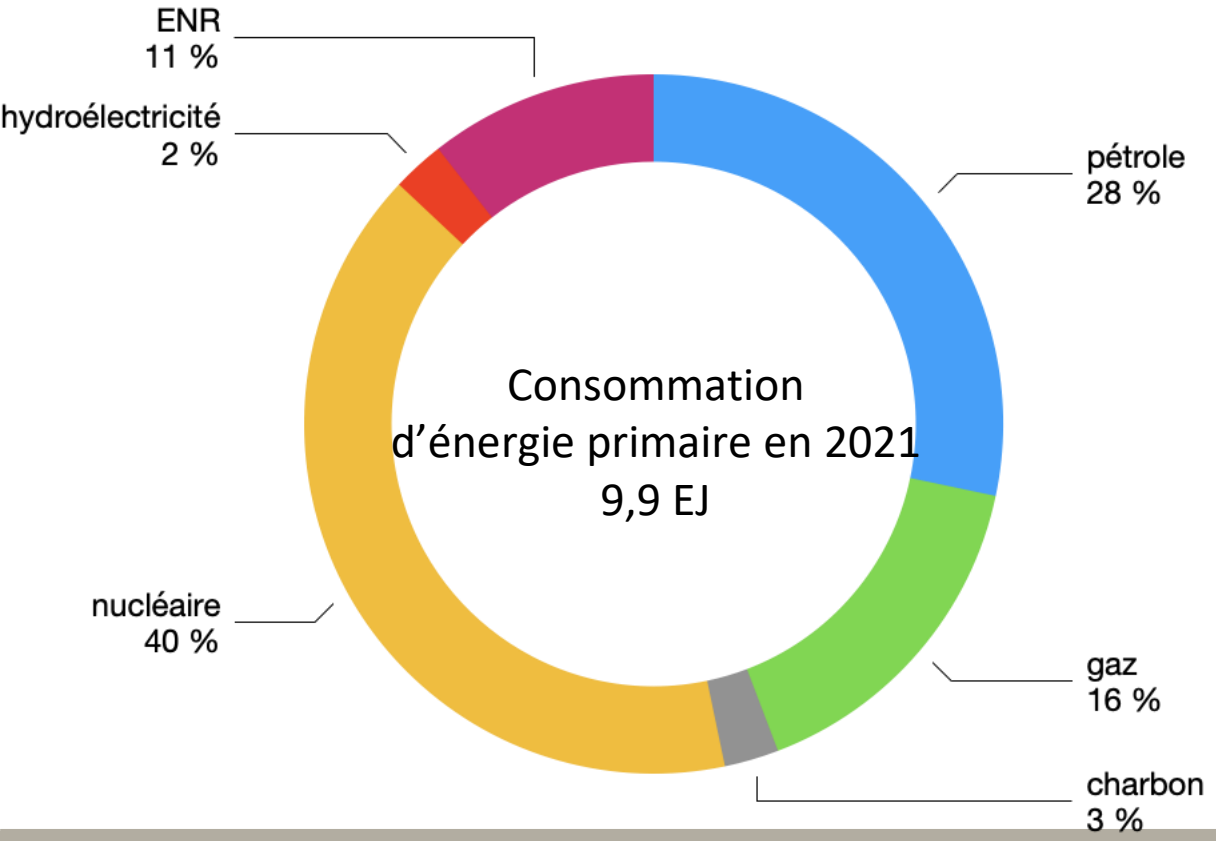
Primaire :
85% fossiles
15% décarbonné
Electricité :
63% fossiles
37% décarbonné

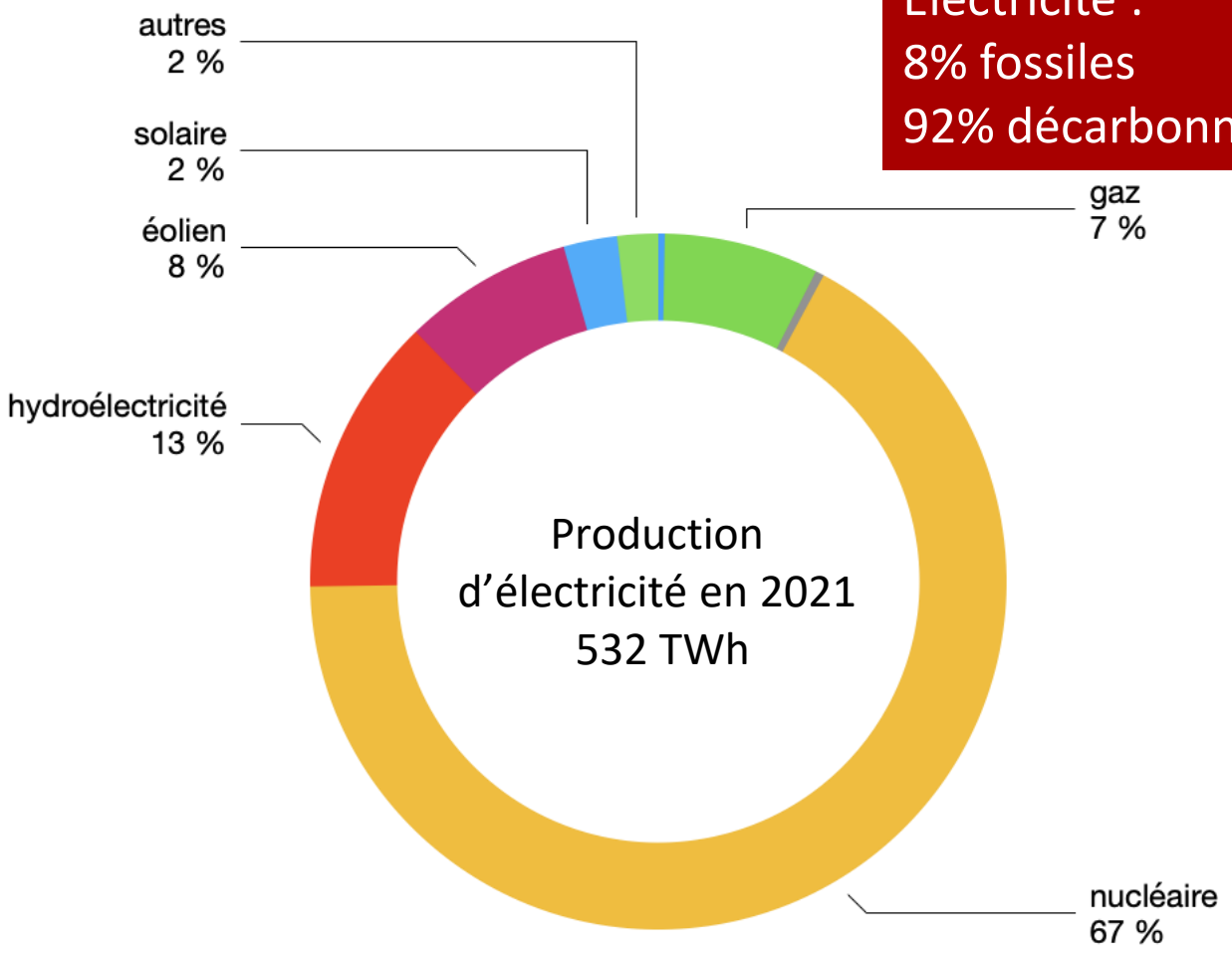




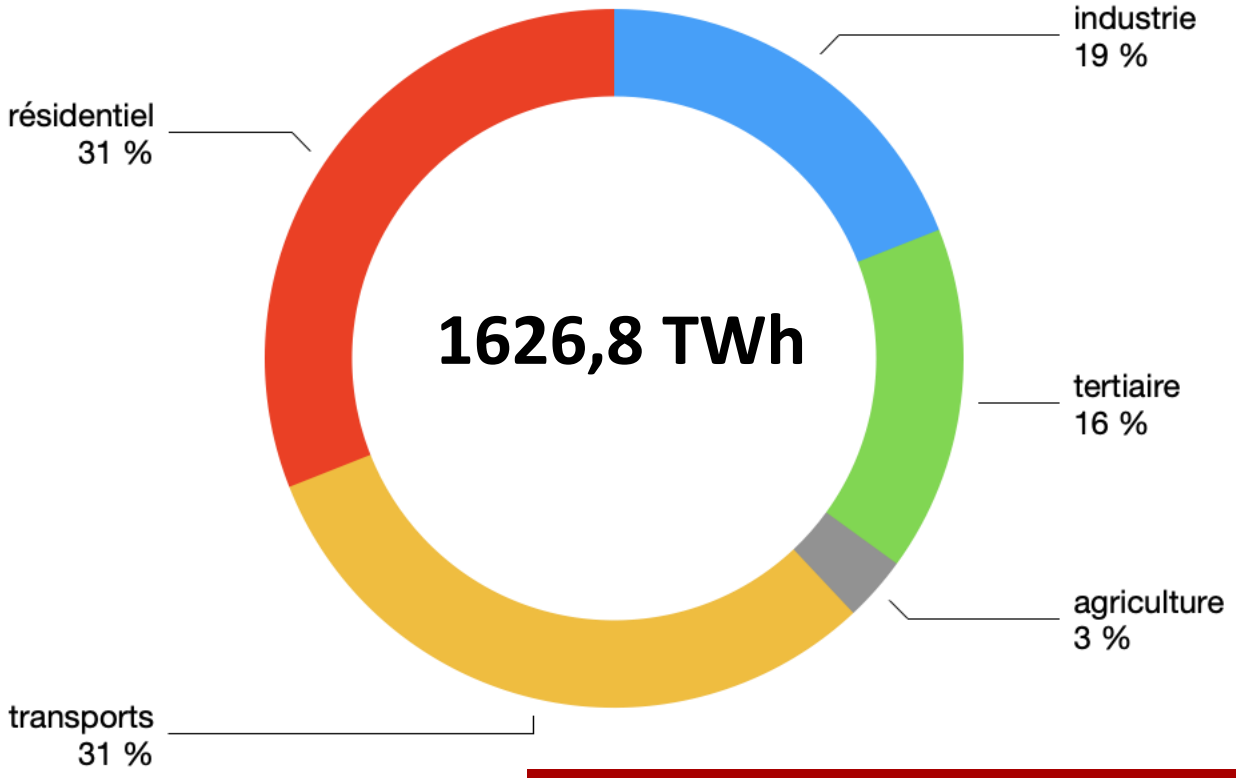
Les chiffres clés de l'énergie France

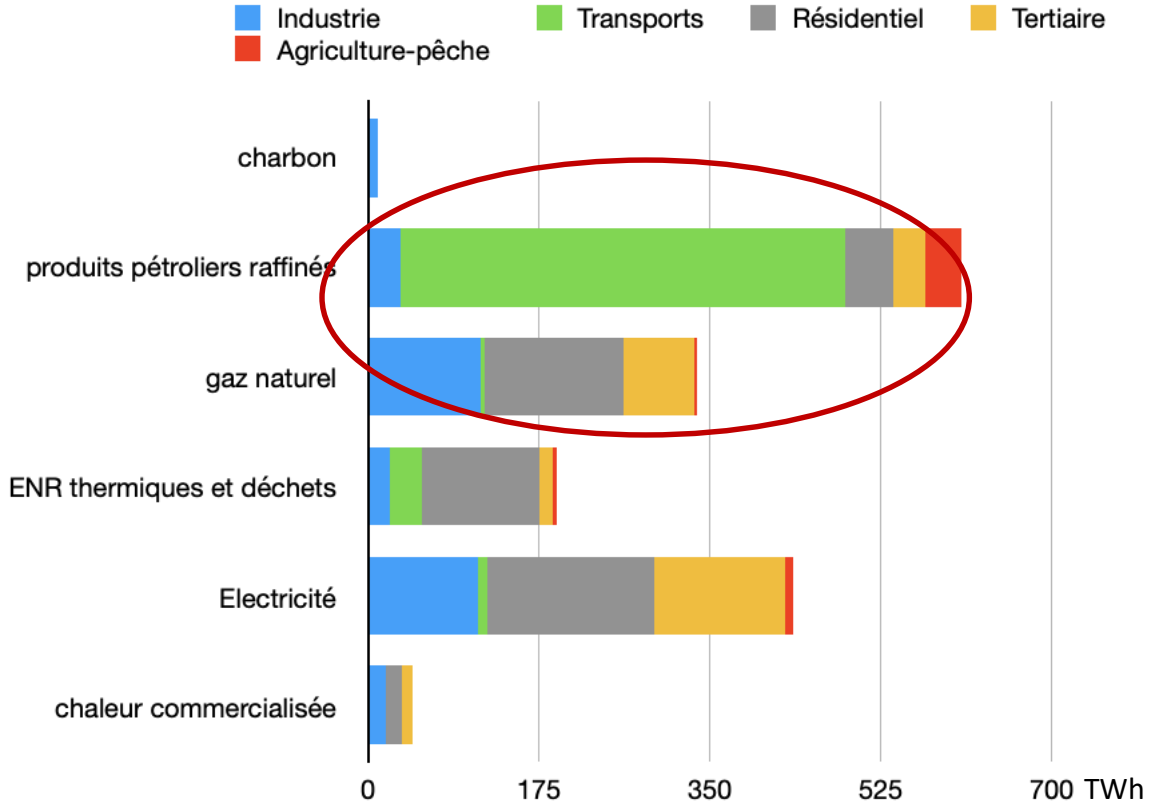
Primaire :
47% fossiles
53% décarbonné
Electricité :
8% fossiles
92% décarbonné





Consommation d'énergie finale par secteur en 2021 en France





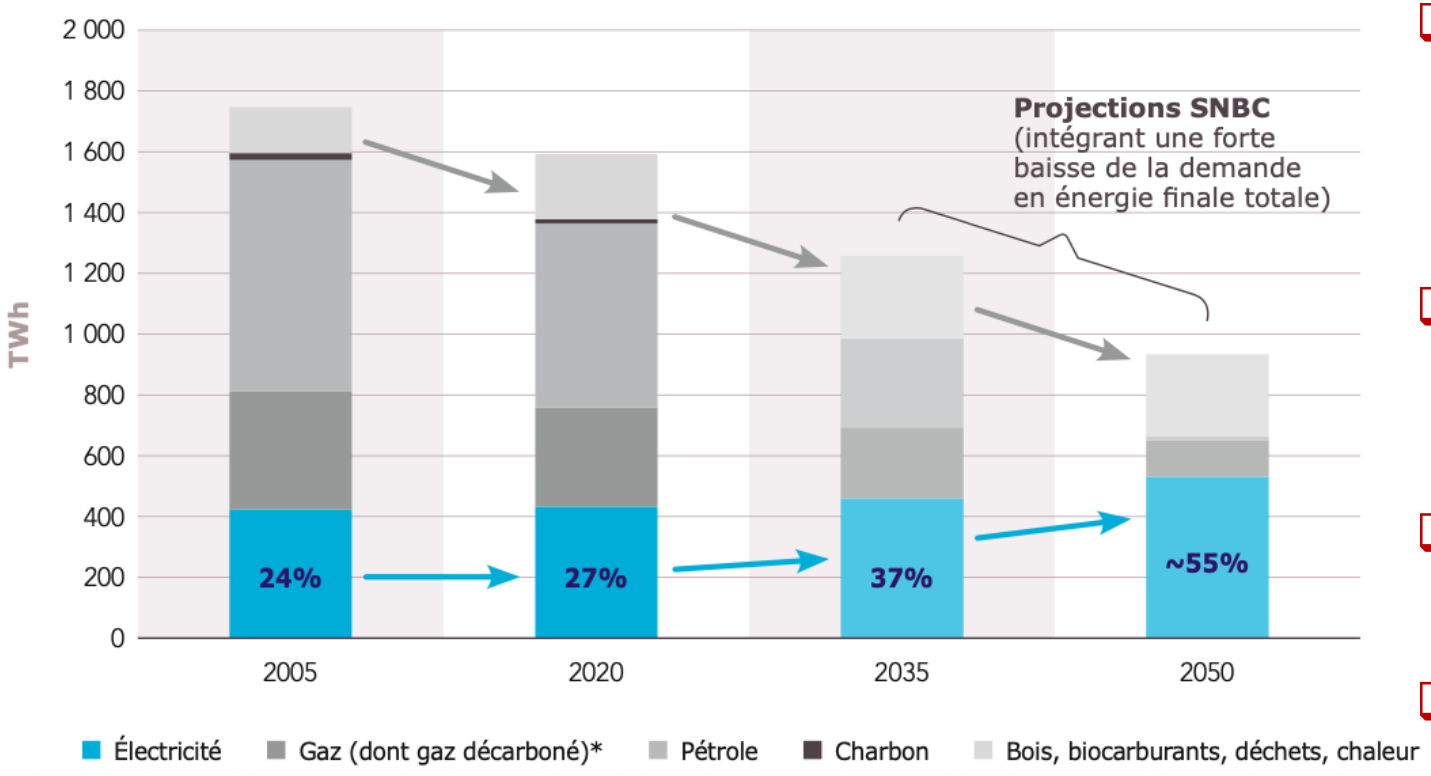
Objectif: diminuer les fossiles

1. **Diminuer pétrole dans les transports**
2. **Diminuer le gaz dans l'industrie, chauffage bâtiments**

Conclusion 1ère partie: L'énergie : l'enjeu du 21ème siècle

- La lutte contre le réchauffement climatique : diminuer les émissions de gaz à effet de serre.
- Pour atteindre la neutralité carbone en 2050 : diminuer nos émissions de CO2 de 10 t CO2/personne actuellement à 2 tCO2eq/personne en France.
- Urgence à décarboner au maximum tout ce que l'on peut décarboner : arrêter de consommer des énergies fossiles
- Ordre de grandeurs:
  - les renouvelables et le nucléaire : moins de 50 g de CO2 /kWh
  - les énergies fossiles : plus de 500 g de CO2 /kWh
- Fondamental de décarboner les secteurs de l'économie hors électricité
  - les transports (1er émetteur de CO2),
  - l'industrie, l'agriculture et l'habitat.
- La production d'électricité d'origine nucléaire répond à cet enjeu en faisant partie d'un mix énergétique décarboné aux côtés des ENR.

La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC)



- la France s'est engagée en 2015 à respecter l'objectif signé lors de l'Accord de Paris sur le Climat.
- SNBC = fixe les objectifs climat de la France afin d'atteindre la neutralité carbone en 2050.
- Electricité doit augmenter : 27% → 55%
- Approvisionnement énergétique = biomasse et électricité bas-carbone (≈ 95%)

Conclusion Scénarios RTE

- Agir sur la consommation grâce à l'efficacité énergétique, voire la sobriété est indispensable pour atteindre les objectifs climatiques.
- La consommation d'énergie va baisser mais celle d'électricité va augmenter pour se substituer aux énergies fossiles.
- Accélérer la réindustrialisation du pays, en électrifiant les procédés, augmente la consommation d'électricité mais réduit l'empreinte carbone de la France.
- Atteindre la neutralité carbone en 2050 est impossible sans un développement significatif des énergies renouvelables.
- Se passer de nouveaux réacteurs nucléaires implique des rythmes de développement des énergies renouvelables plus rapides que ceux des pays européens les plus dynamiques.

Actualité géopolitique en Europe

- La guerre en Ukraine démontre la nécessité de :

  - conserver une souveraineté énergétique (autant que faire se peut).
  - augmenter notre souveraineté industrielle potentielle.

  - → le scénario « réindustrialisation » de RTE = scénario de référence.

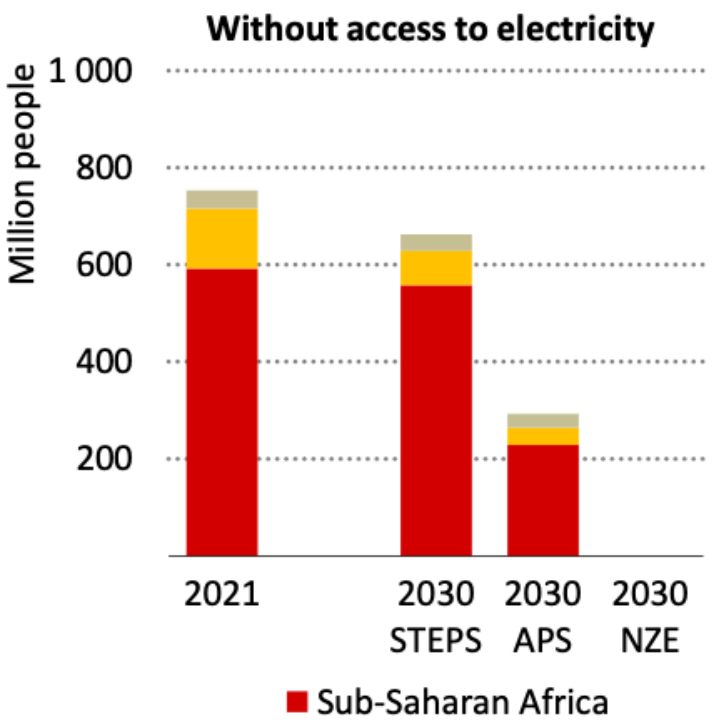
  Scénario de référence : Consommation électricité : augmentation de 400 TWh aujourd'hui à 645 TWh en 2050 (scénario « réindustrialisation » = 755 TWh)

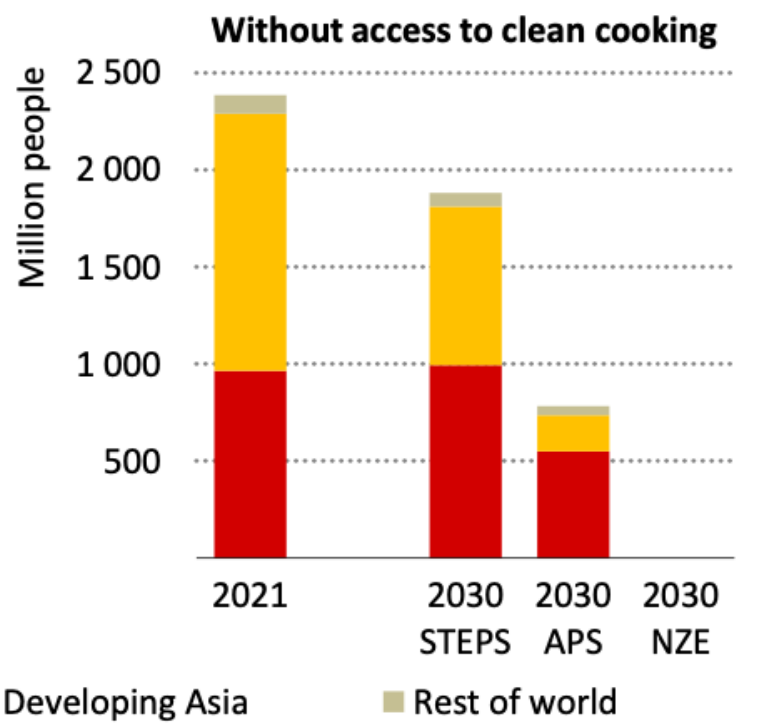
  - → obligation d'une part significative de nucléaire dans le MIX énergétique

- Conséquence:

  - Création d'emplois non délocalisables à haute valeur ajoutée.
  - Relocalisations de productions fortement émettrices de GES.
  - Amélioration de l'économie du pays.

Ne pas regarder que nous!



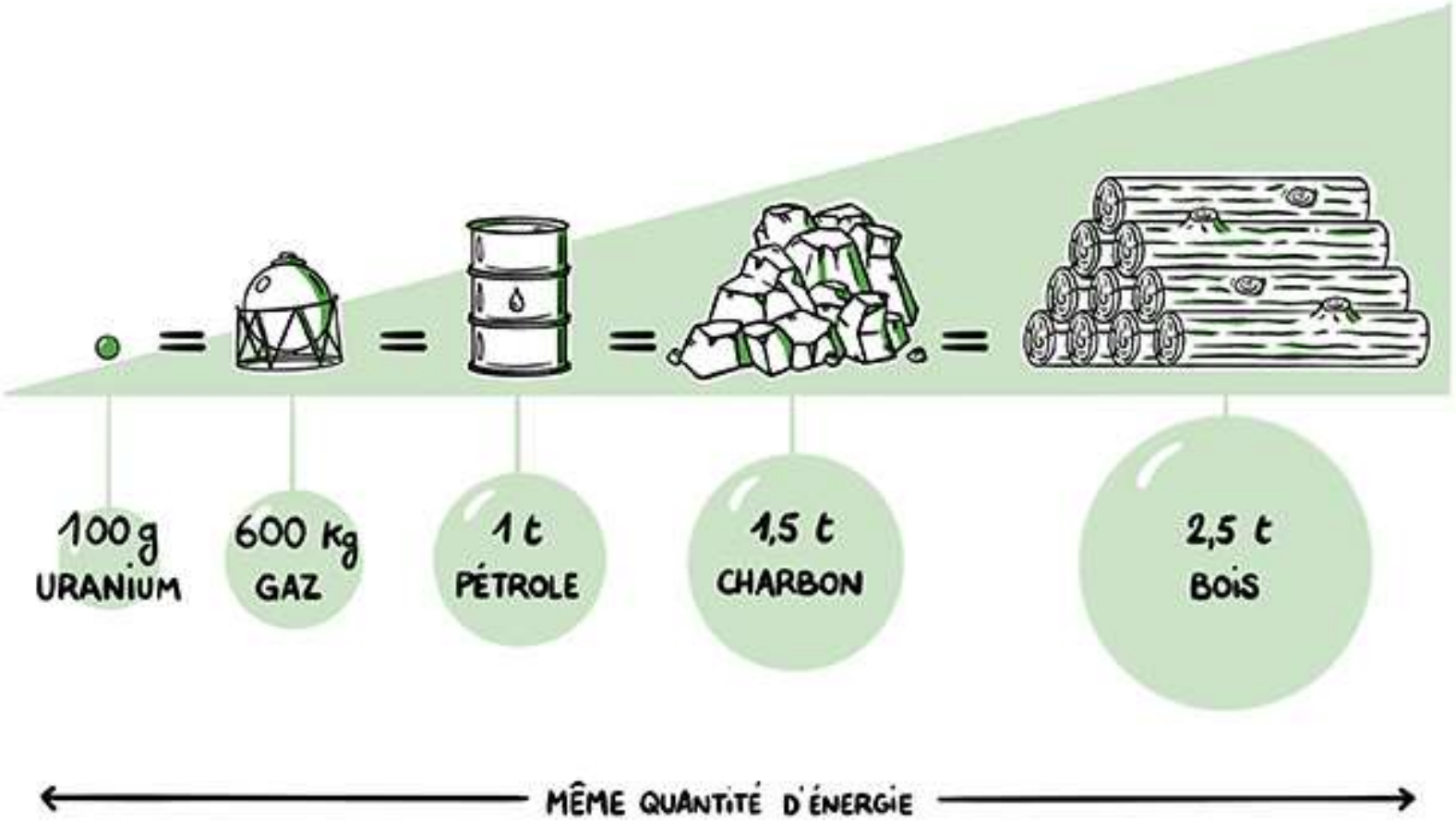


IEA. CC BY 4.0.

- Plus de 3 millions d'enfants de moins de 5 ans meurent chaque année dans le monde.
- 733 millions de personnes sans accès à l'électricité.
- 7,8 milliards d'habitants sur terre et 10 milliards d'habitants en 2050…

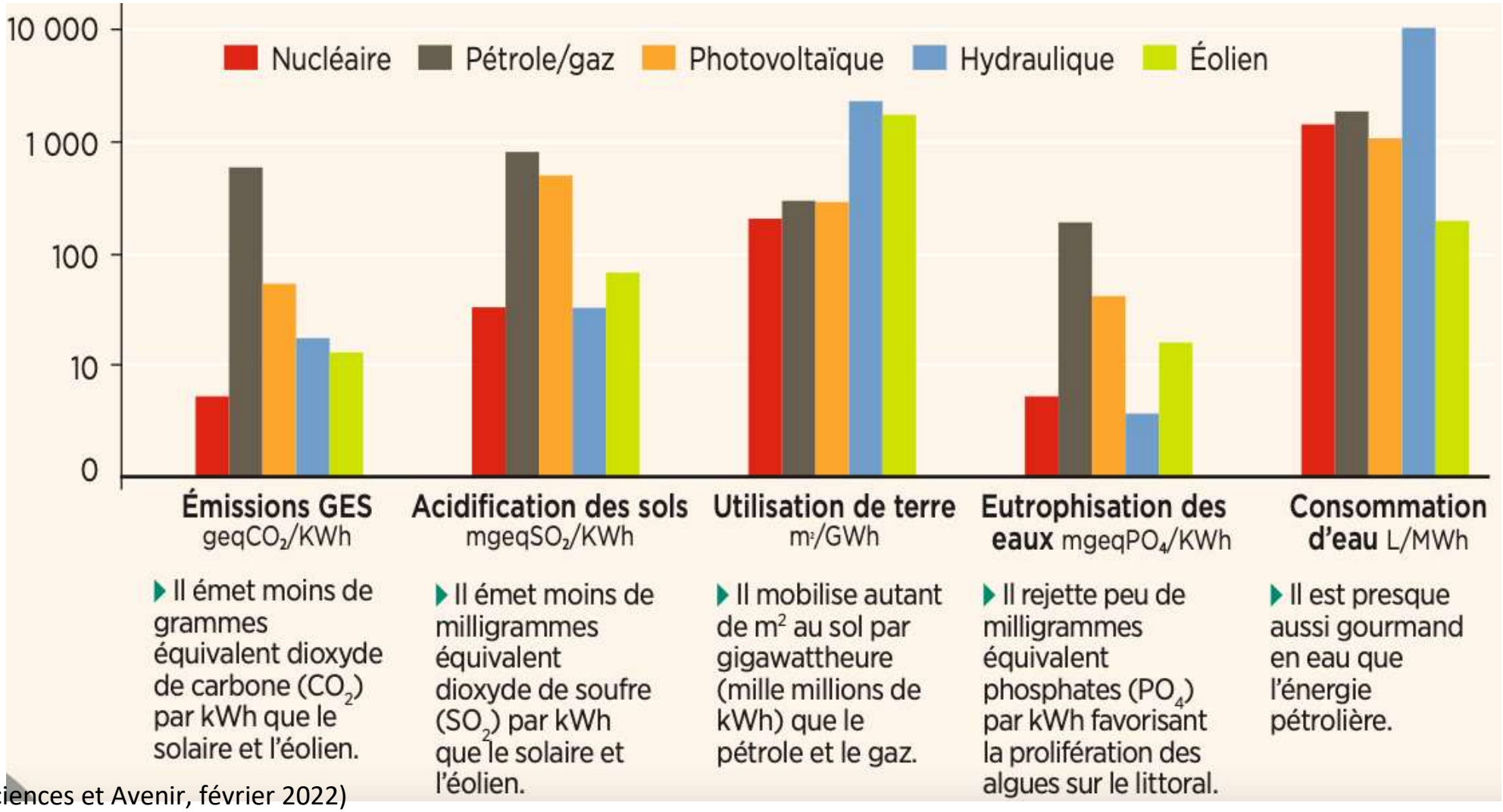
2. Histoire et état actuel de la filière

Ordre de grandeur densité énergétique du combustible nucléaire



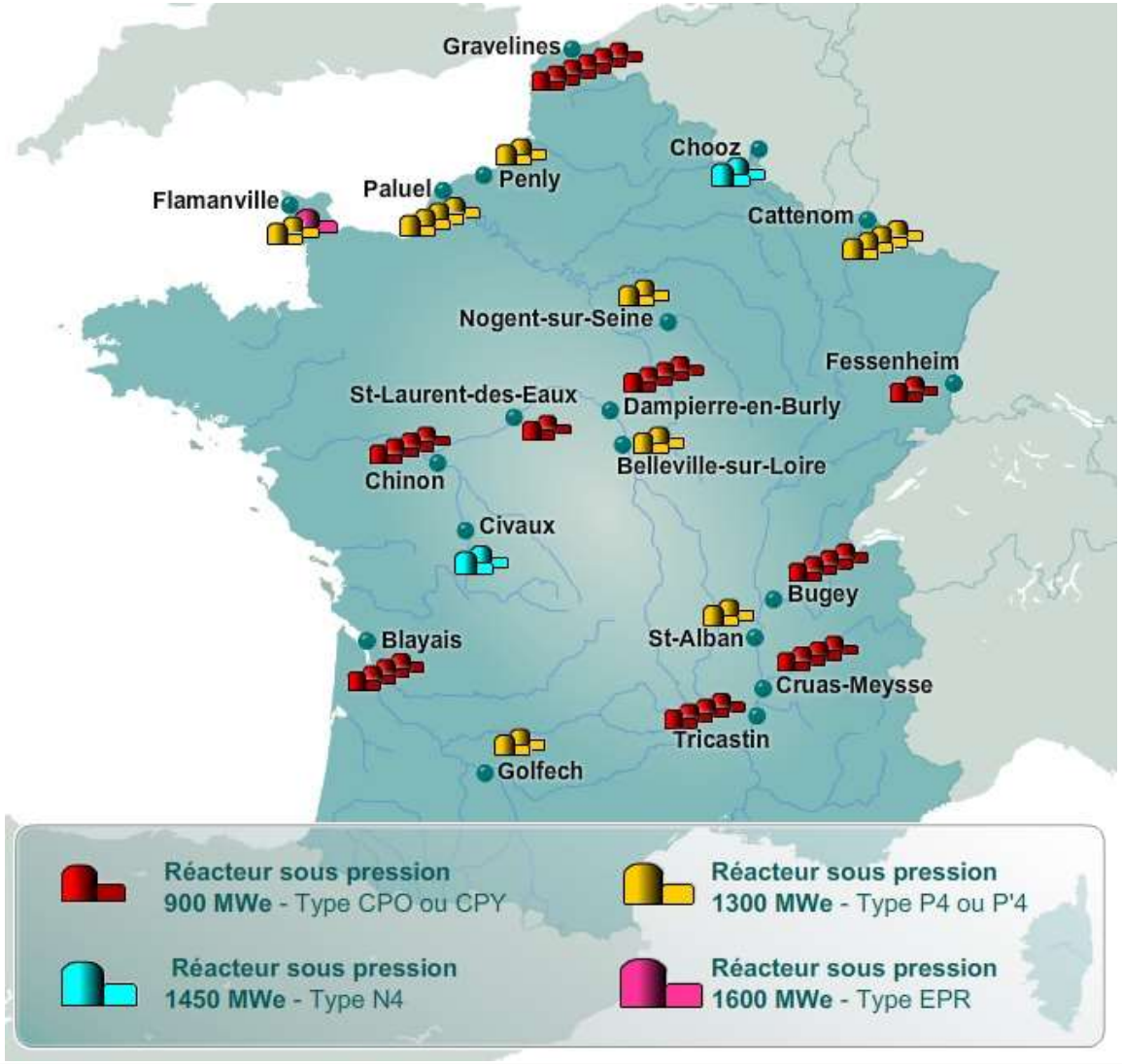
(Source Sfen)

Les autres atouts de l'énergie nucléaire



(Source Sciences et Avenir, février 2022)

Le parc français



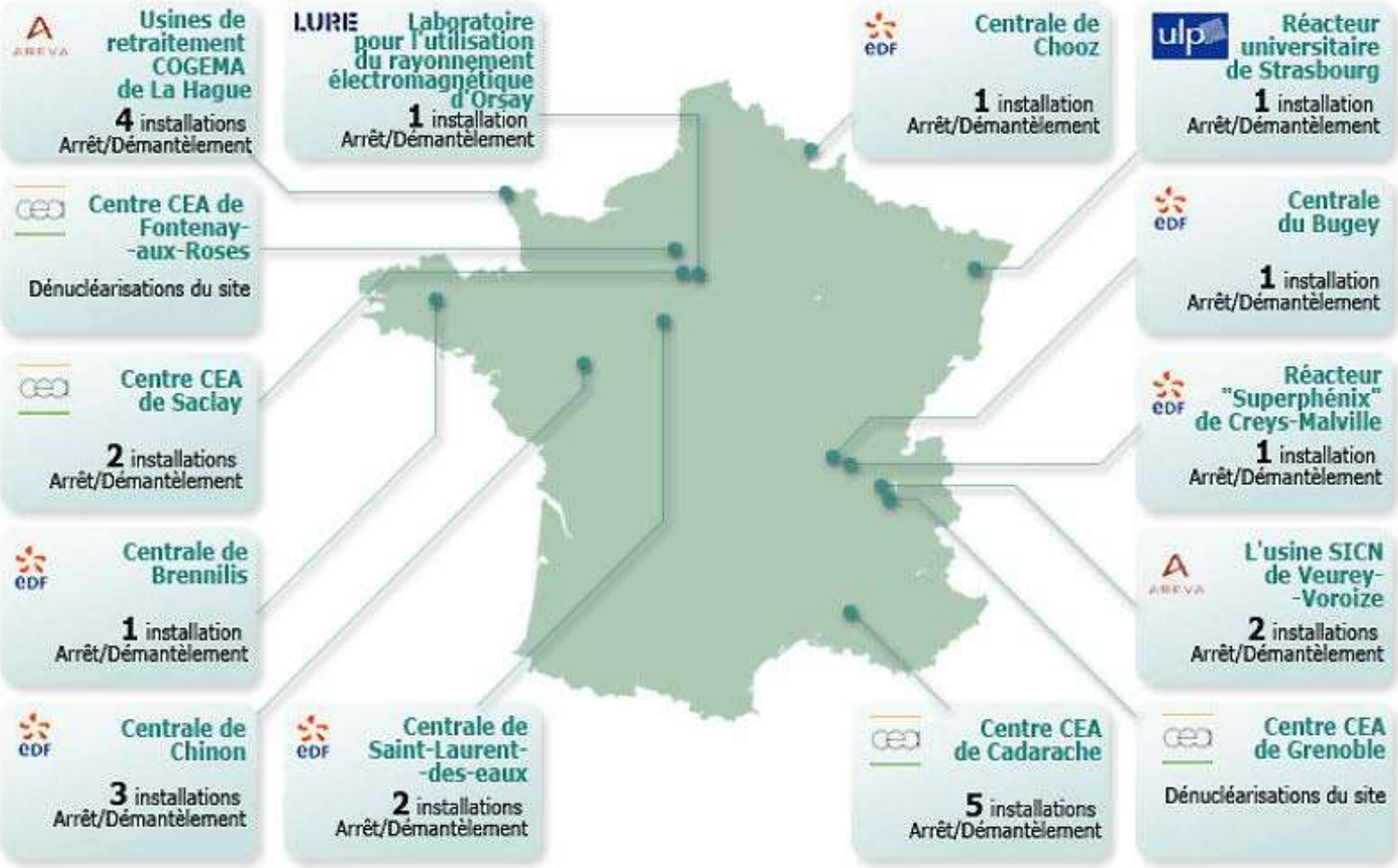
- Parc actuel:
  - 18 sites ; 56 réacteurs REP
  - 32 REP900; 20 REP1300; 4 REP1450
  - 61,4 GWe installé

- En construction:
  - EPR Flamanville
  - 1,65 GWe
  - MIS prévue fin 2023

- Projets futurs:
  - 3 paires EPR2 (Penly, Gravelines, AURA)
  - 4 paires possibles en préparation

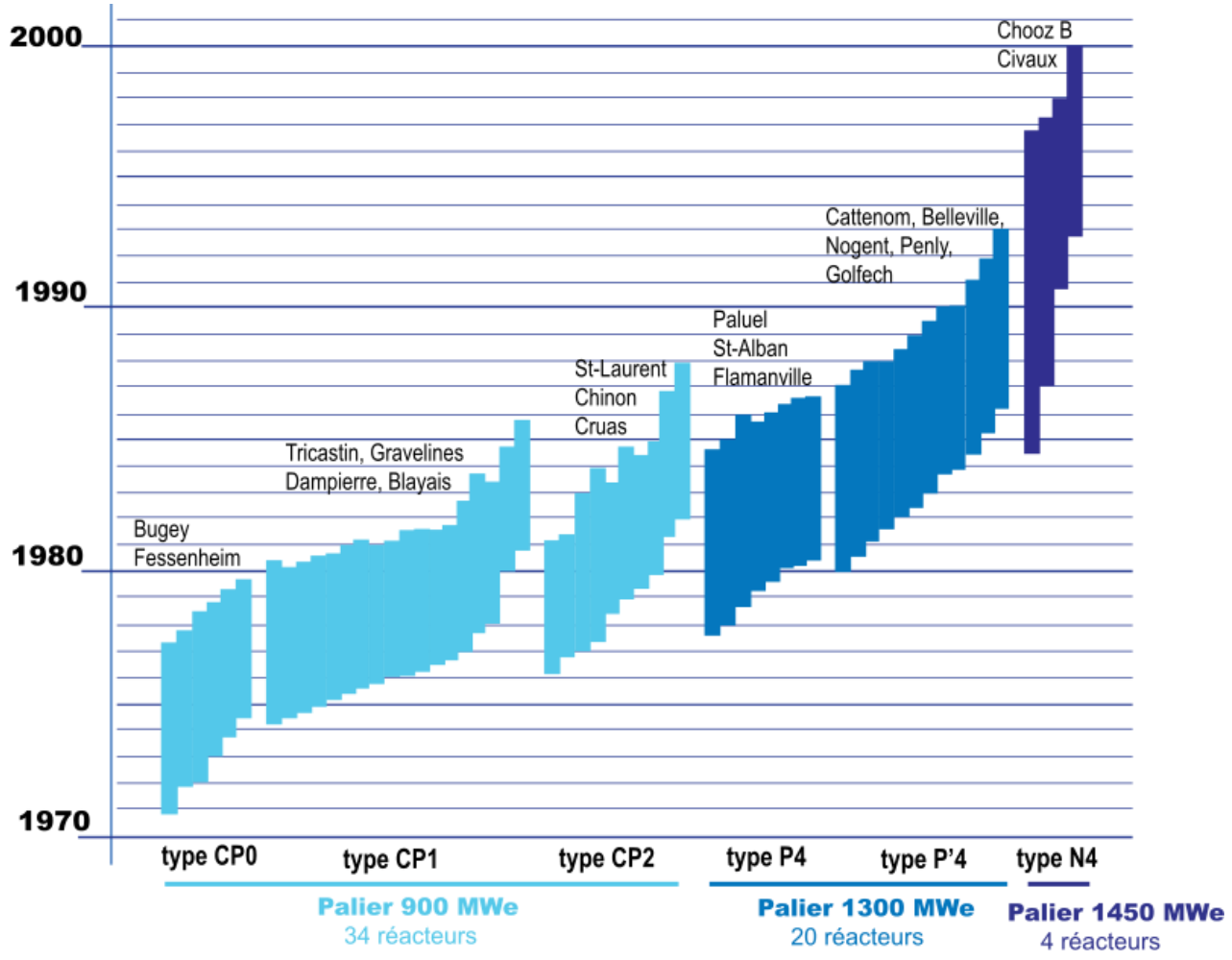
- En démantèlement: Au 1er juillet 2022, 14 réacteurs nucléaires ont été arrêtés :

Les installations en démantèlement



(Source: Ministère transition écologique)

Planning de construction : plan Messmer



- 58 réacteurs construits en 20 ans

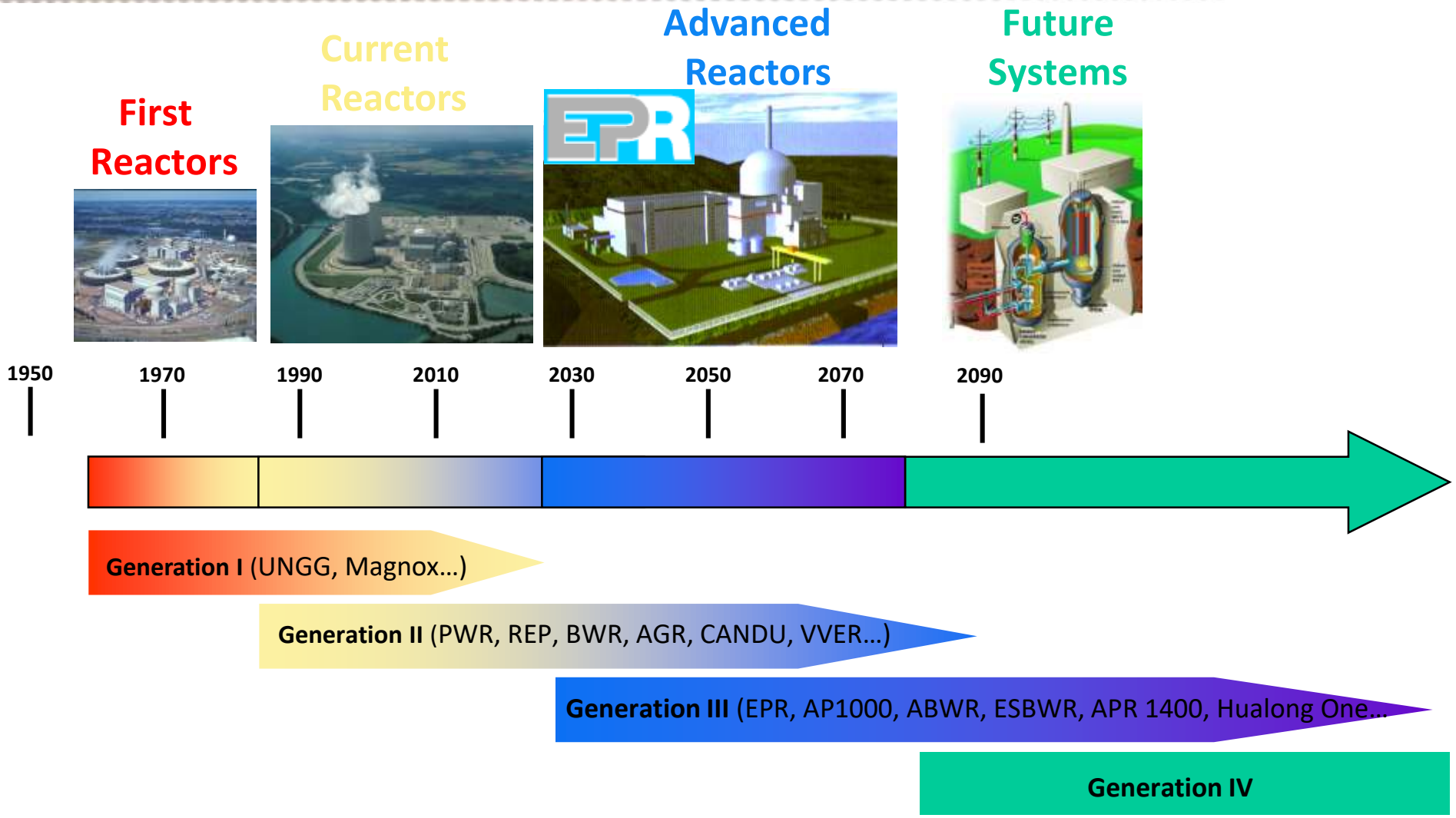
- Couplage réseau:
  - Fessenheim : avril 1977
  - Civaux (1450 MWe) : Décembre 1999

- Age moyen parc = 35 ans

- En 2021, il a produit 360,7 TWh, soit 69% de la production d'électricité en France métropolitaine.

le cnam

Les différentes générations de réacteurs



le cnam

Futur et enjeux de la filière nucléaire

- **Plusieurs importants projets en cours**
  - Le grand carénage : cout estimé 50 milliards d'euros
  - Démantèlement des anciennes installations
  - Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs
  - PPE incluant la possibilité de construction de nouvelles installations : réacteurs, piscines, … (en France et à l'international).

- **Des défis en matière d'ingénierie**
  - Une transition numérique indispensable
  - Des chantiers d'envergure à forts enjeux HSE et économiques
  - La mise en œuvre de technologies complexes, voire innovantes
  - Une maitrise des coûts
  - Promouvoir à l'international les solutions françaises

(Crédits photo Gifen)

Arrêt sur le grand carénage

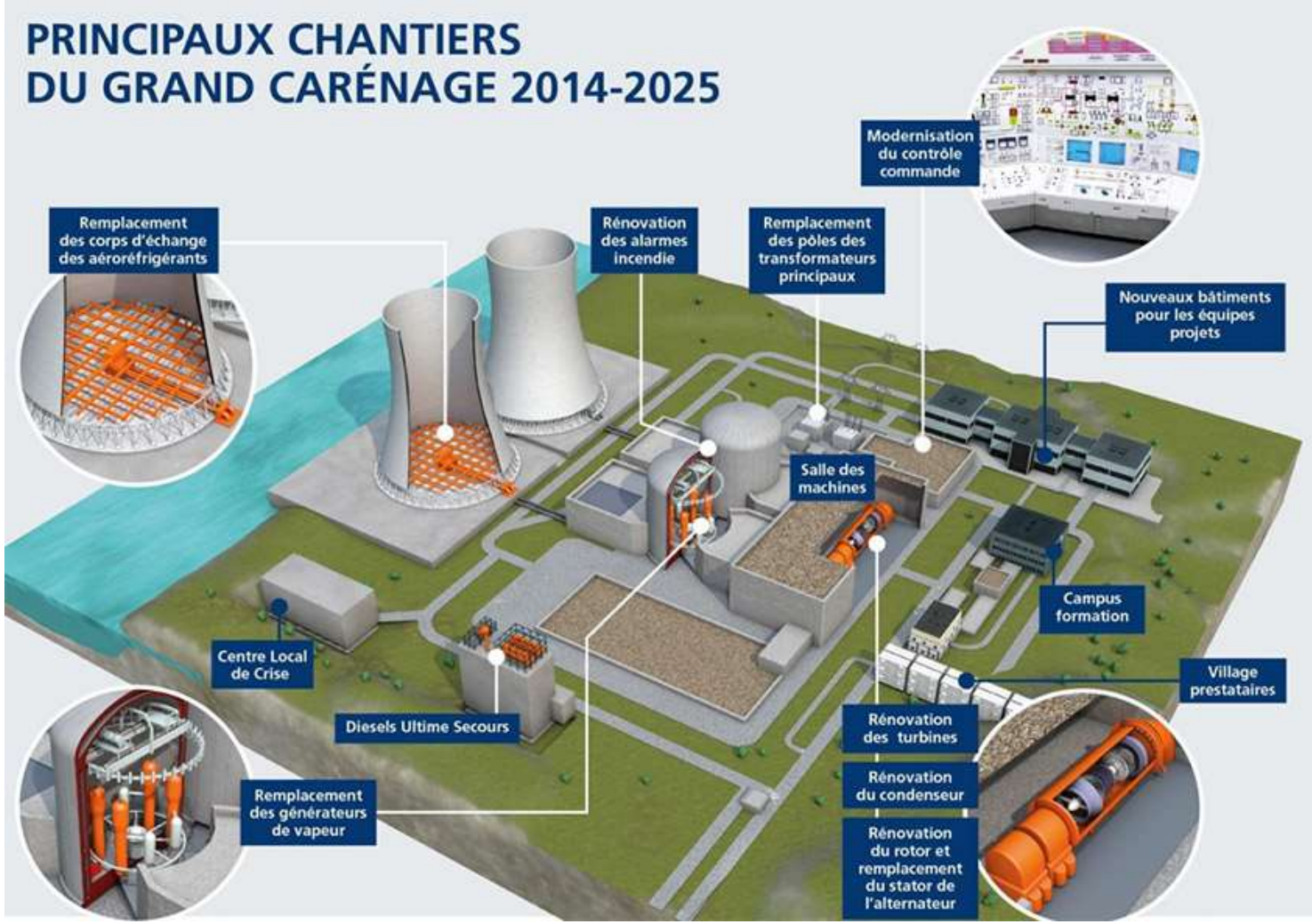
- La maintenance « normale » , réglementée dans un programme général, contrôlé par l'ASN.
- Réexamen périodique = exigé par le code de l'environnement, tous les 10 ans, validé par l'ASN.
- Grand Carénage = programme industriel de renforcement et des installations, étudié par EDF depuis 2008.

  remplacement de matériels, intégration des mesures post-Fukushima et amélioration du niveau de sûreté.

- **Niveau d'investissement humain et comparable à la construction.**
- Période 2022-2030 et un budget d'environ 50 Milliards d'euros.
- Mise en œuvre comporte des aléas comme tout programme industriel.
- Résultat final : les centrales du parc seront au même niveau de sureté que l'EPR.

(Source EDF et IRSN)

Liste des chantiers du GC



(Source EDF)

- Modernisation du contrôle-commande
- Remplacement des GV
- Remplacement du corps d'échange des aéroréfrigerants
- Rénovation groupe turbo-alternateur
- Rénovation condenseur
- Ajout Diesel Ultime secours
- Ajout centre local de crise…
- Exemple: 30 tranches du palier 900 MW sur 34 dont le GV a été changé.

Les Génération 3

- Ce sont des réacteurs que l'on appelle évolutionnaires.
- Ils ont été conçus au début des années 2000
- Ils intègrent dès la conception le retour d'expérience (REX) des accidents de TMI et deTchernobyl et Fukushima.

EPR (Olkiluoto, Finlande) (photomontage)

Hinkley Point C 1 et 2

Flamanville

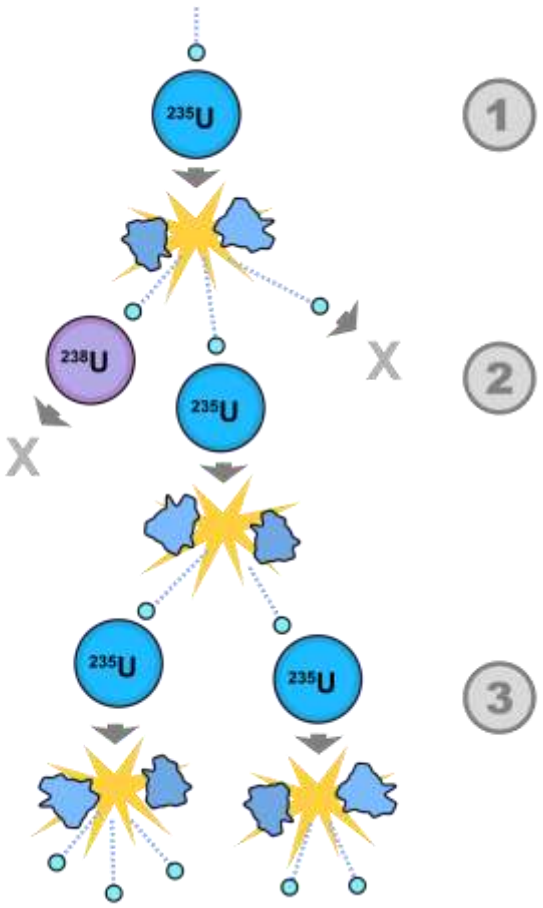
Taishan

3. Comment marche un réacteur nucléaire pour produire de l'électricité ?

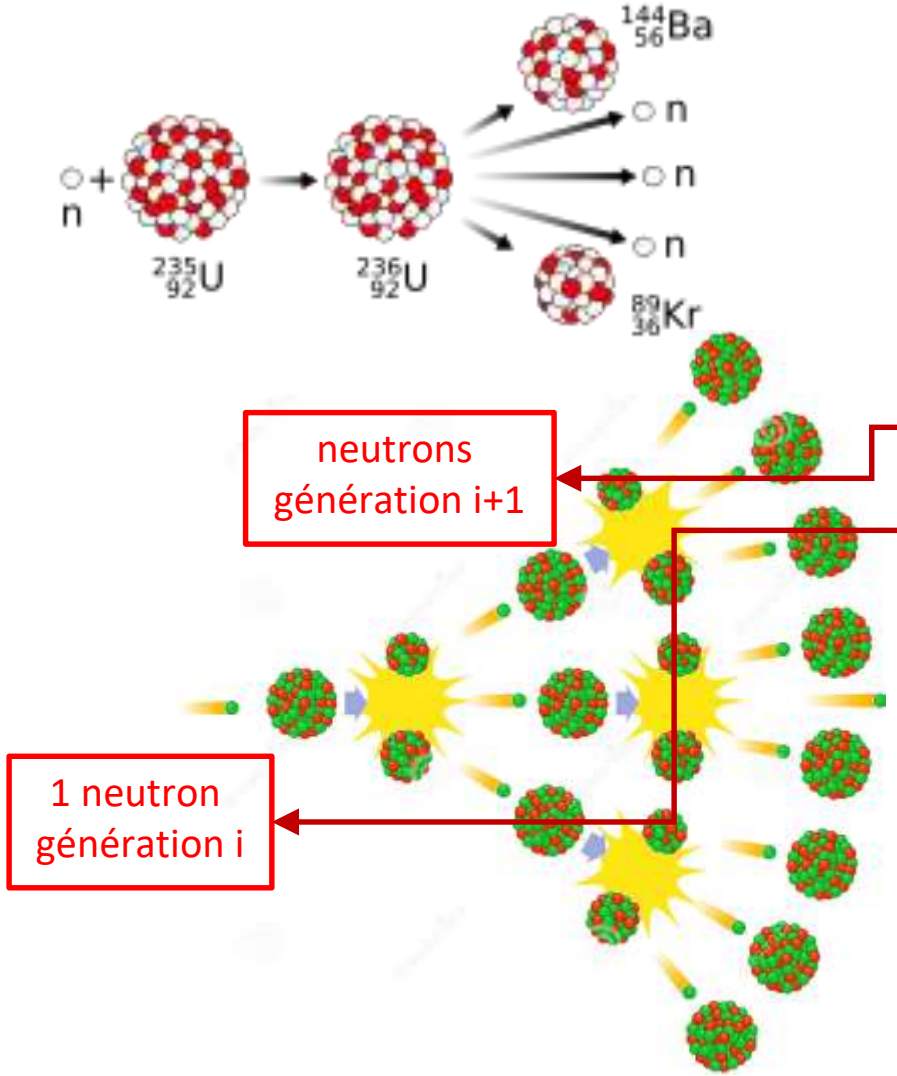
a. La fission et la réaction en chaine
b. La sureté nucléaire
c. Le réacteur et la centrale
d. Le cycle du combustible
e. Les déchets

Qu'est-ce qu'un réacteur nucléaire?

- C'est une cocotte-minute!
- De la vapeur d'eau est créée par la chaleur produite par la réaction de fission nucléaire.
- Cette vapeur d'eau entraîne un groupe turbo-alternateur qui produit de l'électricité.
- Dans le cœur d'un réacteur nucléaire : une réaction en chaine de fission est entretenue.
- Une filière de réacteur est définie par le triptyque combustible-modérateur-caloporteur caractérisant un choix scientifique et technique de production de chaleur.
- Par exemple, dans la filière des réacteurs « à eau pressurisée », le combustible est un oxyde d'uranium enrichi autour de 3,5 % en uranium-235 tandis que le modérateur et le caloporteur sont de l'eau ordinaire.



La fission et la réaction en chaine



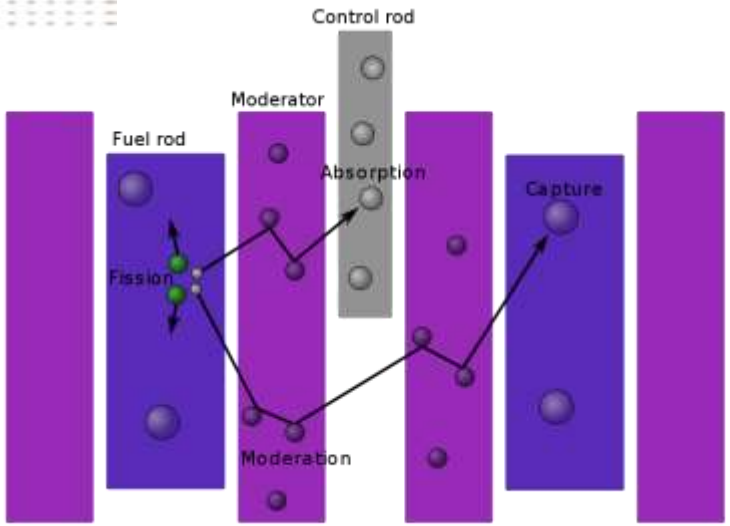
- Fission = un noyau d'uranium-235 absorbe un neutron et se casse en deux.
- Vitesse du neutron : lent (v=2200m/s) ou rapide (v=20 000 km/s).
- Grande probabilité de fission pour l'uranium-235 pour neutrons lents.
- Lors de cette réaction sont émis : 2 produits de fission, des neutrons (2-3) et de l'énergie (environ 200 MeV=3,2x10^{-11}J).
- Principe réaction en chaine: les neutrons émis lors d'une fission engendrent les fissions suivantes.

  N fissions → Nk fissions → Nk^2 fissions → Nk^3 fissions → …
- k= coefficient de multiplication :

$$k = \frac{nbre\ neutrons\ génération\ i+1}{nbre\ neutrons\ génération\ i} = \frac{N_{fissions}(i+1)}{N_{fissions}\ (i)}$$

- Le comportement de la réaction en chaîne va dépendre de la valeur du facteur de multiplication k :
  - si k > 1 la réaction s'emballe;
  - si k < 1 la réaction s'étouffe;
  - si k = 1 la réaction s'auto-entretient

Dans un réacteur



- Puissance du réacteur % nbre fissions % nbre de neutrons.
- Dimensionnement d'un réacteur : maximiser le nombre de fissions et évacuer la chaleur produite
  - Besoin d'un modérateur : ralentir les neutrons sans les absorber, pour avoir le maximum de fissions.
  - Besoin d'un caloporteur : évacuer la chaleur vers le cycle à vapeur.
  - Besoin d'un nombre stable de neutrons : bilan des créations et des pertes de neutrons.
- Devenir d'un neutron dans un cœur de réacteur :
  1. Fuite du neutron hors du système;
  2. Capture stérile par l'uranium 235 ou 238;
  3. Capture stérile par le modérateur ou par les poisons;
  4. Fission de l'uranium 235 (ou plutonium-239 ou uranium-238).

- Piloter un réacteur : vérifier que la réaction en chaine est stable dans le temps quelque que soit les conditions.

le cnam

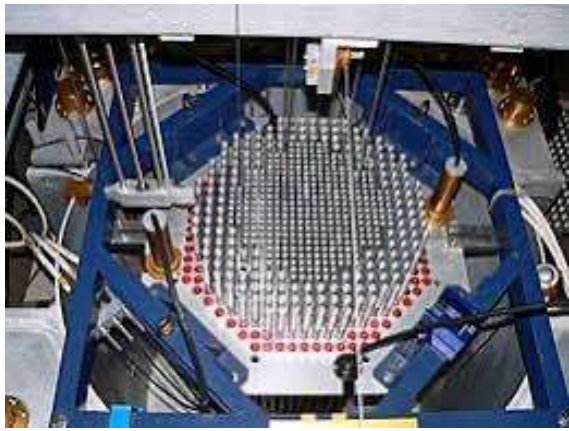
Généralités

- Une centrale électrique produit de l'électricité en faisant tourner une turbine couplée à un alternateur.

- Il existe trois type de centrales électriques:
  - Centrale HYDRAULIQUE : l'eau des barrages actionne la turbine.
  - Centrale THERMIQUE classique : combustible fossile (charbon, gaz naturel ou pétrole) est brûlé pour transformer de l'eau en vapeur capable d'entraîner la turbine.
  - Centrale NUCLEAIRE : l'uranium fissionne pour transformer de l'eau en vapeur capable d'entraîner la turbine.

Faiblesses d'une centrale nucléaire (p/p aux autres centrales)

- Coût d'investissement élevé (toutes filières confondues);
- Arrêts pour rechargement : perte de disponibilité;
- Mauvaise utilisation de l'uranium;
- Contraintes d'exploitation résultant de l'enceinte de confinement;
- Puissance résiduelle du fluide primaire à l'arrêt du réacteur (toutes filières confondues).



Principe de base d'une centrale

Source de chaleur
fission

Gaz à haute température

Détente dans une turbine

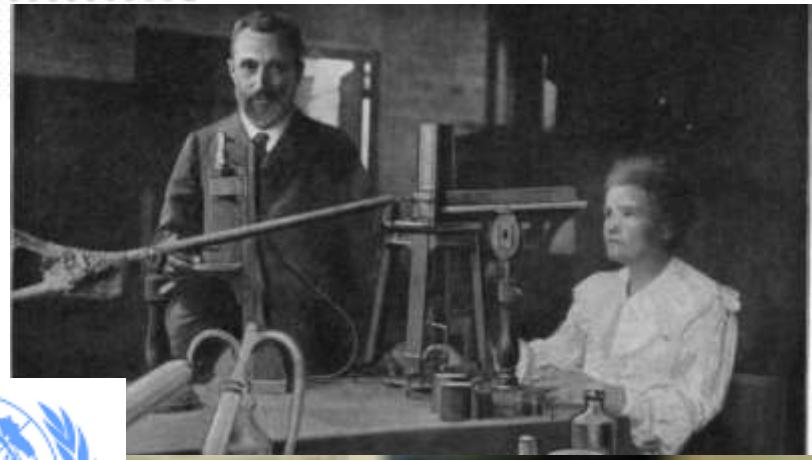
Alternateur couplé à la turbine
Conversion énergie mécanique en électricité

Réseau électrique

$$r_{max} = 1 - \frac{T_{froide}}{T_{chaude}} \gg 33\%$$

❑ La sûreté nucléaire

La sûreté nucléaire, pourquoi?



- **Objectif Sûreté nucléaire = prévention des accidents**

- Dès la découverte de la radioactivité au XIXème siècle, de nombreuses applications dans beaucoup de domaines, en particulier pour la prod d'électricité.
- Très rapidement le danger de la radioactivité et ses potentiels effets néfastes sur la santé et sur l'environnement identifiés.
- **Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants** l'**UNSCEAR** créé (1955).
- Rôle = évaluer les niveaux et les effets de l'exposition aux rayonnements ionisants à travers la planète.
- Risque nucléaire = probabilité que la radioactivité crée des dommages au public et à l'environnement
- Calcul du risque nucléaire = Analyses de sûreté.

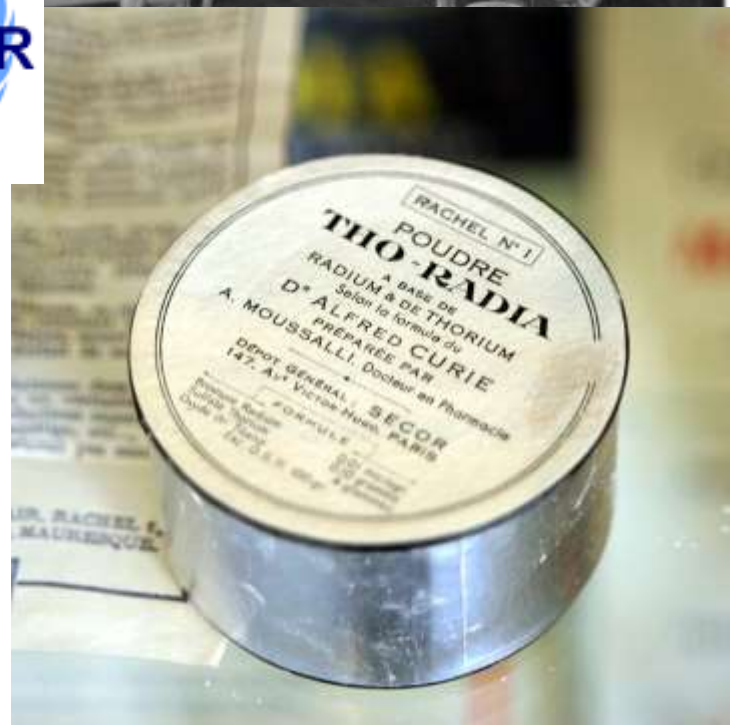
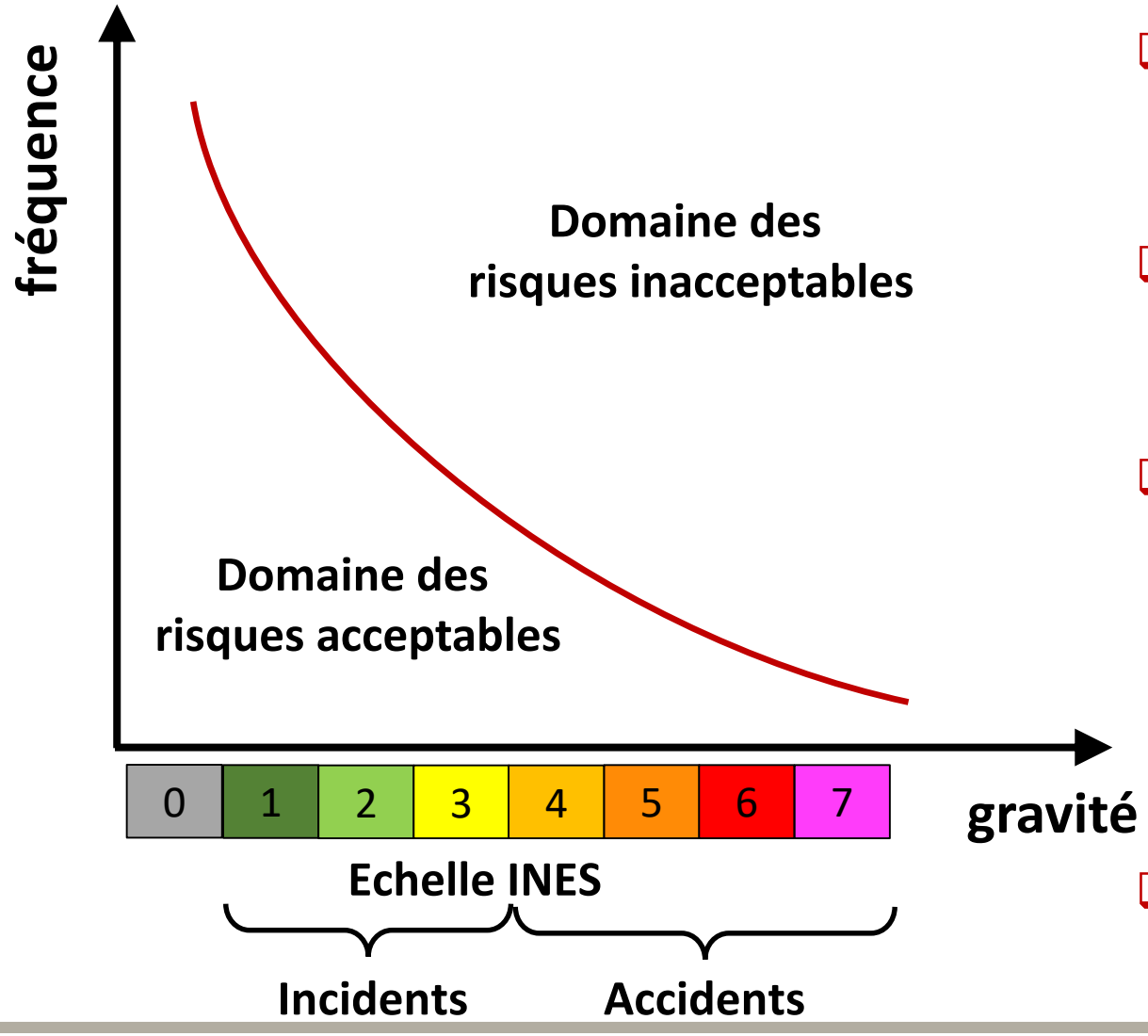


Diagramme de Farmer



- Plus un accident a des conséquences graves, plus sa fréquence doit être faible.
- Plusieurs approches (déterministe, probabiliste ou un mélange des deux).
- 4 grands principes pour l'ASN :
  - Responsabilité de l'exploitant,
  - Indépendance vis à vis de l'exploitant,
  - La « <u>défense en profondeur</u> »,
  - Amélioration continue.
- Défense en profondeur avec 5 niveaux

Défense en profondeur : schéma général

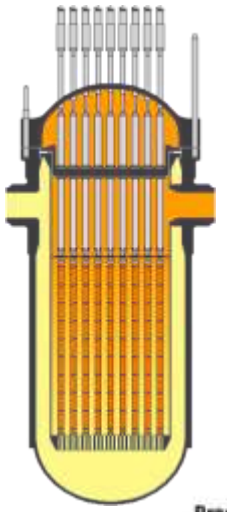
- Concept mis en place dans les années 1970, basé sur une analyse déterministe.
- Indépendance des systèmes impliqués dans les niveaux 2, 3 et 4.
- Renforcement des redondances et des diversités.
- Prise en compte du facteur humain (procédures, aide à la conduite, ergonomie).

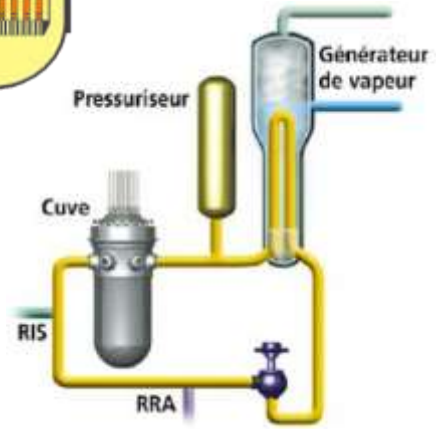
Niveau	Objectif	Etat de l'installation	Actions	
1	Prévention des défaillances	Toute la vie des composants	Marges de conception et haut niveau de qualité des fabrications	
2	Maitrise des situations anormales et détection des défaillances	Opération	Systèmes de contrôle, de surveillance et de pilotage maintenant l'installation dans une plage définie	
3	Maitrise des accidents pris en compte dans la conception	Accident	Arrêt, systèmes de sûreté, de sauvegarde et procédures accidentelles pour atteindre un état sûr	
4	Maitrise des situations accidentelles graves	Fusion du cœur	Systèmes particuliers ultimes et procédures de crise	Post TMI
5	Maitrise des rejets radiologiques importants	Cœur fondu	Mise en place d'actions dans l'environnement de la centrale (restrictions, évacuation)	Post Tchernobyl

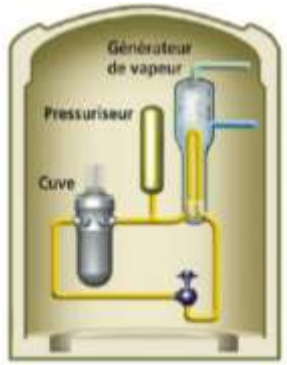
Les trois fonctions essentielles de la sûreté nucléaire pour un réacteur nucléaire

- La sûreté nucléaire repose sur le maintien de trois fonctions :

1. **Contrôle** de la réaction en chaîne, et donc de la puissance produite :
   - Barres de contrôle
   - Concentration en bore (absorbeur de neutrons)
2. **Refroidissement** du combustible, évacuer la puissance résiduelle:
   - fonctionnement normal : évacuation par les GV
   - À l'arrêt du réacteur : circuit de réfrigération RRA
   - En situation incidentelle/accidentelle : circuit d'injection de sécurité RIS
3. **Confinement** des produits radioactifs.
   - trois barrières: gaine de combustible, circuit primaire, enceinte de confinement.







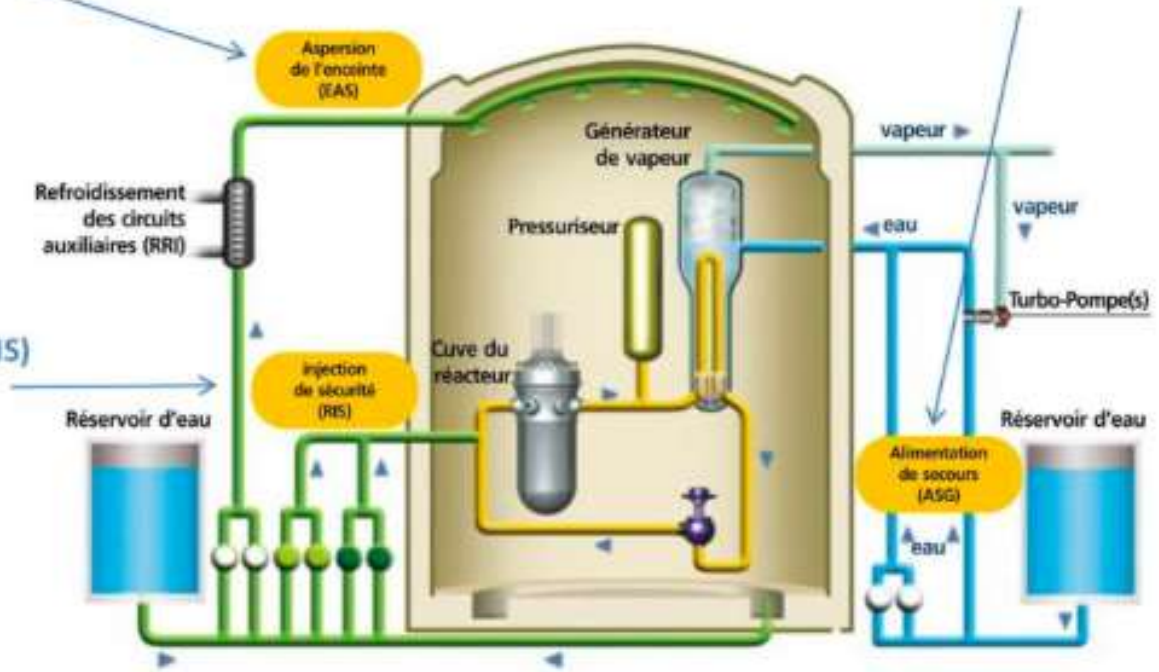
Rôle des systèmes de sécurité

Plusieurs systèmes de sécurité sont prêts à intervenir en situation accidentelle.
Ils ont pour but de **maintenir les trois fonctions de sûreté** en cas de défaillance des autres circuits.

Le circuit d'aspersion de l'enceinte (EAS)
fait baisser la pression et la température dans le bâtiment réacteur

Le circuit d'alimentation de secours des générateurs de vapeur (ASG)
pallie les défaillances éventuelles du circuit normal d'alimentation en eau

Le système d'injection de sécurité (RIS)
assure l'injection de bore et le refroidissement du cœur



(D'après EDF)

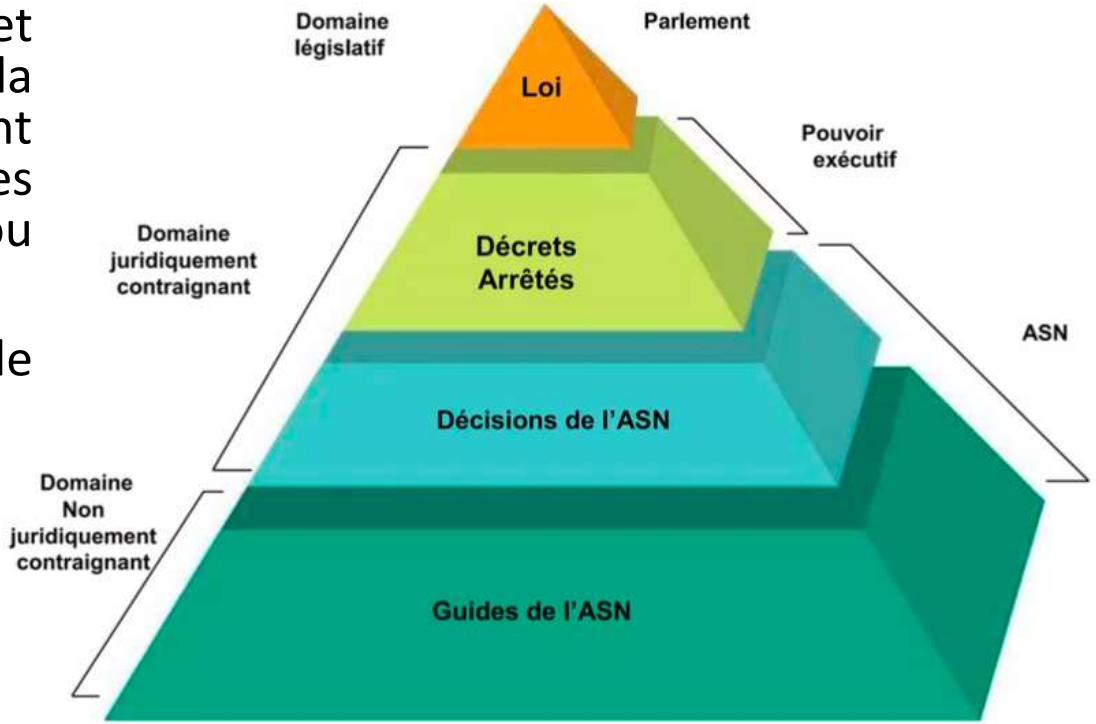
Sûreté nucléaire

- **Loi n° 2006-686 du 13 juin 2006, article 1 (relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire)**

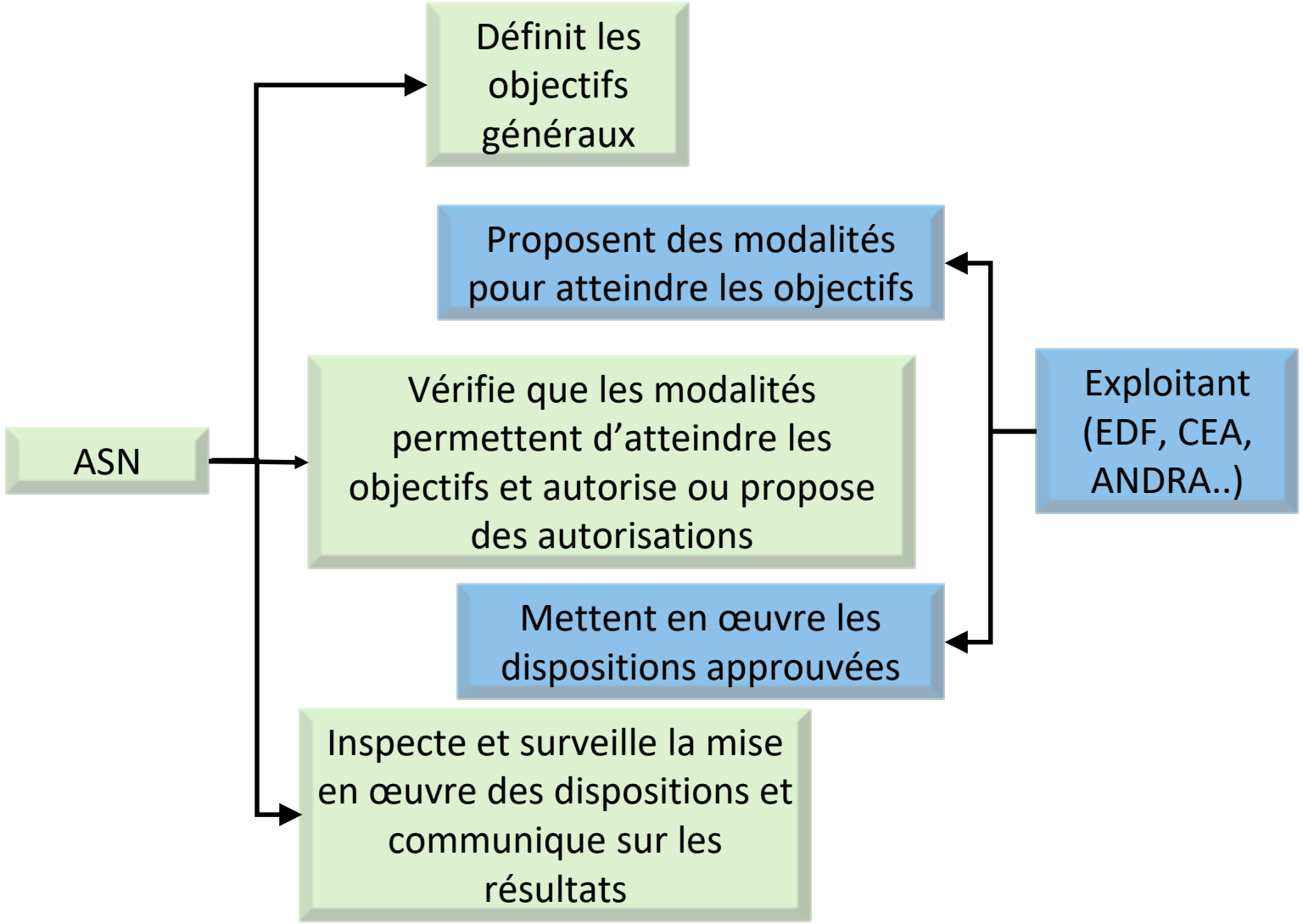
« La sûreté nucléaire est l'ensemble des dispositions techniques et des mesures d'organisation relatives à la conception, à la construction, au fonctionnement, à l'arrêt et au démantèlement des installations nucléaires de base, ainsi qu'au transport des substances radioactives, prises en vue de prévenir les accidents ou d'en limiter les effets. »

- Ces dispositions doivent être prises à tous les stades du cycle de vie des installations nucléaires de base:
  - La conception,
  - La construction et mise en service,
  - L'exploitation,
  - Le démantèlement d'une installation nucléaire.

- L'Autorité de sûreté nucléaire, autorité administrative indépendante, participe au contrôle de la sûreté nucléaire et de la radioprotection et à l'information du public.

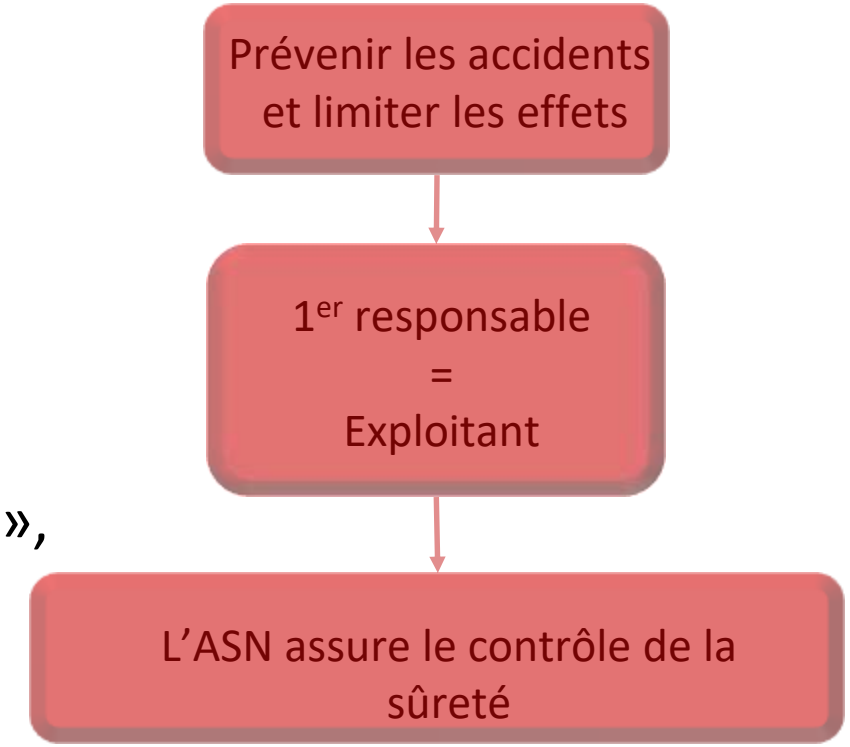


Comment ça marche?



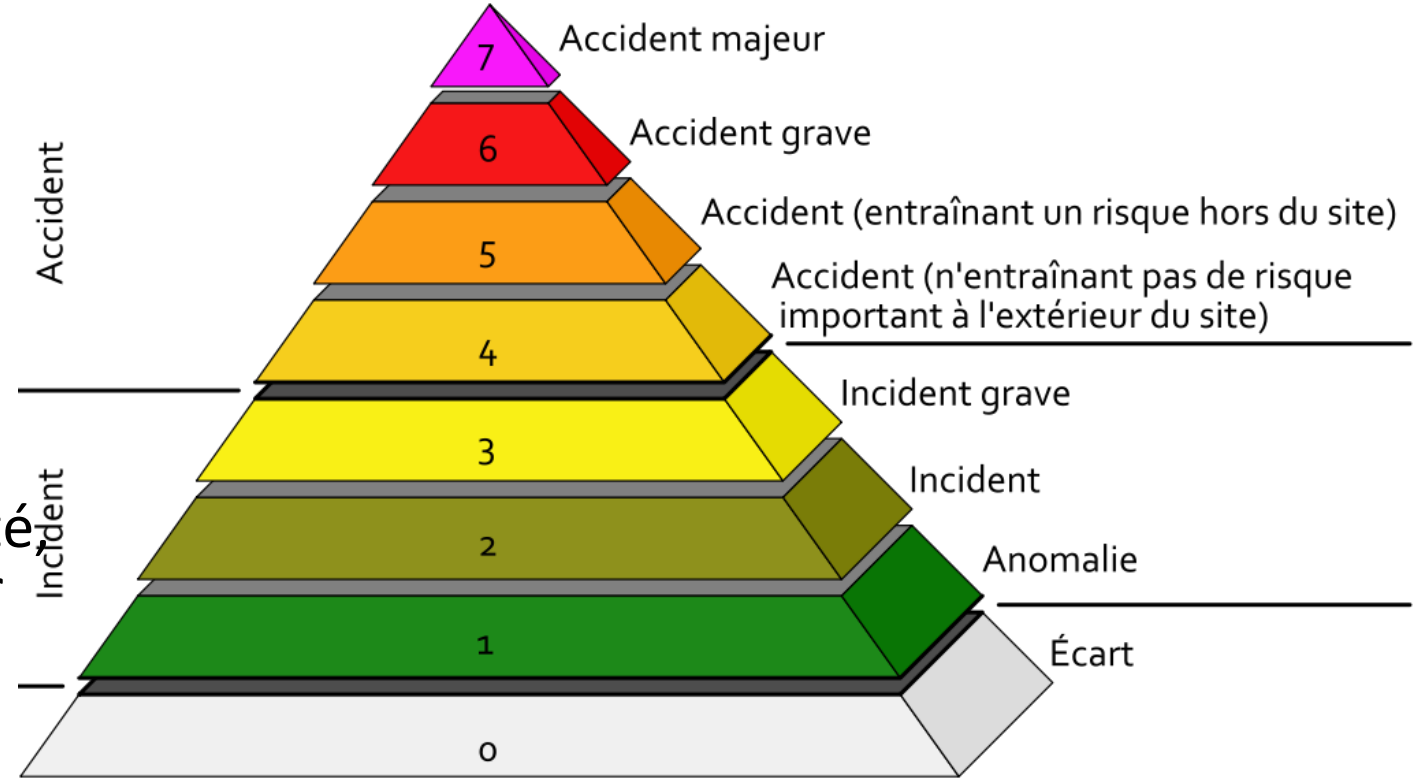
Mission de l'ASN

- Quatre grands principes intangibles :
  - Responsabilité de l'exploitant,
  - Indépendance vis à vis de l'exploitant,
  - Stratégie de sûreté fondée sur la « défense en profondeur »,
  - Amélioration continue : prise en compte permanente des événements de terrain.



Echelle INES

- Nécessité d'information du public
- Echelle INES (int. nuclear event scale)
- Similaire à l'échelle de Richter pour les séismes.
- Tout événement important pour la sûreté classé selon 7 niveaux en fonction de leur gravité.
- Tous sont déclarés par les exploitants nucléaires auprès de l'ASN.

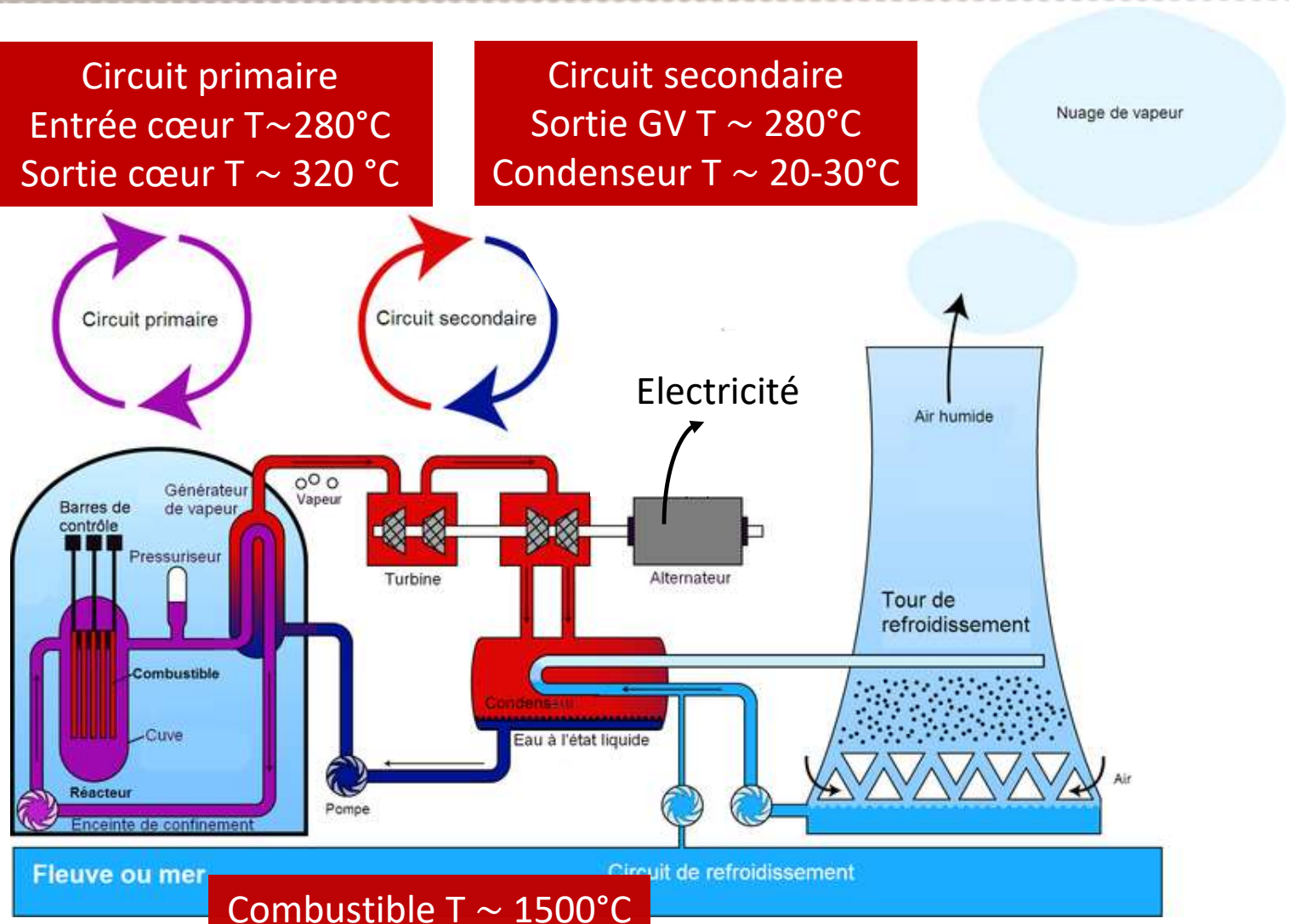


❑ Le réacteur

Une centrale nucléaire

Circuit primaire
Entrée cœur T~280°C
Sortie cœur T ~ 320 °C

Circuit secondaire
Sortie GV T ~ 280°C
Condenseur T ~ 20-30°C



Combustible T ~ 1500°C

- 3 circuits indépendants
- Sureté : 3 fonctions de sureté
  - Stabilité de la réactivité (criticité)
  - Confinement
  - Refroidissement
- Basée sur la défense en profondeur
- 3 barrières de sureté :
  - La gaine de combustible
  - Le circuit primaire
  - L'enceinte de confinement

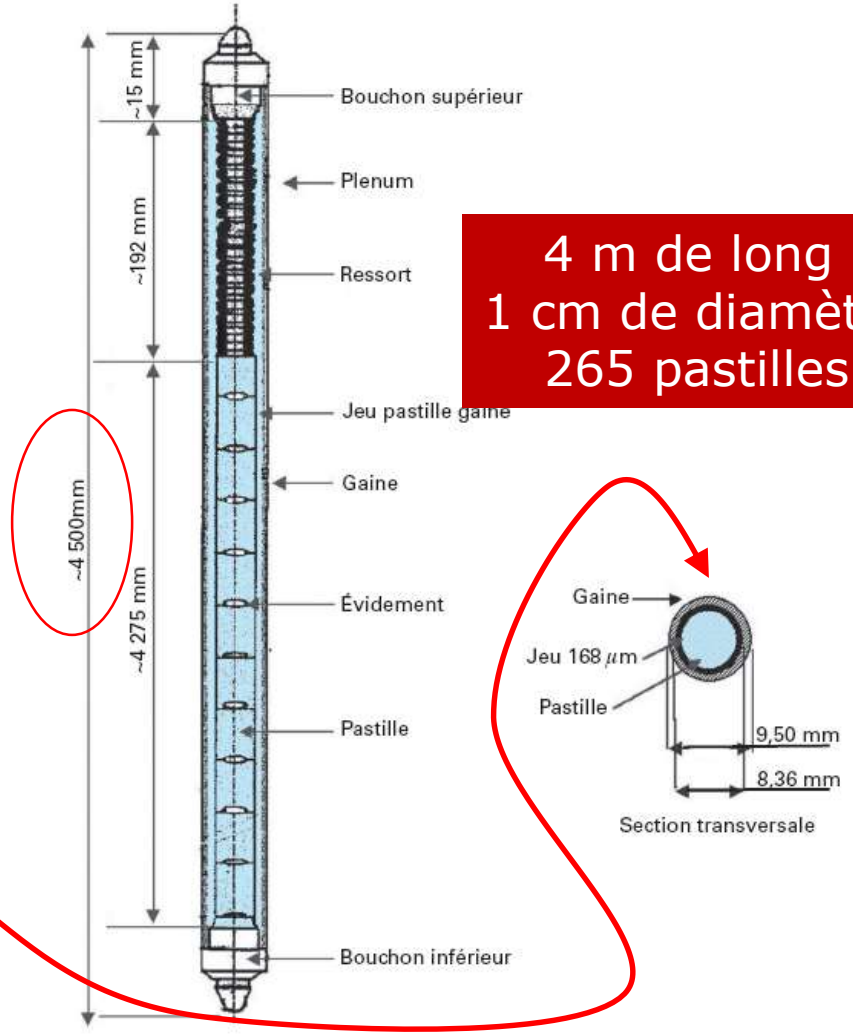
Le crayon combustible

1 cm de long
1 cm de diamètre
avec h>d

~ 100 tonnes d'U

~ 16 millions de pastilles

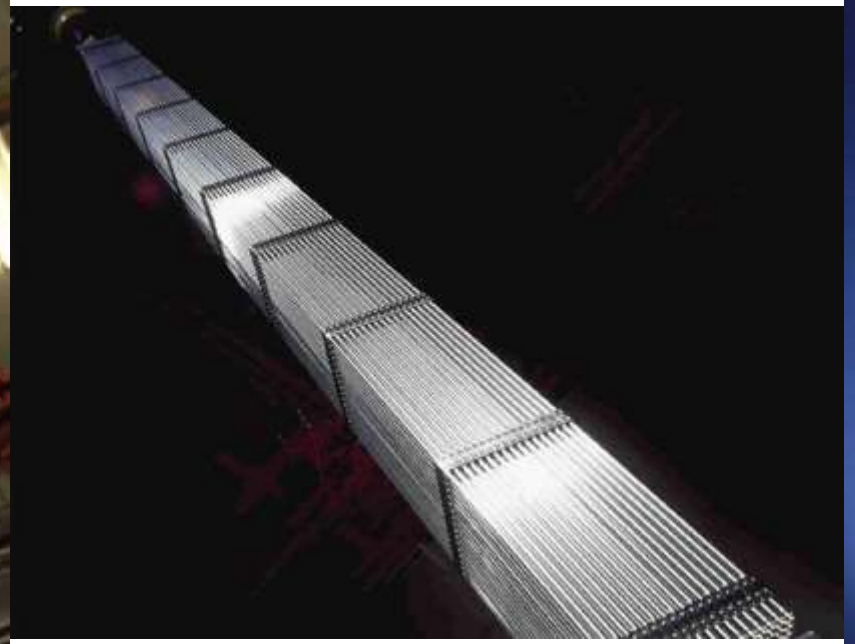
1ère barrière de sûreté:
gaines des éléments combustibles
en alliage de zirconium.



4 m de long
1 cm de diamètre
265 pastilles

le cnam

Assemblage combustible



~200 assemblages de 264 crayons
REP 900 : 157; 1300 : 193; N4 : 205

(Source CEA, EdF, Areva)

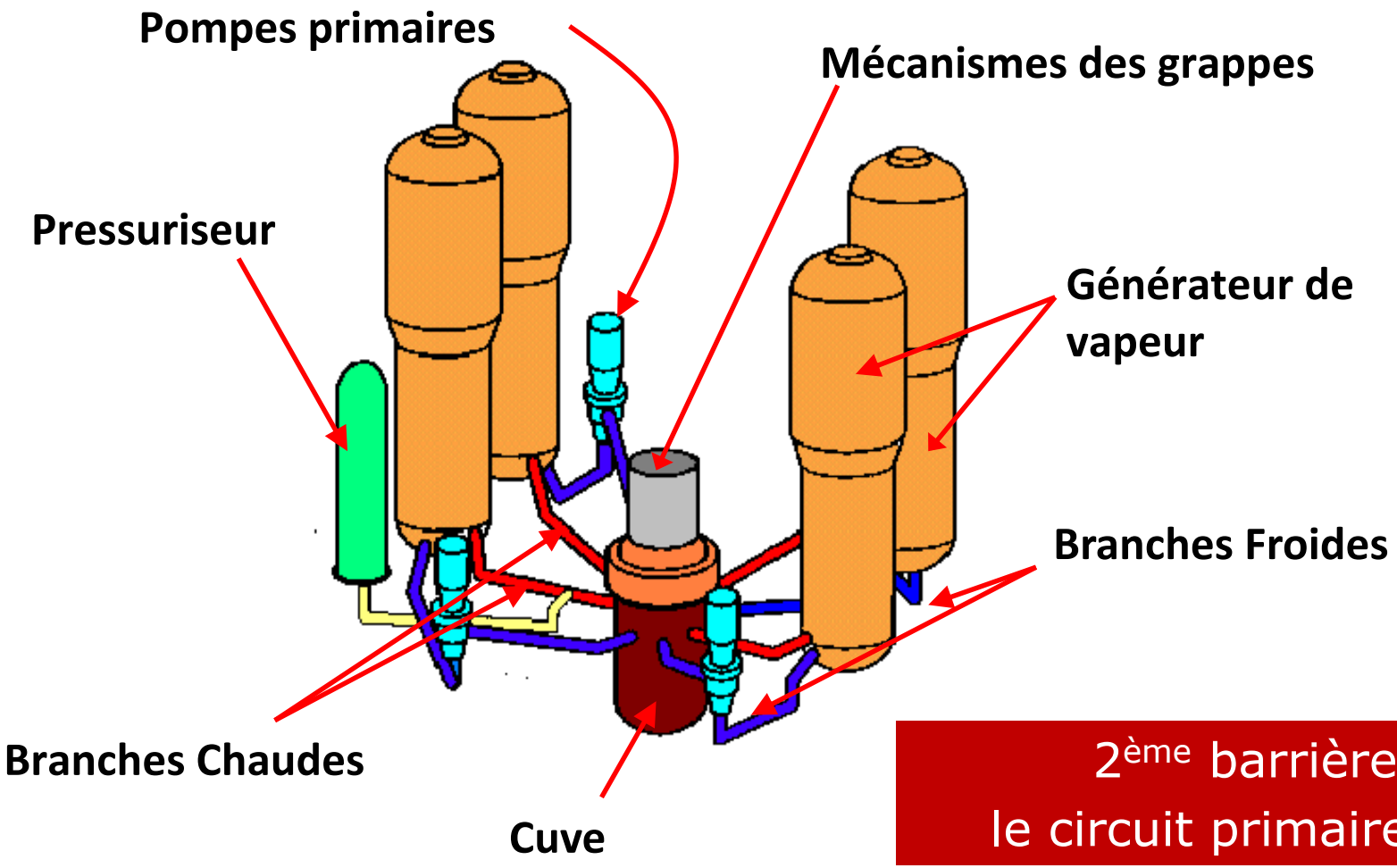
La cuve

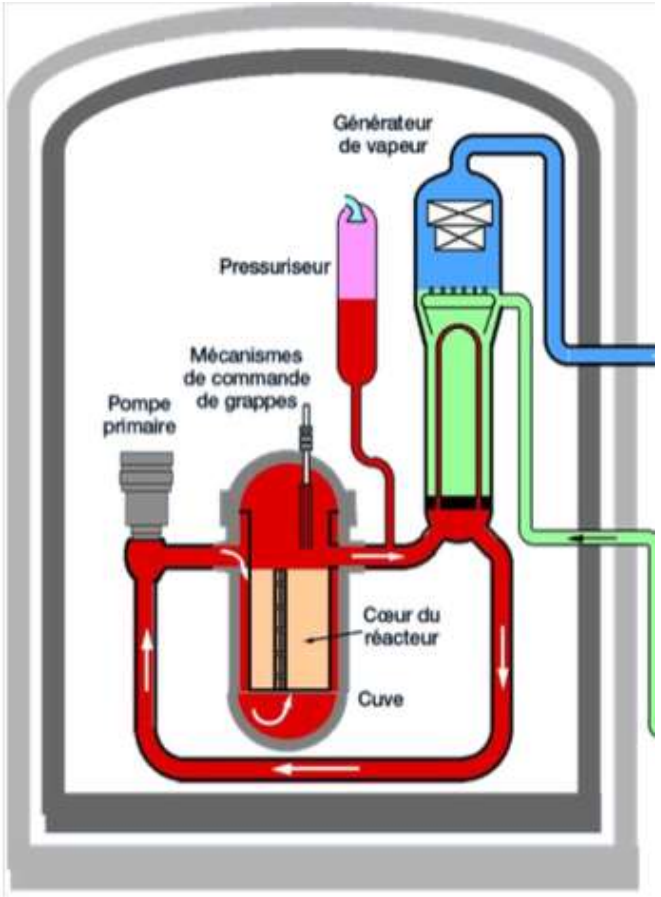
- La cuve est une enceinte en acier spécialement traité, étanche renfermant le cœur, les structure de support du cœur et les structures de guidage des grappes de contrôle.
- H = 13,66 m, D = 4,95 m, e = 23 cm

(Source Framatome)

le cnam

Circuit primaire REP





2ème barrière de sûreté :
le circuit primaire principal (CPP)

Enceinte de confinement

3ème barrière de sûreté
Enceinte de confinement

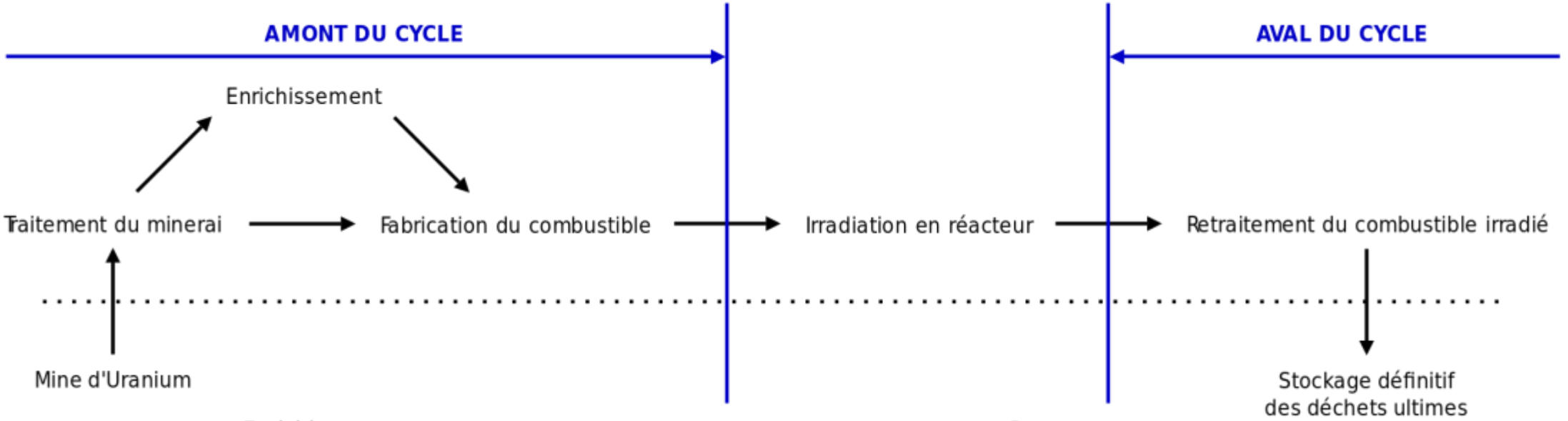
- Bâtiment cylindrique en béton (précontraint, armé), surmonté d'un dôme.
- Fonction de résister aux accidents (origine interne) aussi bien qu'aux agressions externes.
- 900 MWe, paroi unique en béton précontraint :
  - D= 37m; H=60m e=90cm ; épaisseur dôme=80cm; peau métallique de 6 cm.
- 1300, 1450 MWe : double paroi
  - Paroi interne en béton précontraint : e= 120 cm pour le cylindre et e= 82 cm pour le dôme. Fonction = résister aux conditions de pression et de température internes en assurant une "relative" étanchéité.
  - Paroi externe en béton armé : e= 55 cm pour le cylindre et e=40 cm pour le dôme. Elle a pour fonction de créer l'espace annulaire et d'apporter la protection nécessaire vis-à-vis des agressions externes.
- EPR :
  - Deux parois en béton avec un système de confinement dynamique.
  - Peau d'étanchéité métallique dans la paroi interne.

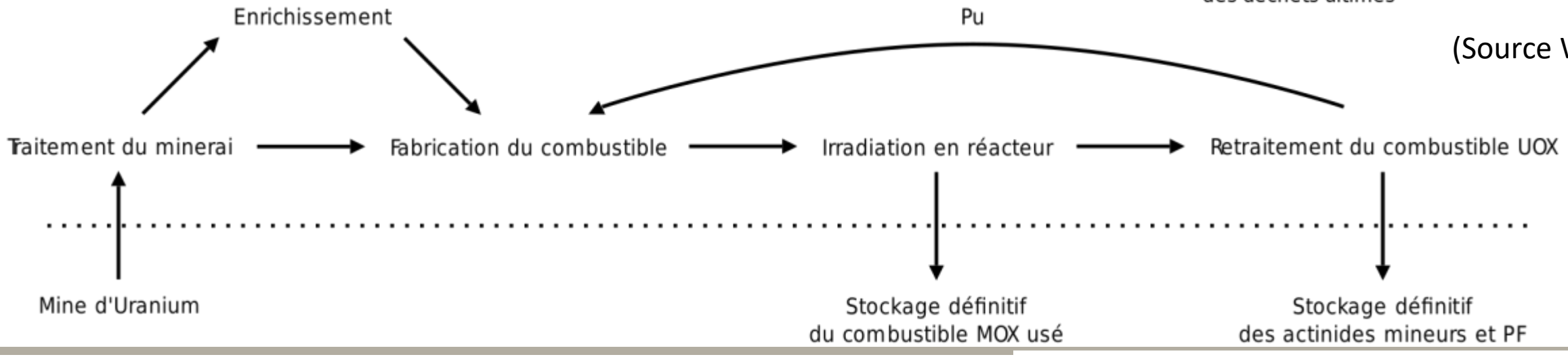
❑ Le cycle du combustible

Le cycle du combustible

- Ensemble des opérations :
  - Extraction des minerais de l'uranium,
  - Fabrication de combustible nucléaire,
  - Recyclage,
  - Gestion du combustible irradié.
- La France possède toutes les étapes du cycle du combustible.
- Les entreprises Orano, EDF et Framatome ont une activité dans le cycle du combustible.
- Amont du cycle: enrichissement entre 3-5% en uranium-235.
- Aval du cycle : recyclage du combustible usé et stockage.

Amont/Aval et cycle ouvert/fermé

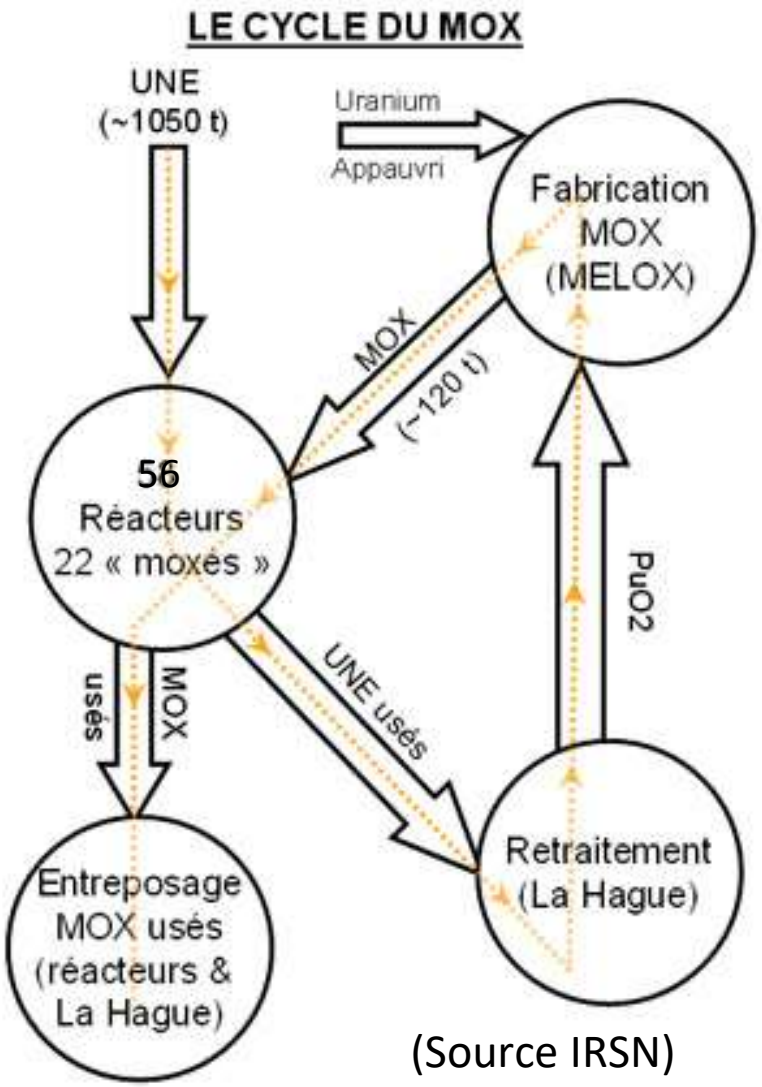




(Source Wikipédia)

Combustible Mixed OXides

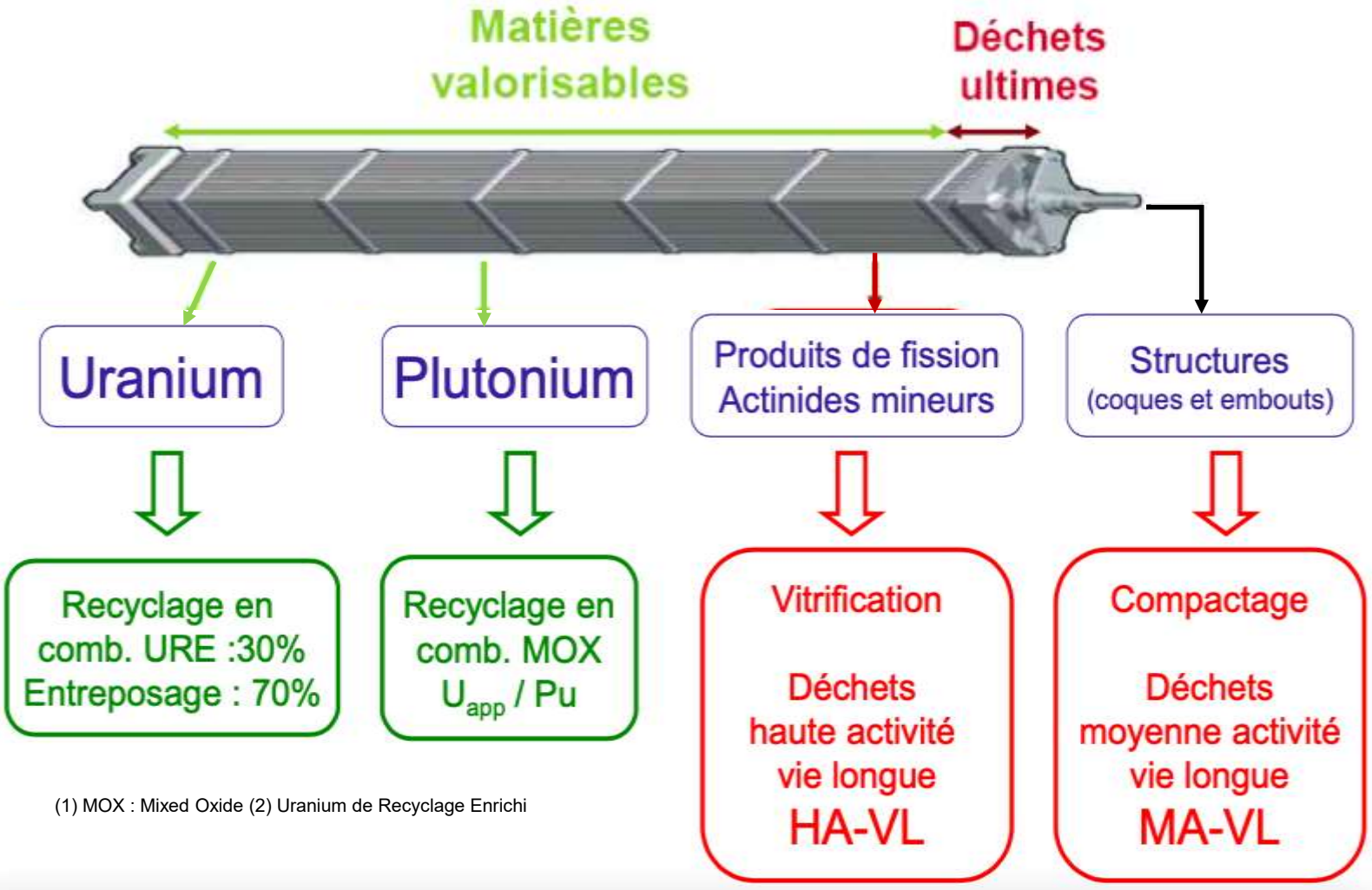
- **Mélange d'oxydes** de plutonium et d'uranium **provenant du recyclage du combustible usé des centrales nucléaires. (usine de la Hague)**
- Le recours aux combustibles MOX a débuté en 1987
- Pour les réacteurs d'EDF, la consommation annuelle d'uranium naturel est de l'ordre de 8 400 tonnes et celle de combustibles MOX de 120 tonnes, soit une économie annuelle d'environ 900 t d'uranium naturel.
- **Constitué d'un mélange d'environ 92 % d'uranium « appauvri » (**sous-produit des usines d'enrichissement de l'uranium) **et de 8 % de plutonium.**
- Le MOX contribue à la production de 10% de la production électrique nationale
- Le MOX est utilisé dans 22 réacteurs de 900 MW. (Tricastin, Dampierre, Gravelines, St Laurent, Blayais et Chinon). 24 réacteurs sont autorisés à l'utiliser.
- Après utilisation en réacteur, le MOX usé sont entreposés dans les piscines de La Hague, en attente d'un traitement ultérieur.



(Source IRSN)

Le recyclage

- Le combustible:
  - 3-4 ans en réacteur
  - 5 ans placé en piscine sur site.
  - Transport vers la Hague
  - entreposé 15 ans dans une seconde piscine.
  - Séparation matières et déchets



(D'après Orano)

Pourquoi recycler?

- Réutiliser l'uranium irradié encore avec un grand pouvoir énergétique;
- Epargner les ressources naturelles d'uranium

  → Fabrication du combustible MOX
- 10% de l'électricité en France générée avec du combustible MOX;
- Réduction de la consommation d'uranium de plus de 10%;
- Eviter le cout de l'enrichissement;

- Réduire la quantité de combustible: 7 UOX→1MOX;
- Diminuer la quantité et la radio-toxicité des déchets (plus que les PF et AM):

  - facteur 5 sur le volume

  - facteur 10 sur la radio-toxicité
- Recycler le plutonium (éviter les risques de prolifération).

❑ Les déchets radioactifs

Les déchets en général

- Les déchets non biodégradables font partie de la vie des hommes depuis leur sédentarisation.
- Chaque changement de société s'est accompagné d'une amélioration de leur gestion.
- En France ils sont classés en 3 catégories :

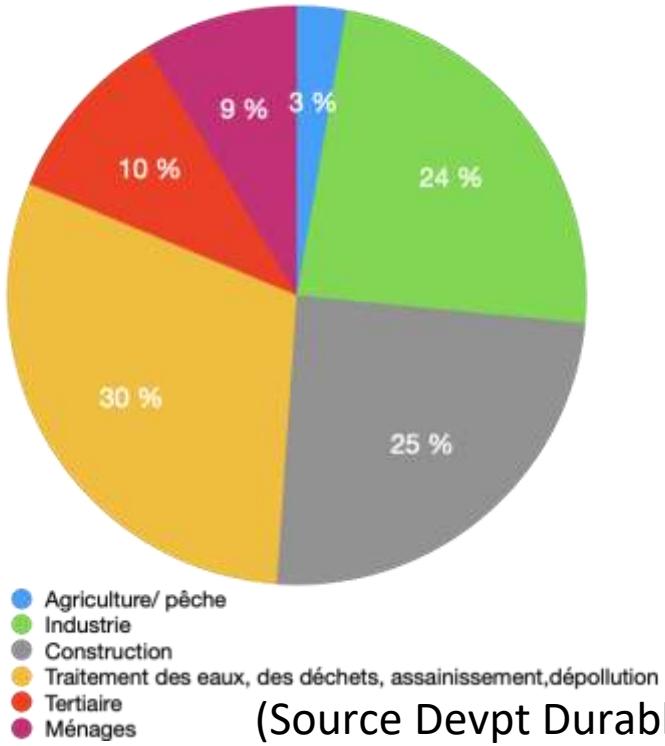
- Les déchets minéraux ;
- Les déchets dangereux ;
- Les autres déchets.

- Le Ministère de la transition écologique en établi annuellement l'inventaire:

un français produit environ 5 tonnes de déchets par an, dont 2 kg de déchets radioactifs.

- Ces derniers font partie des déchets dangereux.

Production de déchets dangereux, par secteur, en France, en 2018



(Source Devpt Durable)

Définition des déchets radioactifs

- D'après l'AIEA (agence internationale de l'énergie atomique) :

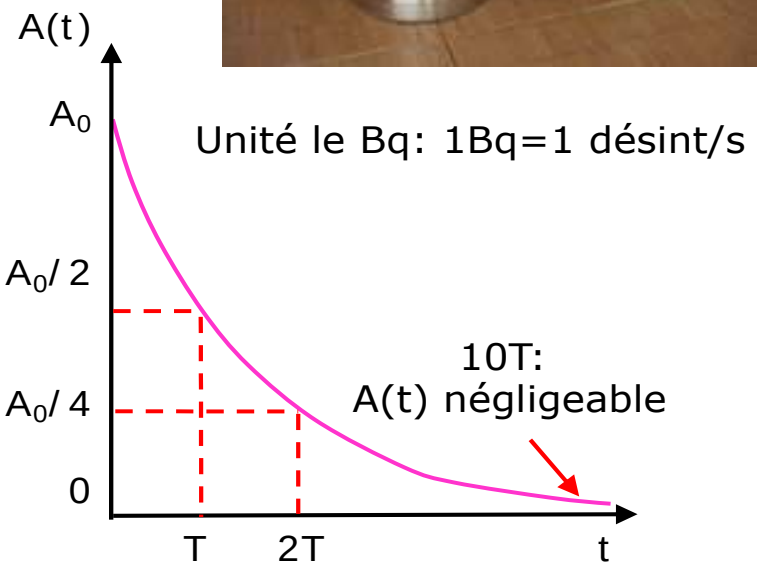
« Toute matériau qui contient ou est contaminé par des radionucléides à des concentrations ou niveaux d'activité supérieurs aux valeurs définies par les autorités compétentes de réglementation et pour lequel aucune utilisation n'est prévue. »

- En France aucun seuil minimum n'est défini.
- Différence entre matière nucléaire et déchet radioactif.

- déchet radioactif = substance radioactive n'ayant aucune utilisation ultérieure
- matière radioactive = substance radioactive ayant une possible utilisation ultérieure.

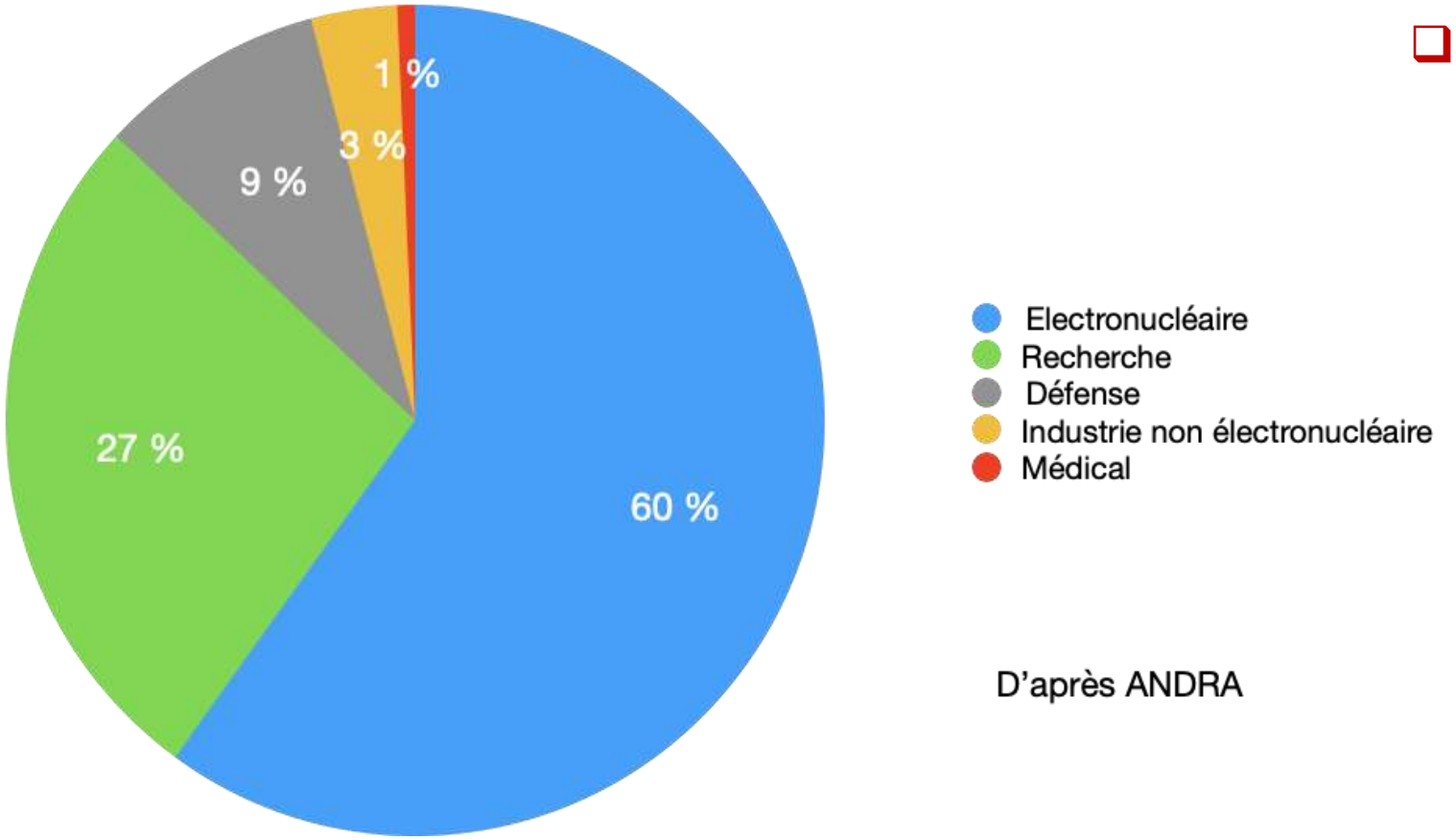
- Les déchets sont classés en fonction de :

  - leur niveau de radioactivité (activité en Becquerel)
  - leur durée de vie (période radioactive)



Répartition industrielle des déchets radioactifs

RÉPARTITION PAR SECTEUR ÉCONOMIQUE DU VOLUME DE DÉCHETS À FIN 2019



D'après ANDRA

- Industrie Electronucléaire:
  - 60 % des volume de déchets
  - L'essentiel des déchets à haute activité et moyenne activité à vie longue.

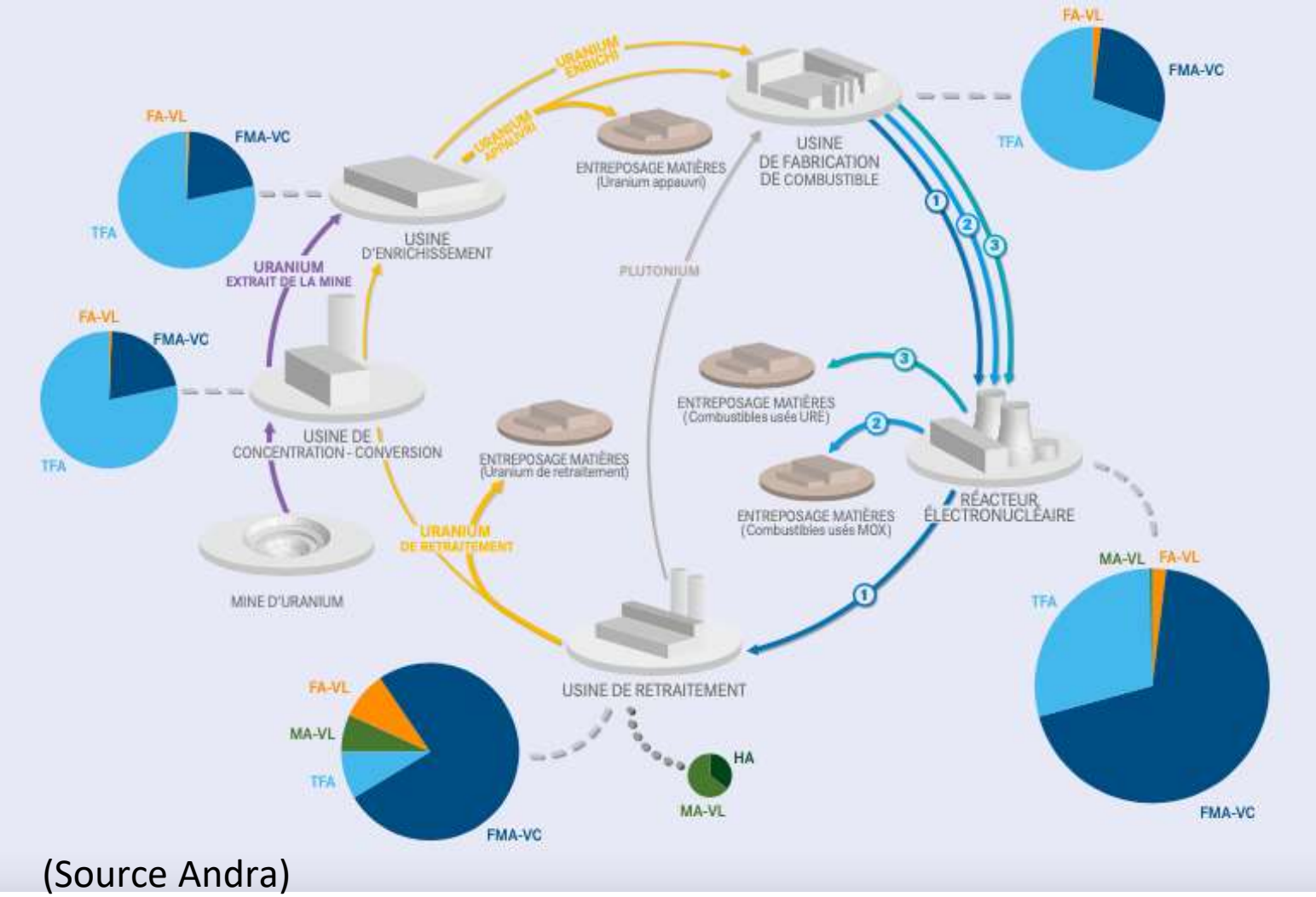
Classement des déchets radioactifs

Activité** \ Période radioactive*	Vie très courte (VTC) (période < 100 jours)	Principalement vie courte (VC) (période ≤ 31 ans)	Principalement vie longue (VL) (période > 31 ans)
Très faible activité (TFA) < 100 Bq/g	VTC Gestion par décroissance radioactive	TFA Stockage de surface (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage)	
Faible activité (FA) entre quelques centaines de Bq/g et un million de Bq/g		FMA-VC Stockage de surface (centres de stockage de l'Aube et de la Manche)	FA-VL Stockage à faible profondeur à l'étude
Moyenne activité (MA) de l'ordre d'un million à un milliard de Bq/g			MA-VL Stockage géologique profond en projet (projet Cigéo)
Haute activité (HA) de l'ordre de plusieurs milliards de Bq/g	Non applicable		HA

*Période radioactive des éléments radioactifs (radionucléides) contenus dans les déchets
** Niveau d'activité des déchets radioactifs

(Source Andra)

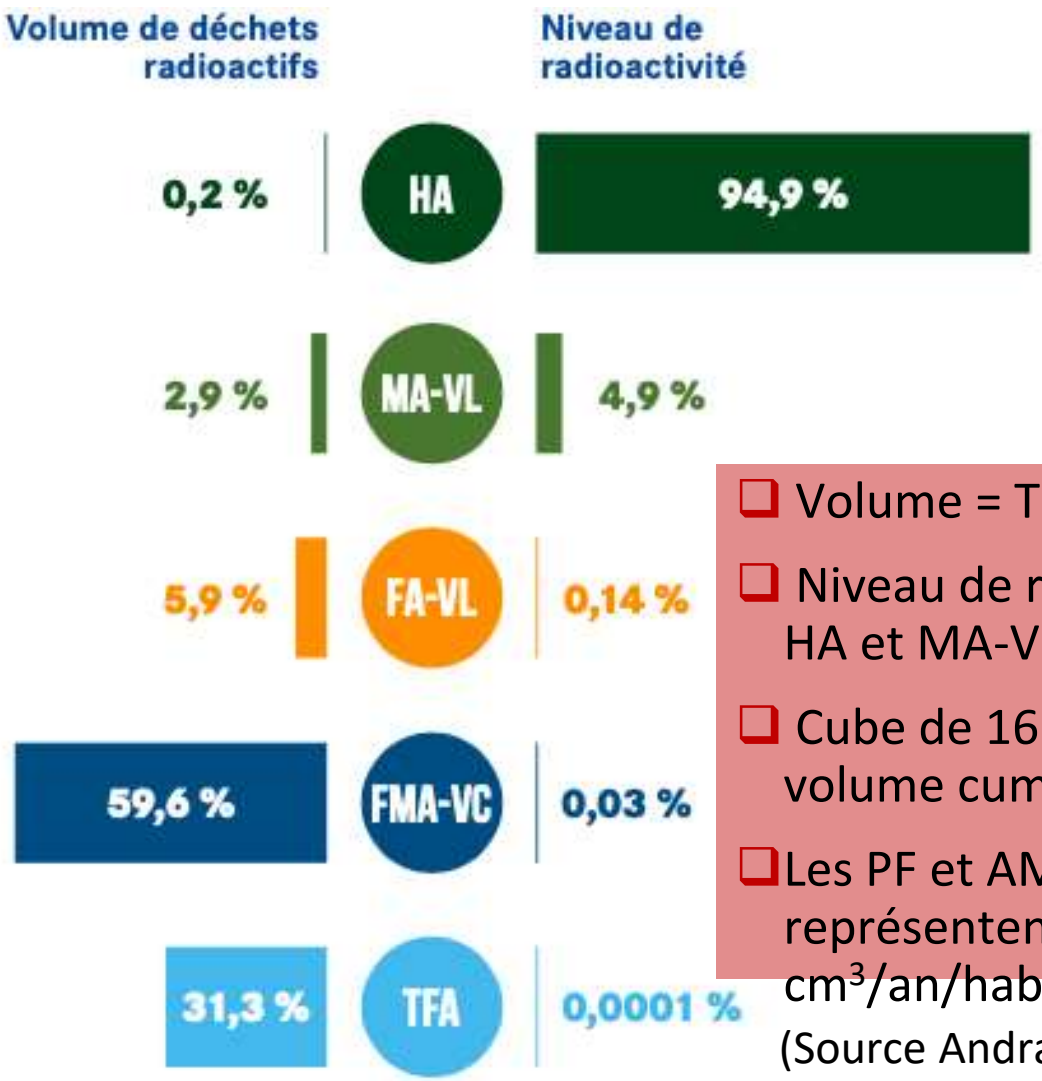
Quand les déchets sont-ils produits?



(Source Andra)

- Amont du cycle : plus de 75% TFA
- Exploitation : plus de 60% FMA-VC
- Déchets FA-VL : stockage est à l'étude.
- Aval du cycle : HA et MA-VL (PF et Am).
- Démantèlement : majorité TFA.
- Centres de stockage:
  - Centre Cires : TFA
  - Centre de l'Aube (CSA) et de la Manche (CSM) : FAM-VC
  - Projet Cigéo: HA et MA-VL.

Répartition en volume et radioactivité



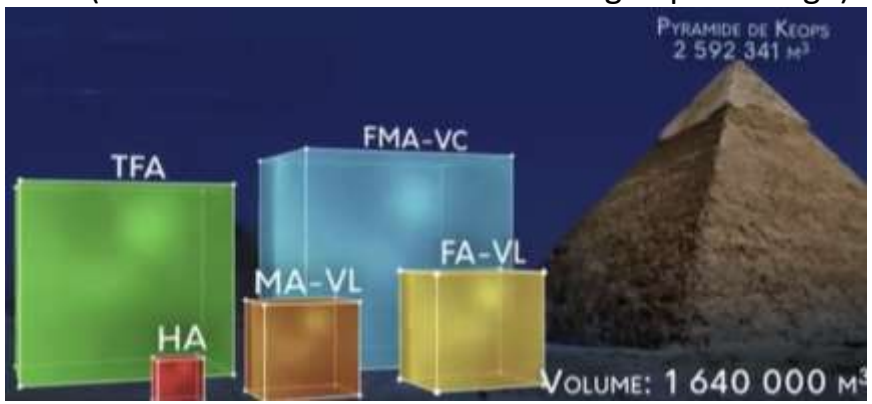
- Volume = TFA et FMA-VC
- Niveau de radioactivité = HA et MA-VL
- Cube de 16 m de coté = volume cumulé HA
- Les PF et AM représentent ~ 7 cm³/an/habitant.

(Source Andra)

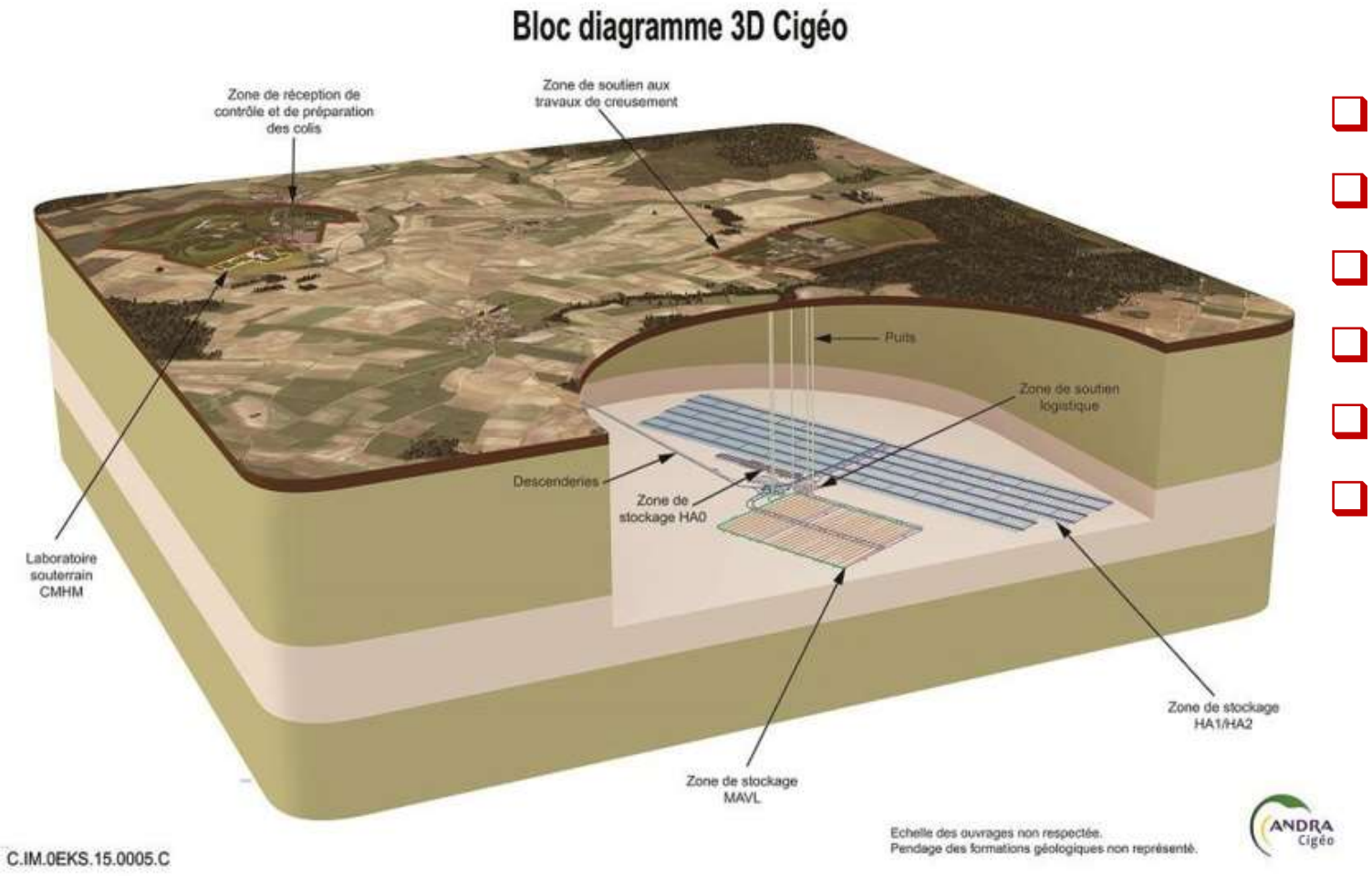
▸ BILAN ET ÉVOLUTION DES VOLUMES (m³) DE DÉCHETS DÉJÀ STOCKÉS OU DESTINÉS À ÊTRE PRIS EN CHARGE PAR L'ANDRA

Catégorie	À fin 2020	Évolution 2020-2019
HA	4 190	+100
MA-VL	42 900	+200
FA-VL	93 800	+200
FMA-VC	971 000	+9 700
TFA	586 000	+16 000
DSF	295	-300
Total	~ 1 700 000	+25 900

(Source : film Nucléaire: une énergie qui dérange)



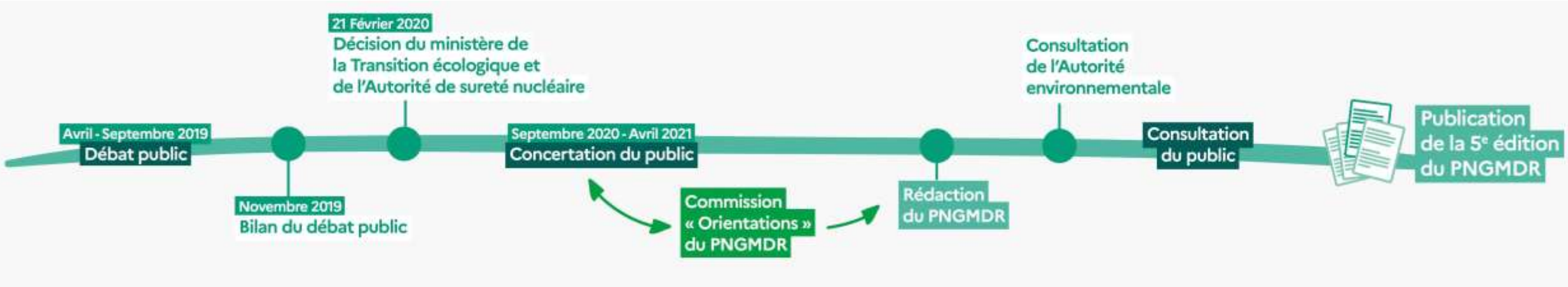
Projet Cigéo



- Date de MIS =2035
- Le coût du projet = 25 Mds d'€
- Volume stocké = 85 000 m3 de déchets
- Durée d'exploitation =100 ans
- Dimensionné pour l'ensemble du parc et l'EPR.
- Radioactivité = 0,01 mSv/an

Les déchets radioactifs

- Une problématique nationale, prise en compte par les pouvoirs publics, et encadrée par la loi du 28 juin 2006.
- La loi du 25 juillet 2016 précise les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue.
- La gestion des déchets nucléaires est pilotée via le plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR). Ce plan est conçu par le Ministère en charge de l'environnement et par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) selon L'article L. 542-1-2 du code de l'environnement.
- Cinquième édition du PNGMDR : 2022-2026



Quelques pistes pour le futur

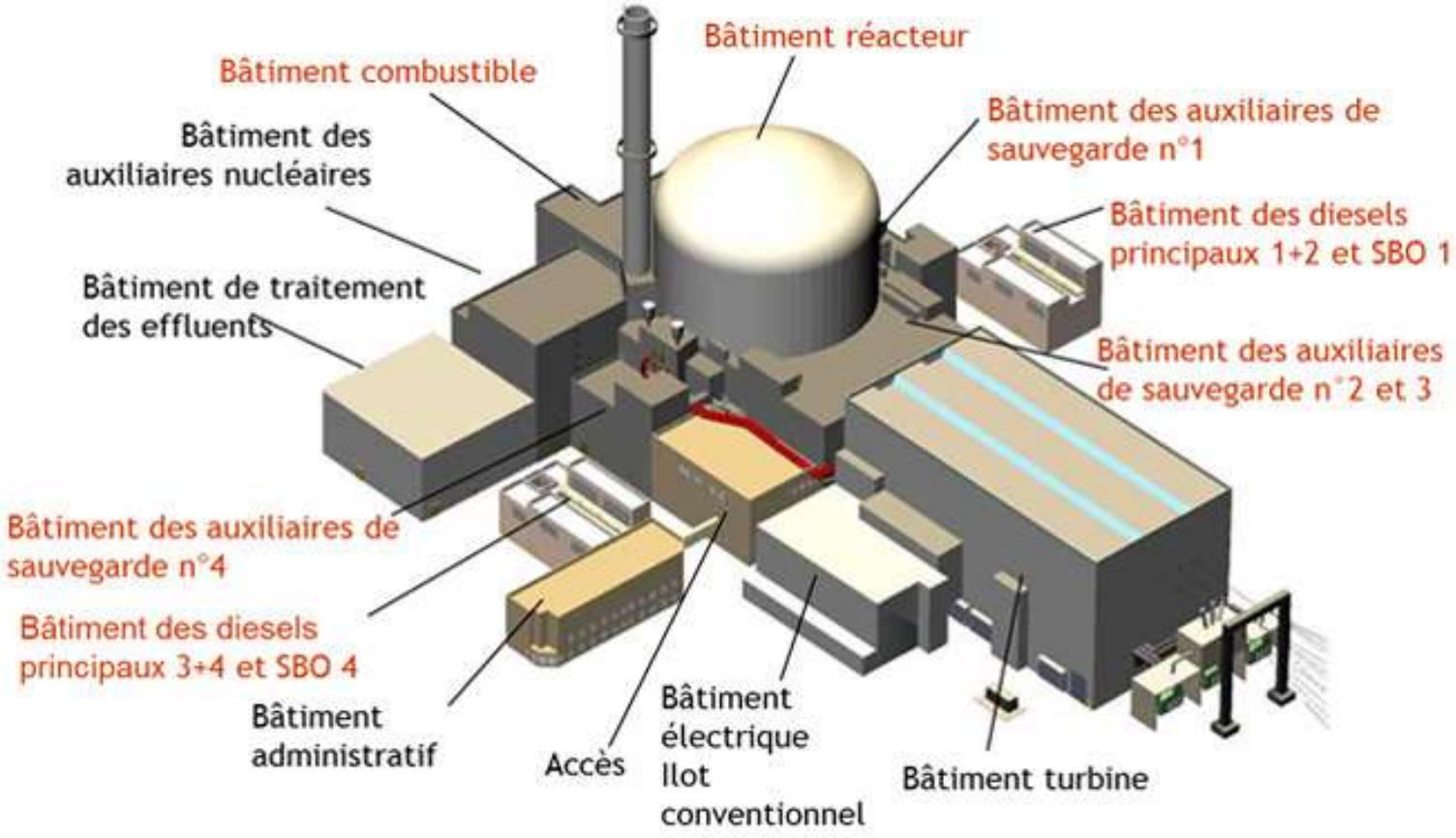
- Pistes pour la recherche sur la gestion des déchets:
  - **Axe 1**: Recherches et développements sur des procédés de multi-recyclage du combustible usé, à moyen terme, en réacteurs à eau pressurisée (REP).
  - **Axe 2**: Recherches à plus long terme, dans des réacteurs à neutrons rapides (RNR) ou ADS.
  - **Axe 3** : Recherches Séparation – Transmutation.
  - **Axe 4** : Recherches sur l'enfouissement en couche géologique profonde (Projet Cigeo).

4. Le futur proche

La génération 3: EPR

- Projet franco-allemand débuté en 1989 pour une nouvelle génération de réacteurs à eau sous pression examiné par les autorités de sureté nucléaire françaises (ASN) et allemandes.
- 1600 MWe
- 36 % de rendement énergétique (soit, en relatif,10 % de mieux que les réacteurs de la génération précédente)
- Une utilisation possible par conception de différents types de combustible (UOX ou MOX)
- Une durée de vie technique de soixante ans
- Des charges d'exploitation réduites (fonctionnement à 92% de disponibilité)
- Une sûreté renforcée essentiellement vis-à-vis de la fusion du réacteur.

Objectifs de sureté EPR

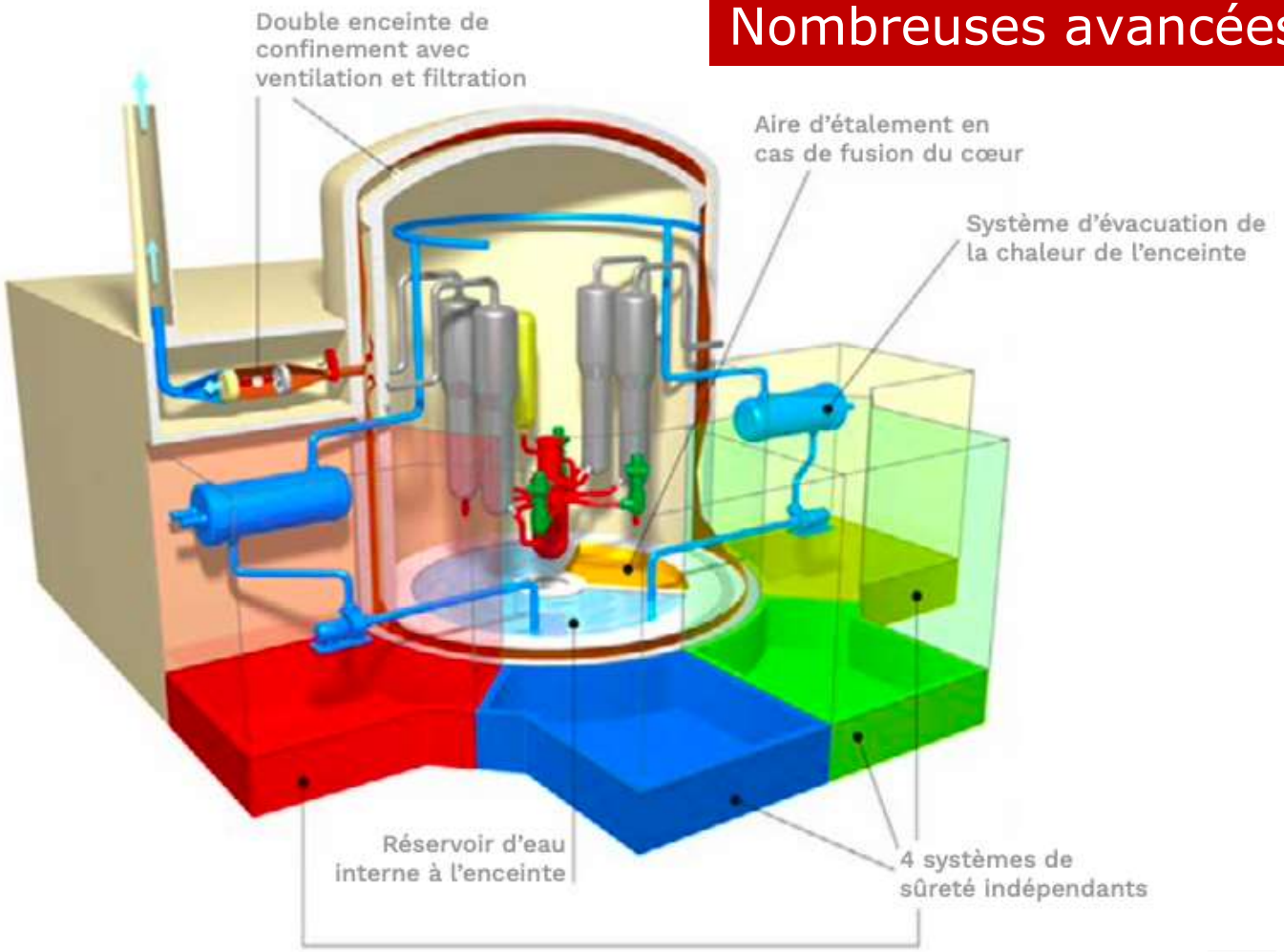


(Source IRSN)

- Objectifs de sureté parmi les plus élevés au monde
- Réduction de la fréquence de fusion de cœur (< 10^{-5})
- Réduction des rejets radioactifs
- Protection renforcée contre les agressions internes et externes
- Réduction des doses individuelles et collectives reçues par les travailleurs
- Approche évolutionnaire par rapport au parc installé pour bénéficier des REX.

Génération 3: EPR

Nombreuses avancées en matière de sureté

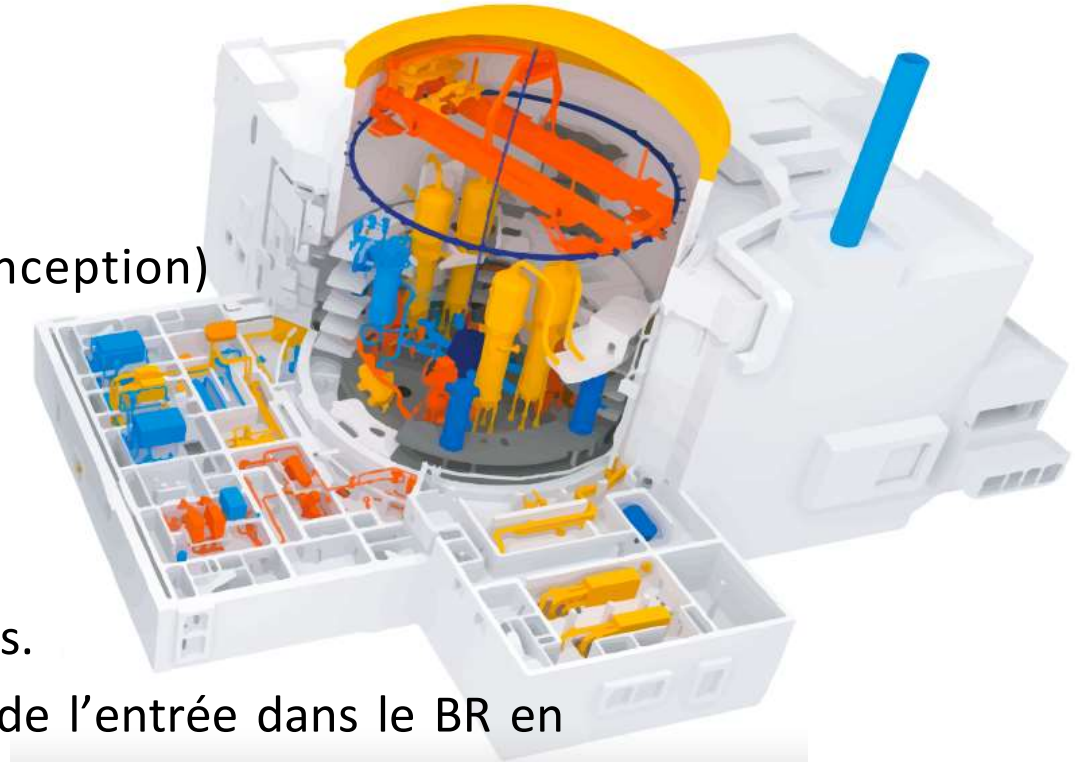


(Source EDF)

L'EPR2

- Version optimisée de l'EPR.
- L'EPR2 conserve les atouts de l'EPR :
  - Puissance = 1670 MWe;
  - Utilisation en UO2 ou MOX (30%) ;
  - hautes normes de sûreté (post Fukushima intégré à la conception)
- Prise en compte du REX des EPR dans le monde et du parc :
  - design simplifié : meilleure constructibilité (simple enceinte,
  - Outil numériques utilisés (maquette numérique 3D et 4D).
  - Travail en entreprise étendue
  - Standardisation et réduction des catalogues des équipements.
  - Suppression du « two-room concept » de l'EPR : abandon de l'entrée dans le BR en production.
  - Trois trains de sauvegarde au lieu de 4 sur l'EPR : abandon de la maintenance en marche.

(Source Dossier EPR2, EDF CNDP)



4. Le Futur plus lointain

A quoi doit répondre un réacteur du futur?

Flexible et pilotable (suivi de charges)

S'intégrer facilement avec des ENR dans un MIX électrique

Electrifier les usages (Électricité et/ou chaleur)

Lutte contre le RC efficacement

Accepter par les populations

Construction en très grand nombre

Toujours sûrs (attention au FOH)

Réduire les déchets

Economie de combustible
Besoin de peu de matières premières

Cout abordable

Concepts du futur

- Les concepts de réacteurs du futur sont tous à des stades de réflexion différents en fonction des verrous technologiques qu'ils possèdent.

- La plupart des concepts ont été pensés dans les années 60-70 et donc aujourd'hui pourraient revenir sur le devant de la scène grâce aux énormes développements technologiques faits depuis (matériaux, contrôle et surveillance, efficacité des équipements et des systèmes, …)

- On peut les classer par solutions aux usages industriels :
  - Électricité : EPR2, SMR
  - Chaleur (industrielle, chauffage) : HTR
  - Production hydrogène : HTR
  - Bruleur de déchets (meilleure utilisation des matières premières) : MSR, RNR

Le SMR (PRM)

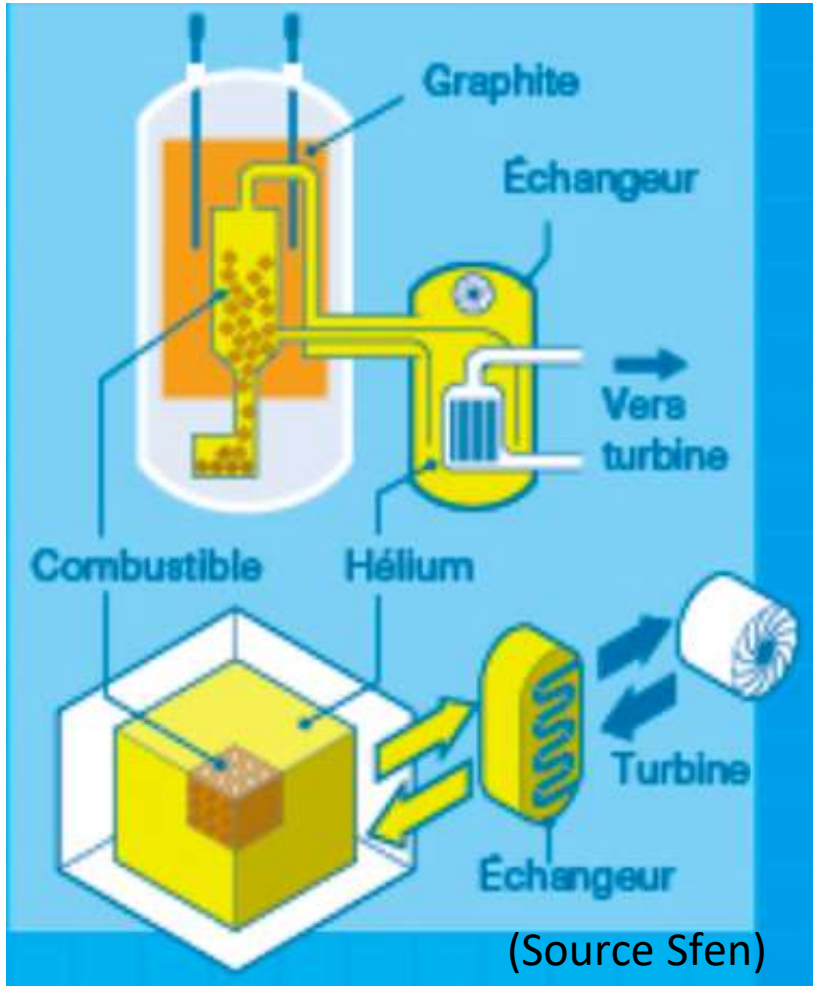
- Ce sont des petits réacteurs modulaires et de faible puissance (50-300 MWe) dont le cout sera inférieur au milliard d'euros.
- Trois concepts : modularité, effet de série et simplification.
- Modularité : le réacteur est décomposé en modules dont certains sont directement construits en usine et assemblés ensuite sur site.
- Effet de série : permettra de réduire les couts, les plannings, car cela permet une fabrication industrielle.
- Simplification : en baissant la puissance cela permet de simplifier le design.
- Usages électriques:
  - Remplacer le charbon
  - Alimentation en électricité des sites éloignés (sites habités; sites militaire)
  - Proposition intéressante pour des pays qui ne peuvent pas se payer des gros réacteurs
  - Production d'hydrogène vert, dessalement de l'eau de mer.
- Usages non-électriques :
  - Chaleur industrielle haute température autour de 600 °C
  - Chaleur résidentielle et tertiaire pour le chauffage urbain
  - Propulsion (navale et aérospatiale)

Projet Nuward

(Source EDF)

- Un réacteur compact
- Enceinte métallique dans un bassin d'eau
- Ilot nucléaire comprenant 2 réacteurs de 170 MWe + une piscine d'entreposage

Réacteur à haute température

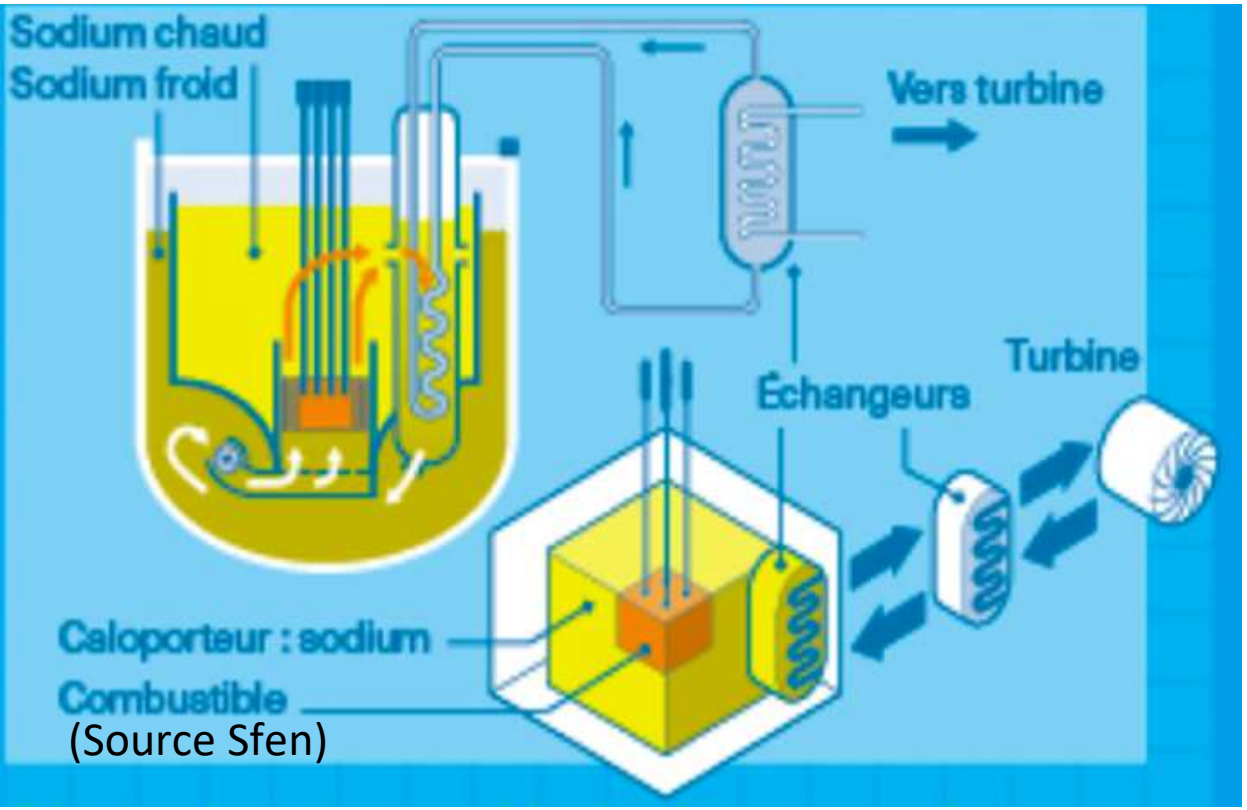


(Source Sfen)

- Plusieurs réacteurs HTR ont été construits et ont fonctionné dont deux réacteurs de puissance 300 et 330 MWe.
- 1er réacteur DRAGON en UK (1964-1977).
- Caloporteur : gaz inerte (hélium) (pas de problème de chimie et de radioactivité) à haute température
- rendement élevé ($\sim 50\%$) : augmentation de la T°.
- Combustible céramique sphérique de D$< 1\mathrm{mm}$
- Haute température produite autour de 600 °C
- Exemple : Concept en France Jimmy : micro-réacteur de 10 MWe

- La Chine a mis en service un HTR le 20/12/21 à Shidao Bay.

Réacteur à neutrons rapides



(Source Sfen)

- Deux RNR construits en France : Superphenix et Phenix.
- Combustible : mélange UO_2-PuO_2
- Pas de modérateur (neutrons rapides)
- Caloporteur: sodium liquide (autres options comme Pb)

- Capables de fabriquer autant de matière fissile qu'ils n'en consomment : utilisation U-238.
- Augmentation d'un facteur entre 50-100 environ l'énergie que l'on peut tirer de l'uranium par rapport aux réacteurs actuels.
- En 2020, trois réacteurs à neutrons rapides en exploitation : les réacteurs russes Beloyarsk-3(BN-600) et Beloyarsk-4 (BN-800) et le CEFR chinois.

Intérêt des noyaux fertiles

Cycle U/Pu:

$$\boxed{^{238}U} + n \rightarrow {}^{239}U \xrightarrow[23.5\text{min}]{\beta^-} {}^{239}Np \xrightarrow[2.3\text{ jours}]{\beta^-} \boxed{^{239}Pu} \; (2.4\,10^4 \text{ ans})$$

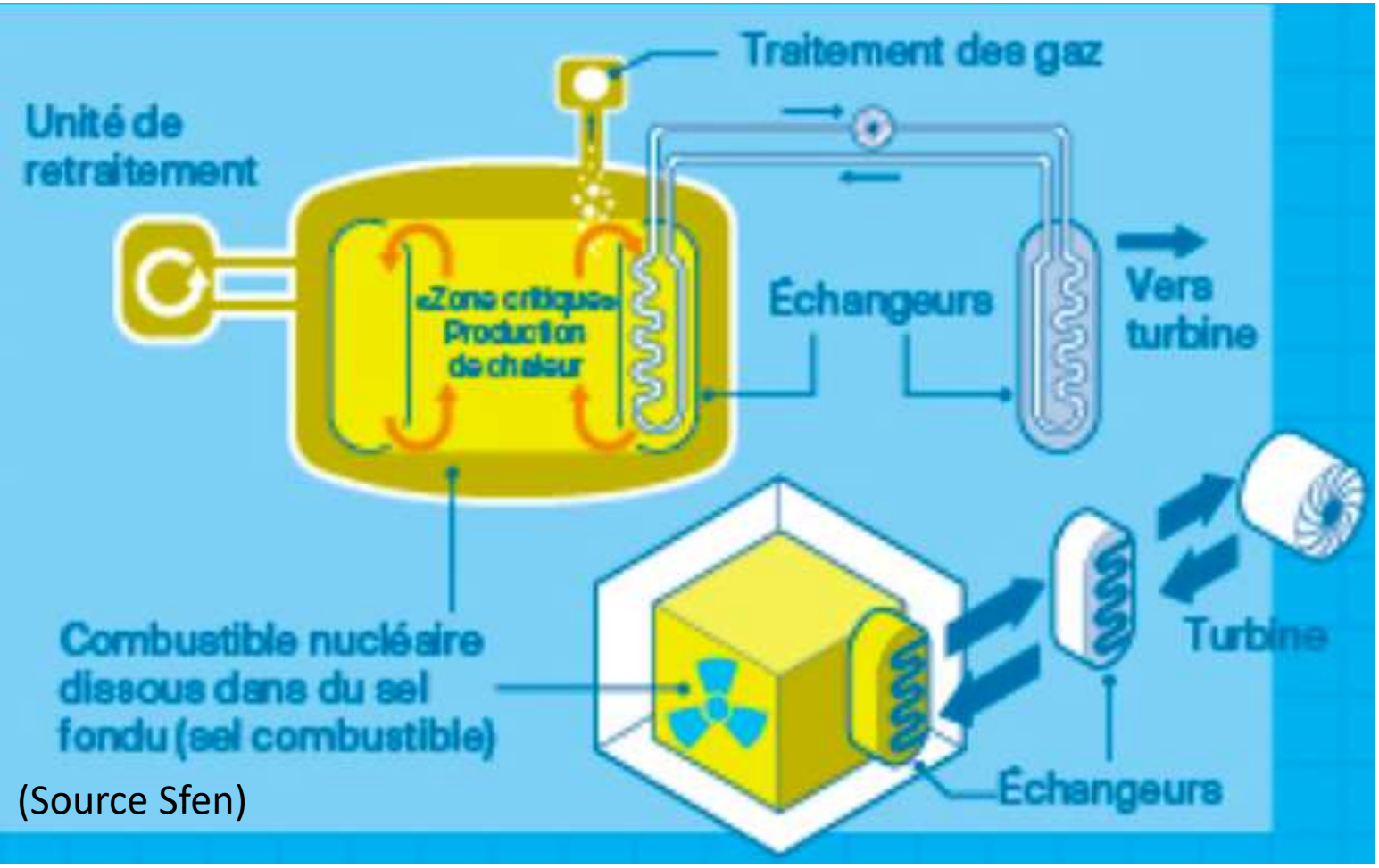
Cycle Th/U:

$$\boxed{^{232}Th} + n \rightarrow {}^{233}Th \xrightarrow[22.3\text{min}]{\beta^-} {}^{233}Pa \xrightarrow[27\text{ jours}]{\beta^-} \boxed{^{233}U} \; (1.6\,10^5 \text{ ans})$$

Noyau fertile *Noyau fissile*

- Le Pu est produit (régénéré) par capture de neutrons sur l'^{238}U : **masse de Pu = cte**
- L'^{238}U est consommé : ~ 1 tonne / (Gwe.an)
- Utilisation du minerai d'uranium ~ 100%

Réacteurs à Sels fondus

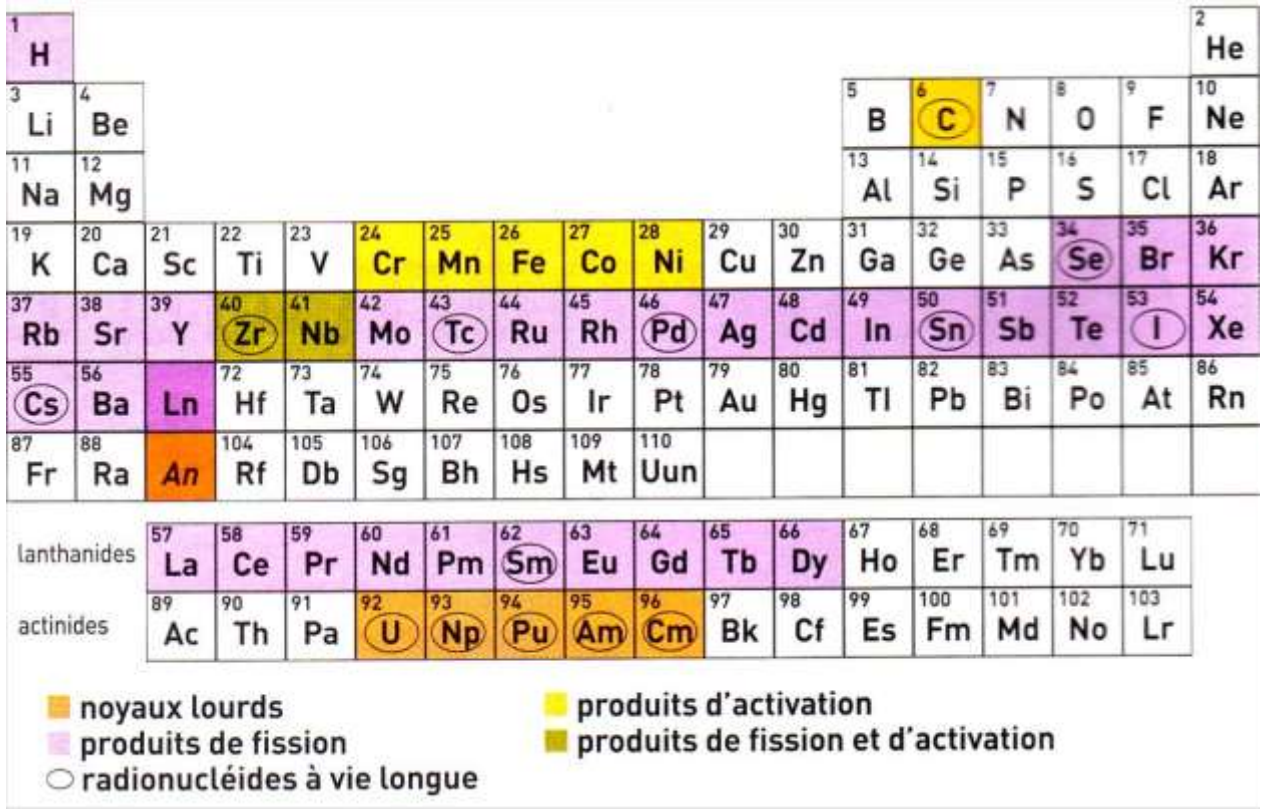


(Source Sfen)

- Le combustible est liquide et non plus solide dissous dans un sel.
- Le sel est le caloporteur et joue le rôle de barrière de confinement.
- Possibilité d'utiliser un modérateur (graphite) ou pas.
- Avantages théoriques:
  - Retraitement en ligne possible
  - Utilisation de U/Pu; Th/U
  - Incinération Pu et transmutation Am
  - Sureté passive (évacuation Pres)
- Il faut un prototype construit.
- Start-up Naarea en France.

La transmutation

- Recycler des noyaux en réacteur pour les faire disparaitre par réaction nucléaire.
- Les transuraniens (au-delà de l'uranium) : Formés par capture neutronique et décroissance radioactive:
  - élimination par réaction de fission
- Les produits de fission à vie longue (PF-VL) : Formés par fission, (décroissance (β) et/ou capture neutronique)
  - élimination par capture vers un isotope stable



- Rappel: loi de 2006 : la transmutation ne se positionne qu'en option complémentaire d'un stockage

le cnam

Merci de votre attention.