



# Comment les petits réacteurs nucléaires peuvent contribuer à nos besoins énergétiques?

---

Olivier HUET (AN 191) – 11 septembre 2023  
IENA (Arts et Métiers)



## SOMMAIRE

---

IENA  
11 septembre 2023

1. Quel besoin en énergie électrique en 2050?
2. Généalogie de la Propulsion Nucléaire française
3. Nuward, un réacteur terrestre de propulsion navale ?
4. Quelques facteurs de succès

# QUEL BESOIN **EN ELECTRICITE** DANS LE MONDE EN 2050?

ENERGIE ELECTRIQUE CONSOMMEE DANS LE MONDE =

**Nombre d'habitants sur terre**

X

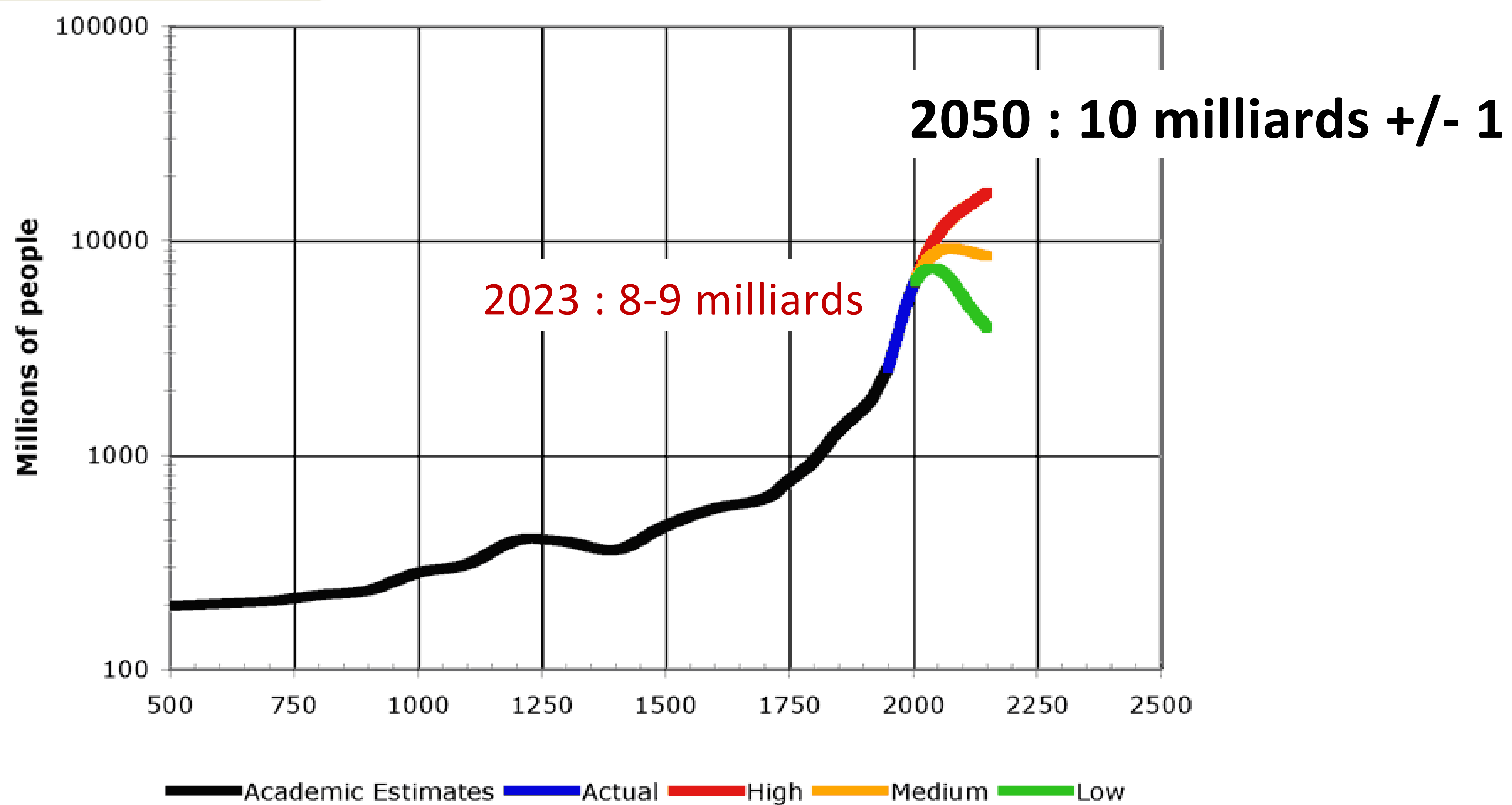
Energie totale consommée par habitant

X

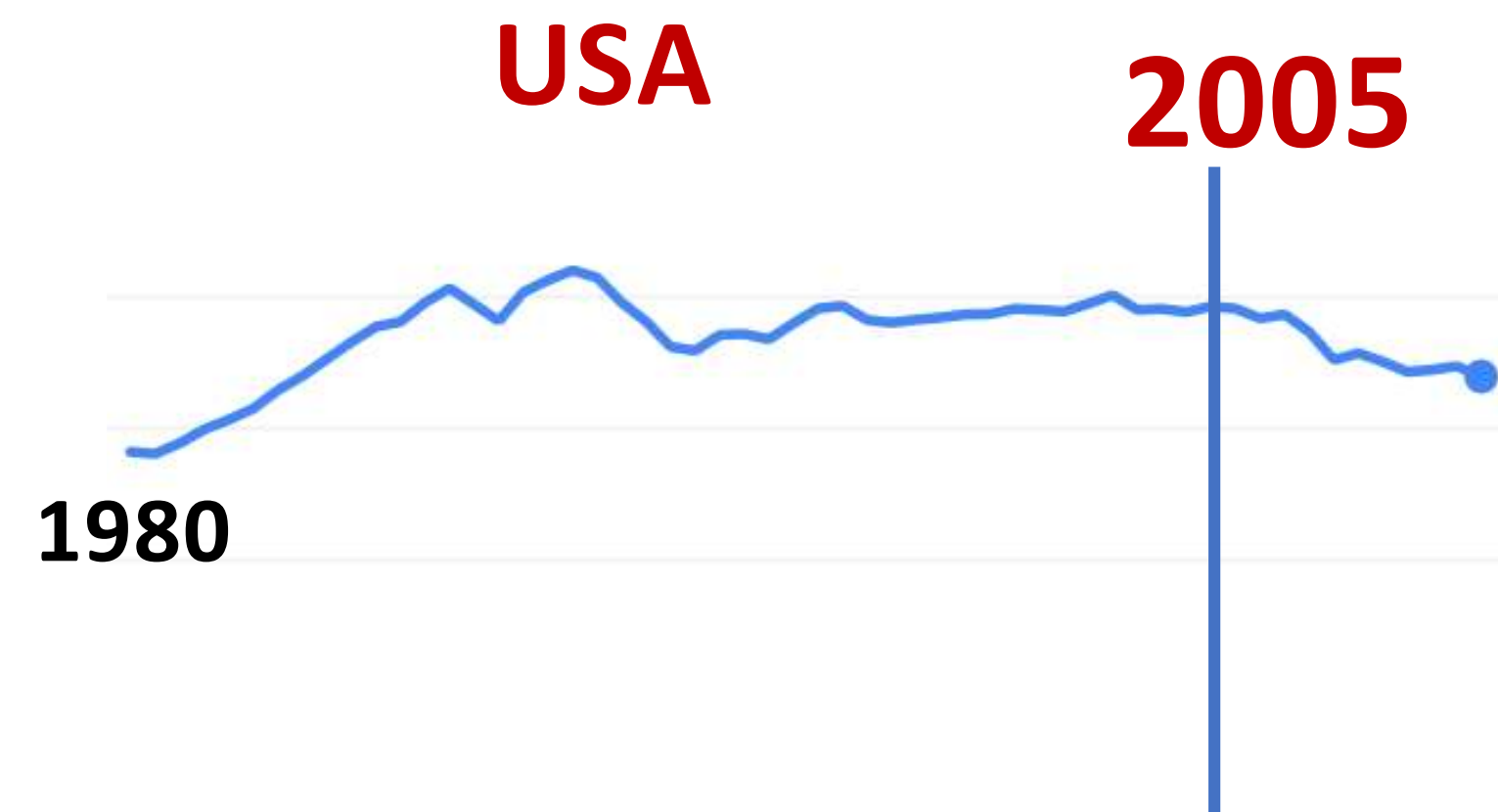
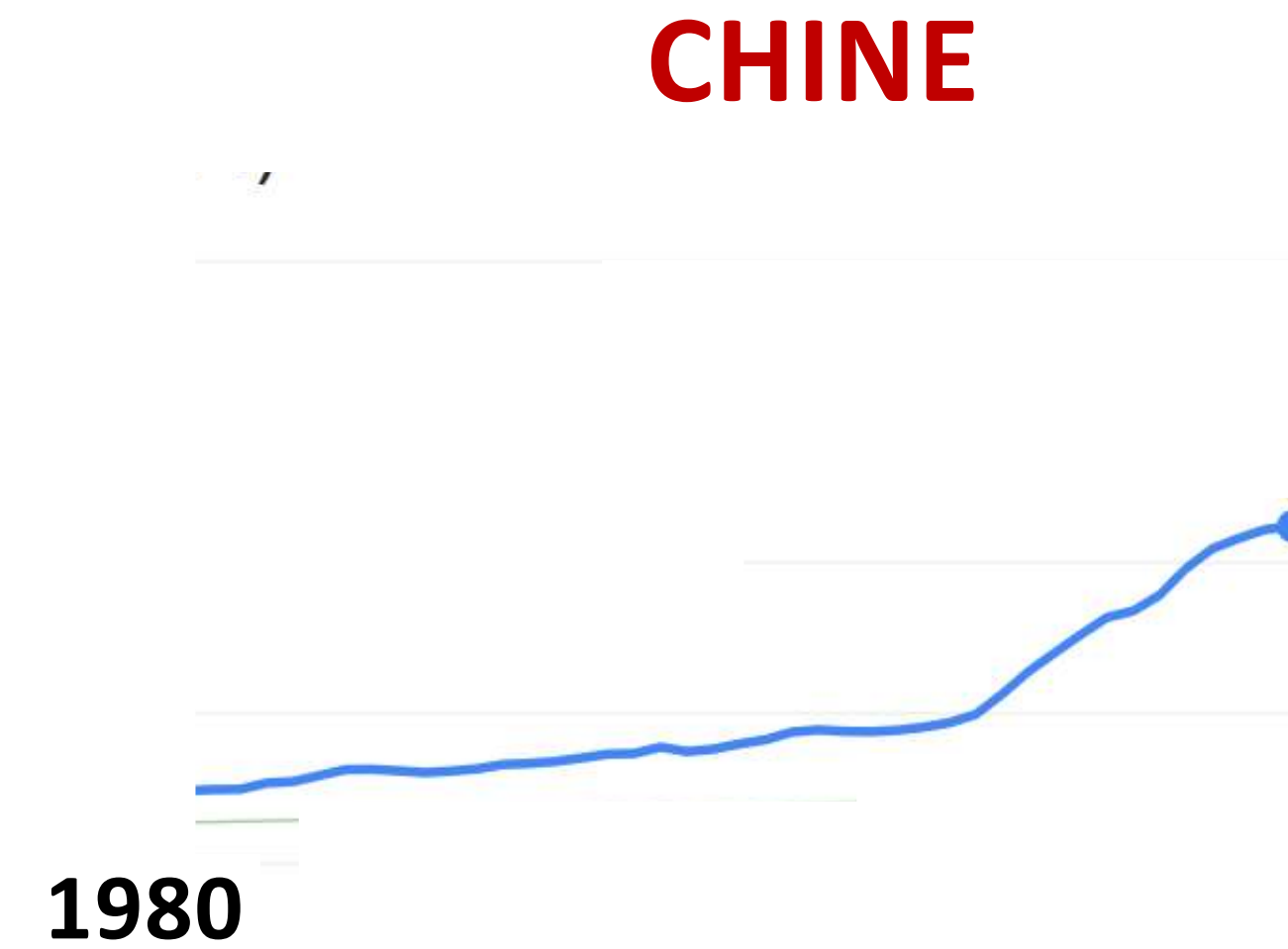
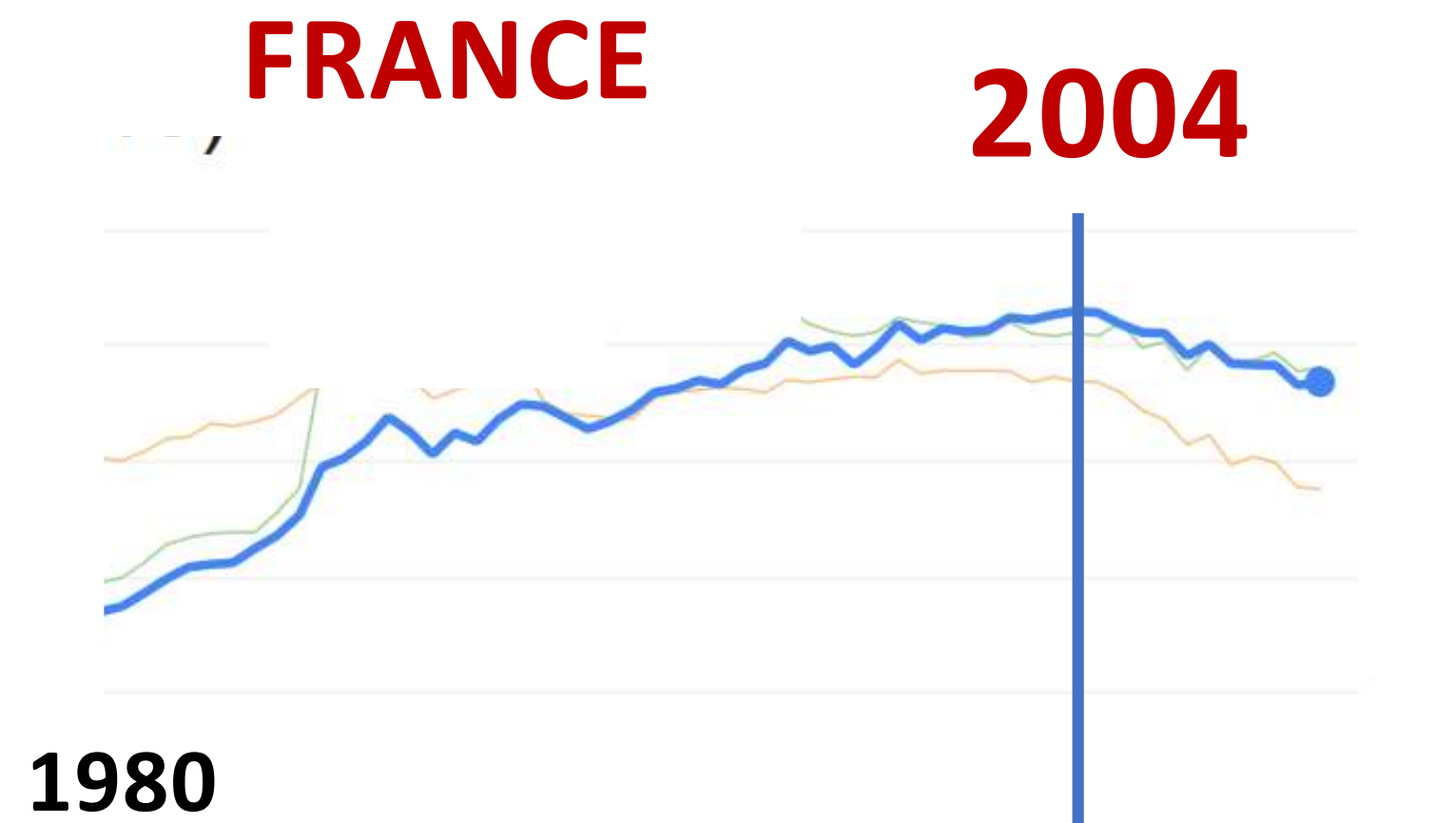
% électrification



# Evolution de la population mondiale



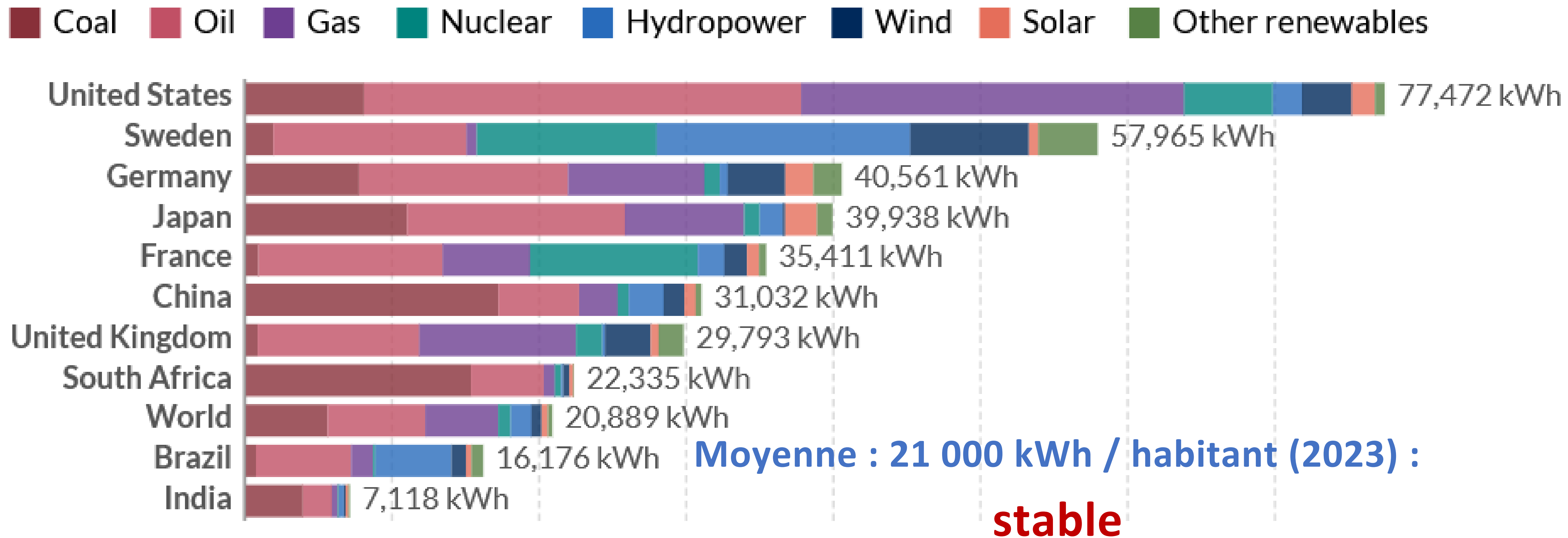
# Evolution de la consommation d'Énergie par habitant / an



Source : Banque Mondiale



# Consommation d'Énergie par habitant / par pays

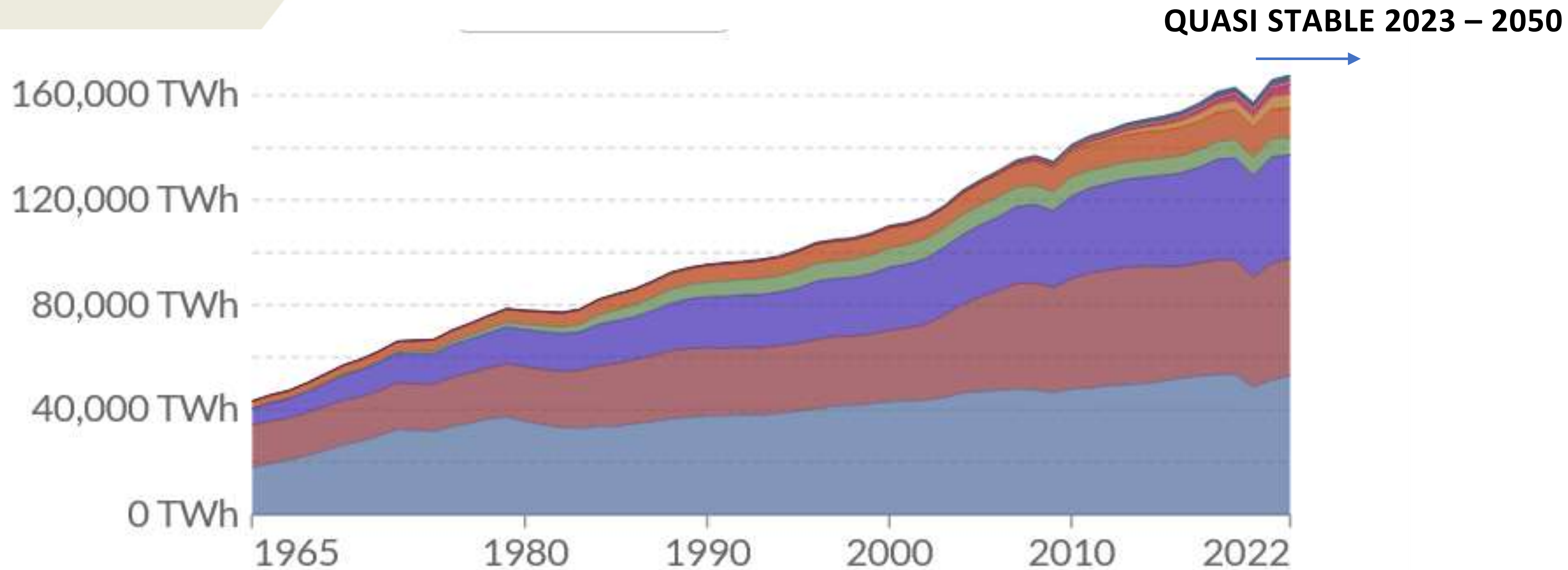


Source: Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

**20 000 kWh en 2008**



# Evolution de la consommation d'Énergie dans le monde



Source: Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)



# EN RESUME

En 2050, 200 000 TWh de demande d'énergie

¼ TRANSPORTS

¼ RESIDENTIELS

¼ INDUSTRIE

¼ SERVICES / AGRICULTURE

? % sous forme électrique

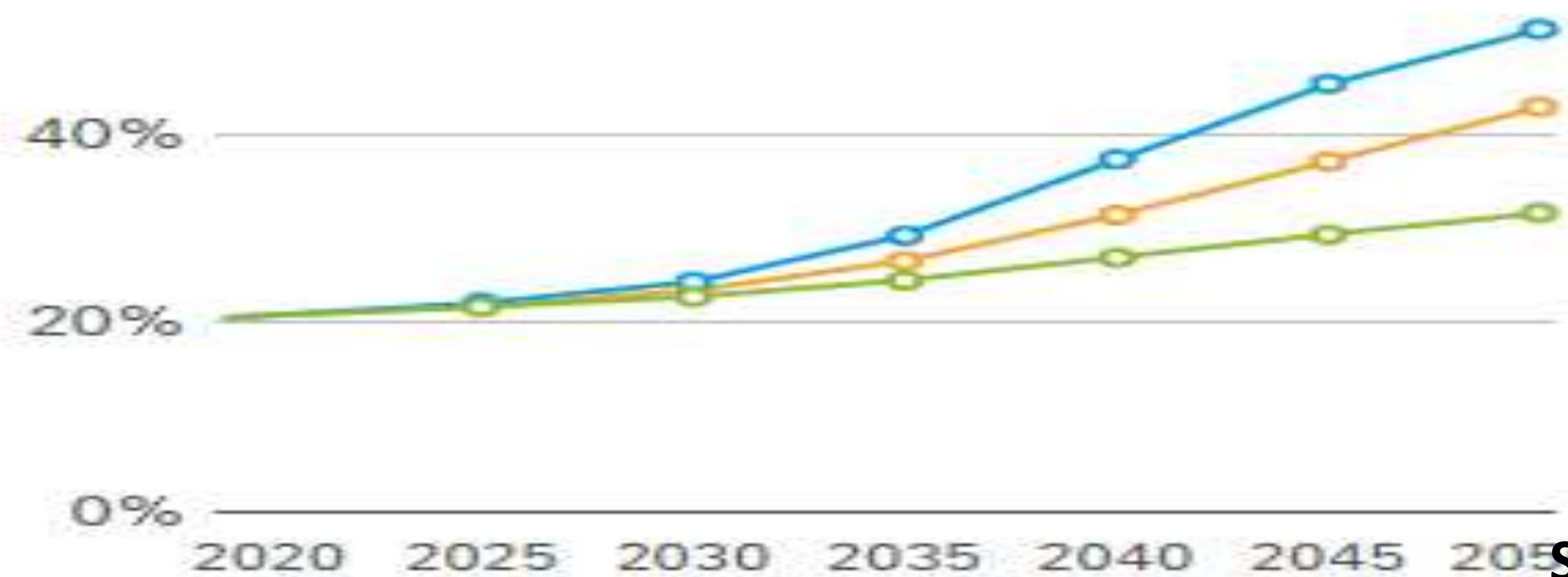




# Electricité dans la consommation finale d'énergie

Electricity Share of total	1990	2000	2010	2020
	13,3 %	15,5 %	17,4 %	20,5 %

**2050 : 30 à 45%**



Source BP Energy Outlook 2022

*est la propriété de la Société Technique pour l'Énergie  
et ne peut être reproduit ni communiqué sans son autorisation*



BESOIN EN ELECTRICITE DANS LE MONDE EN 2050 : > 70 000 TWh

ENERGIE ELECTRIQUE Consommée DANS LE MONDE =

**Nombre habitants sur terre : 10 milliards**

**X**

Energie consommée par chaque habitant : 21 000 kwh

**X**

**% électrification (30%)**



# Production d'électricité dans le monde : quel MIX?

- Réserves
- Accessibilité
- Politique
- Environnement €€€ : prix!
- Surface au sol
- Stockage
- Transport / Disponibilité
- Risques
- CO<sub>2</sub>





## • SOMMAIRE

---

- IENA
- 11 septembre 2023

1. Quel besoin en énergie électrique en 2050?
2. Généalogie de la Propulsion Nucléaire française
3. Nuward, un réacteur terrestre de propulsion navale ?
4. Quelques facteurs de succès



# 3 branches de « l'arbre nucléaire » en parallèle

- ◆ L'arme
- ◆ La production d'électricité
- ◆ La propulsion navale



Un essai de l'arme nucléaire



La centrale de Fessenheim

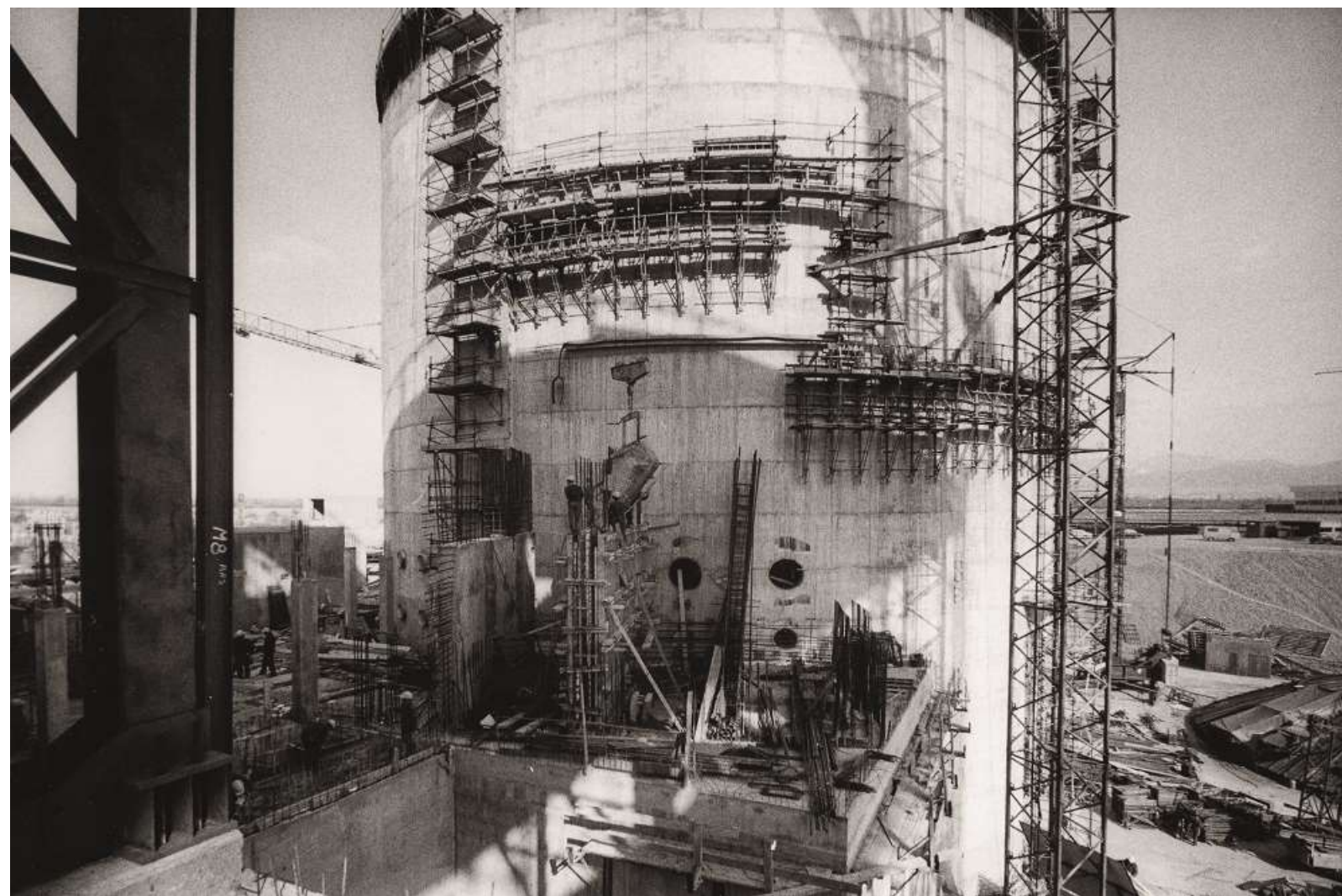


Le SNLE *le Redoutable*

# L'ATOME français : grandes dates



1955 – Tableau de commande de la pile Zoé



Milieu des années 70 : le chantier de la centrale de Fessenheim

- ◆ 1945 Le Commissariat à l'Énergie Atomique est créé
- ◆ 1948 : Zoé diverge au Fort de Châtillon
- ◆ 1960 : Première bombe atomique
- ◆ 1972 : *Le Redoutable* inaugure la composante océanique stratégique
- ◆ 1974 : Programme électronucléaire



# Civil comme militaire : un REP sinon rien

La filière nationale civile *c'était* l'UN-GG (Uranium Naturel – Graphite Gaz)

- ◆ 1959 : Chooz A lancée. Premier REP électrogène
- ◆ 1959 : lancement à Chinon de EDF-2 et EDF-3, UNGG
- ◆ 1967 : Pierrelatte (usine d'enrichissement)
- ◆ 1969 : UN-GG dans la difficulté
- ◆ 1969 : lancement de Tihange, REP Westinghouse de 900 MW

➤➤ 1974 plan Messmer, la filière REP US s'impose définitivement



# Généalogie de la propulsion nucléaire (PN)

- ◆ 1939 : Trois brevets de Frédéric Joliot
- ◆ 1955 : Nautilus 
- ◆ 1958 : Q244 (Uranium naturel / eau lourde) 
- ◆ 1959 : création du centre de Cadarache
- ◆ 1964 : le PAT (Prototype à Terre) un réacteur à eau pressurisée
- ◆ 1972 : *le Redoutable* est le premier SNLE / Naissance de TechnicAtome



l'USS Nautilus, 1<sup>er</sup> sous-marin nucléaire d'attaque

**»» La propulsion nucléaire française : enfant naturel du CEA (aidée par la PN américaine)**



TechnicAtome: (500 M€ CA / 2 000 salariés)

# TechnicAtome

Les réacteurs nucléaires compacts



**Propulsion nucléaire**

**85%**



**Réacteurs Civils**

**15%**

**Conception, réalisation, mise en service et maintien en conditions opérationnelles des réacteurs compacts**

# Cartographie de la filière nucléaire civile



# Génération successive depuis 1972

SNLE le Redoutable

SNLE le Triomphant

Porte-avions Charles de Gaulle

SNA Suffren

- ◆ 6 SNLE du type *Le Redoutable* (1972 à 1985. Dernier retiré en 2008, 8000 t) : **1 REP 100 MWt**
- ◆ 6 SNA du type *Le Rubis* (1983 à 1993. Encore en service, 2400 t) **1 REP 48 MWt**
- ◆ 4 SNLE du type *Le Triomphant* (1997 à 2010. Encore en service, 14 000t) **1 REP 150 MWt (K15)**
- ◆ Le PA *Charles de Gaulle* (2001) (2 REP type K15)
- ◆ 6 SNA du type *Le Suffren* (2020 à 2030)
- ◆ 4 SNLE de 3ème génération (2035 à 2050)
- ◆ et demain le PA de seconde génération (2038, K22)



# Atouts d'une propulsion nucléaire embarquée

- ◆ Densité de puissance
- ◆ Source froide infinie à disposition
- ◆ Energie anaérobie donc discrète
- ◆ Autonomie « infinie » / indépendance stratégique
- ◆ Grande simplicité fonctionnelle

»» **Le sous-marin nucléaire est le *seul vrai sous-marin***





## • SOMMAIRE

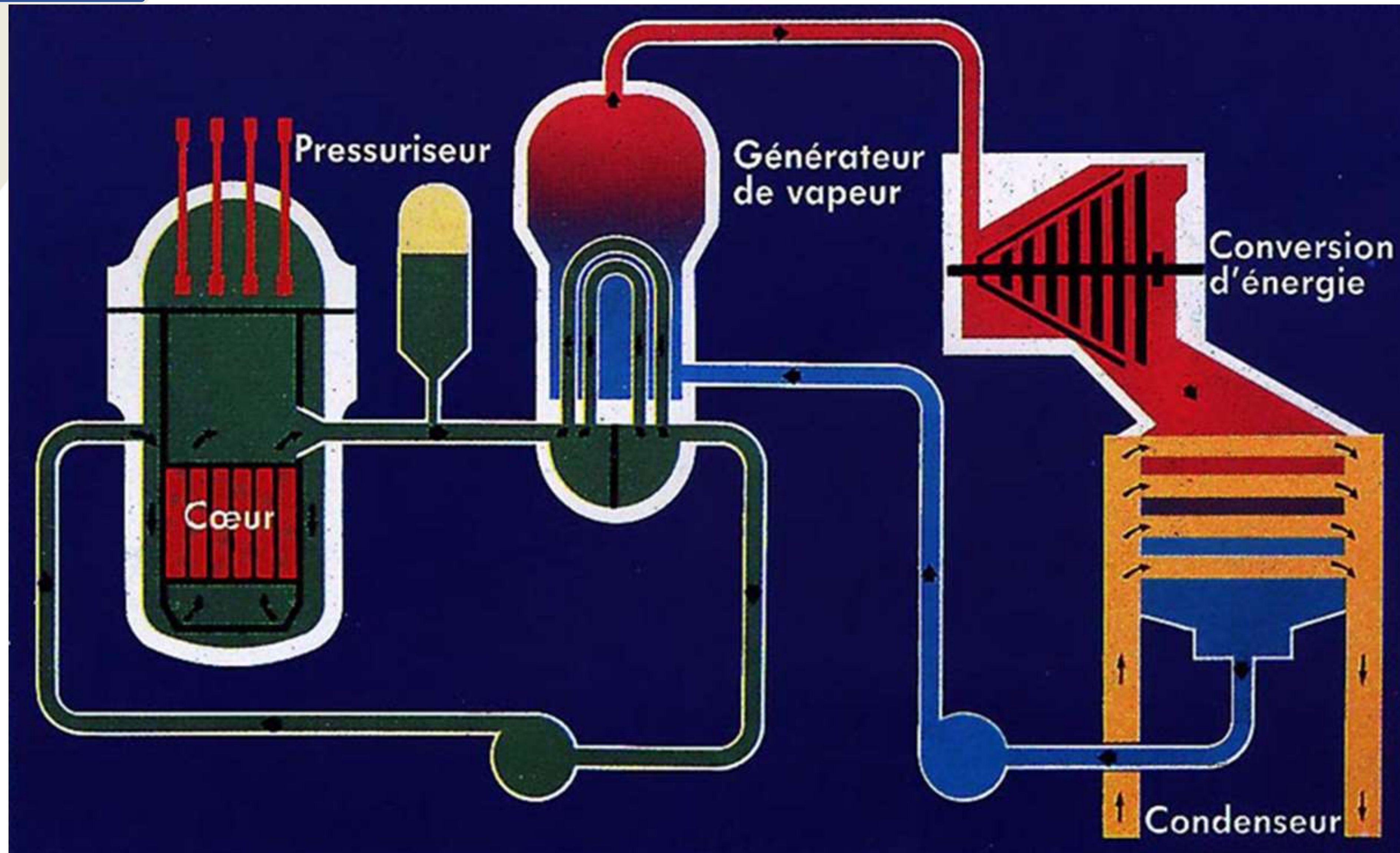
---

- IENA
- 11 septembre 2023

1. Quel besoin en énergie électrique en 2050?
2. Généalogie de la Propulsion Nucléaire française
3. SMR : un réacteur terrestre de propulsion navale ?
4. Quelques facteurs de succès



# Réacteur à boucles classiques



# Réacteur compact

---

Amélioration sûreté/disponibilité – compacité - radioprotection



# D'où viennent les concepts de SMR ?

- Majoritairement des réacteurs de fission nucléaire
- La plupart étudiés et prototypés dès les années 40 et 50
- Ces principaux concepts sont:
  - Le réacteur thermique à eau pressurisée
  - Le réacteur thermique à eau bouillante
  - Le réacteur rapide refroidi au métal liquide
  - Le réacteur thermique ou rapide refroidi au gaz
  - Le réacteur thermique refroidi à l'eau lourde
  - Le réacteur thermique ou rapide à sels fondus





# Le réacteur thermique à eau pressurisée



- Le concept naît dès les années 40
- Sous l'impulsion de A WEINBERG, P ABELSON et H RICKOVER
- 70% du parc mondial de réacteurs civil (refroidi et modéré à l'eau légère, UO<sub>2</sub> faiblement enrichi ou MOx)
- Généralement à boucles plus ou moins « intégré »
- **NUWARD** et hors France: **NUSCALE, ACP100, RITM200, UKSMR, SMART, CAREM ...**

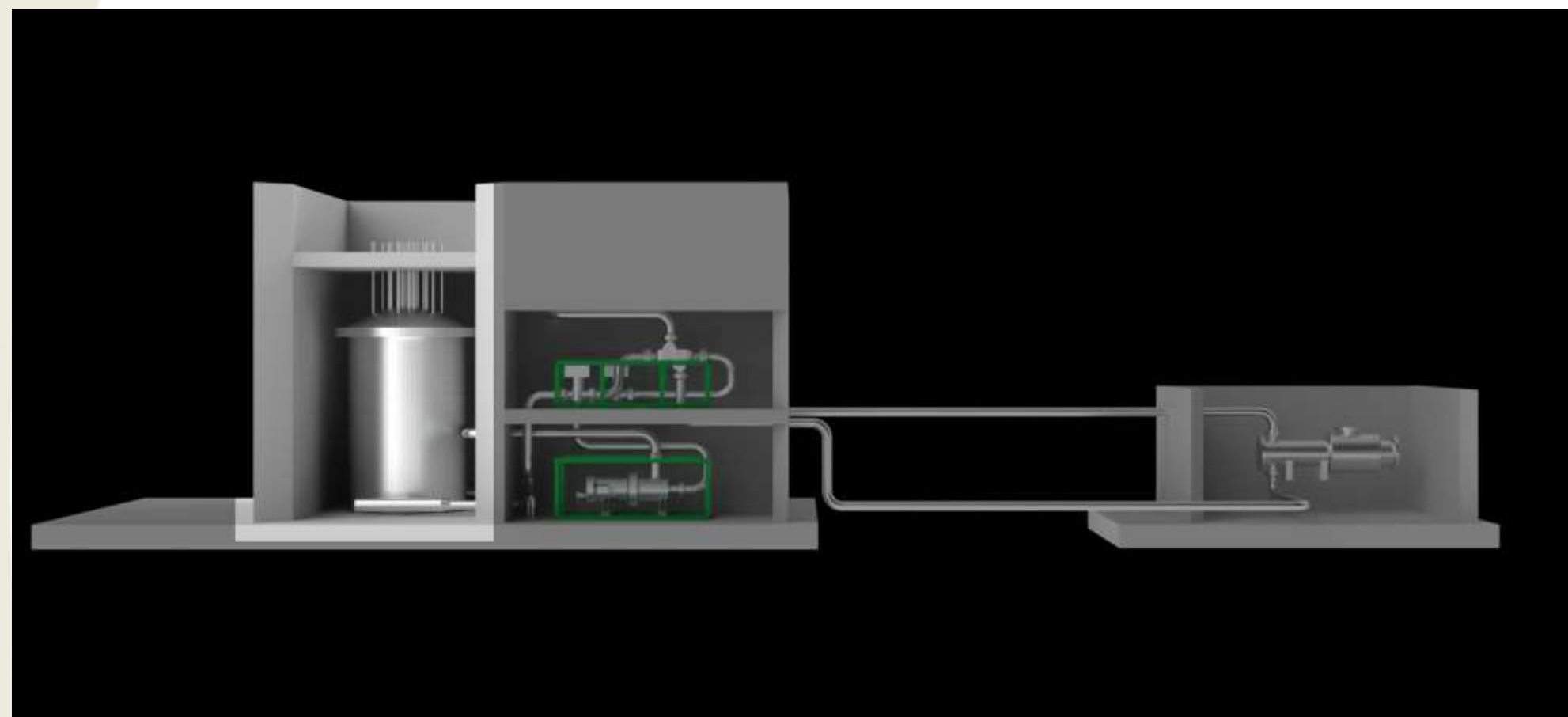
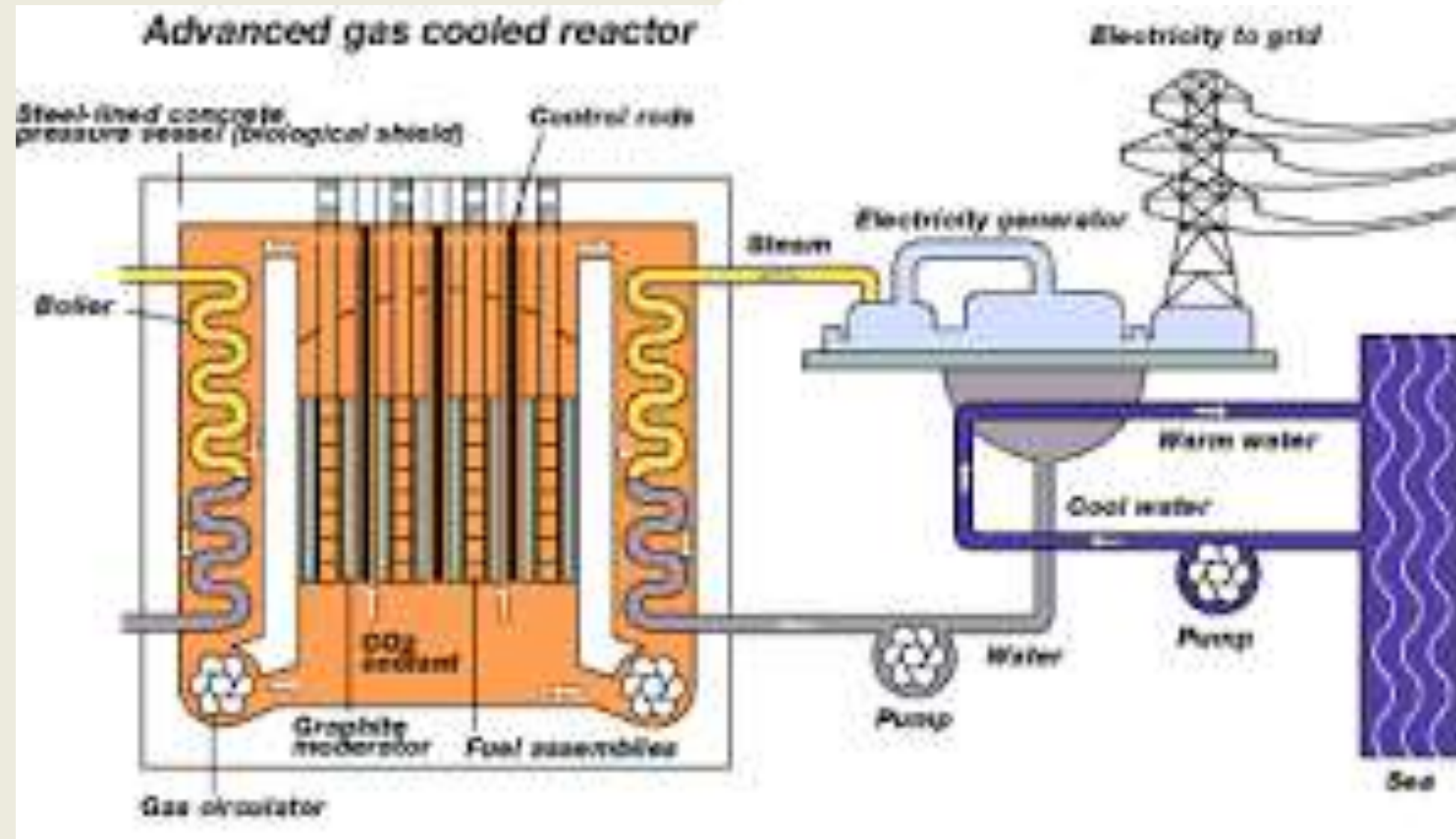


# Le réacteur thermique à eau bouillante

- Le concept naît dans les années 50
- Sous l'impulsion de S UNTERMYER sur la base des expériences BORAX
- Ce concept est à l'origine de 20% du parc mondial de réacteurs civil (modéré et refroidi à l'eau bouillante ou refroidi à l'eau supercritique, UO2 faiblement enrichi)
- **Pas de projet en France, hors France BWRX 300, KARAT 100 ...**



# Le réacteur thermique ou rapide refroidi au gaz

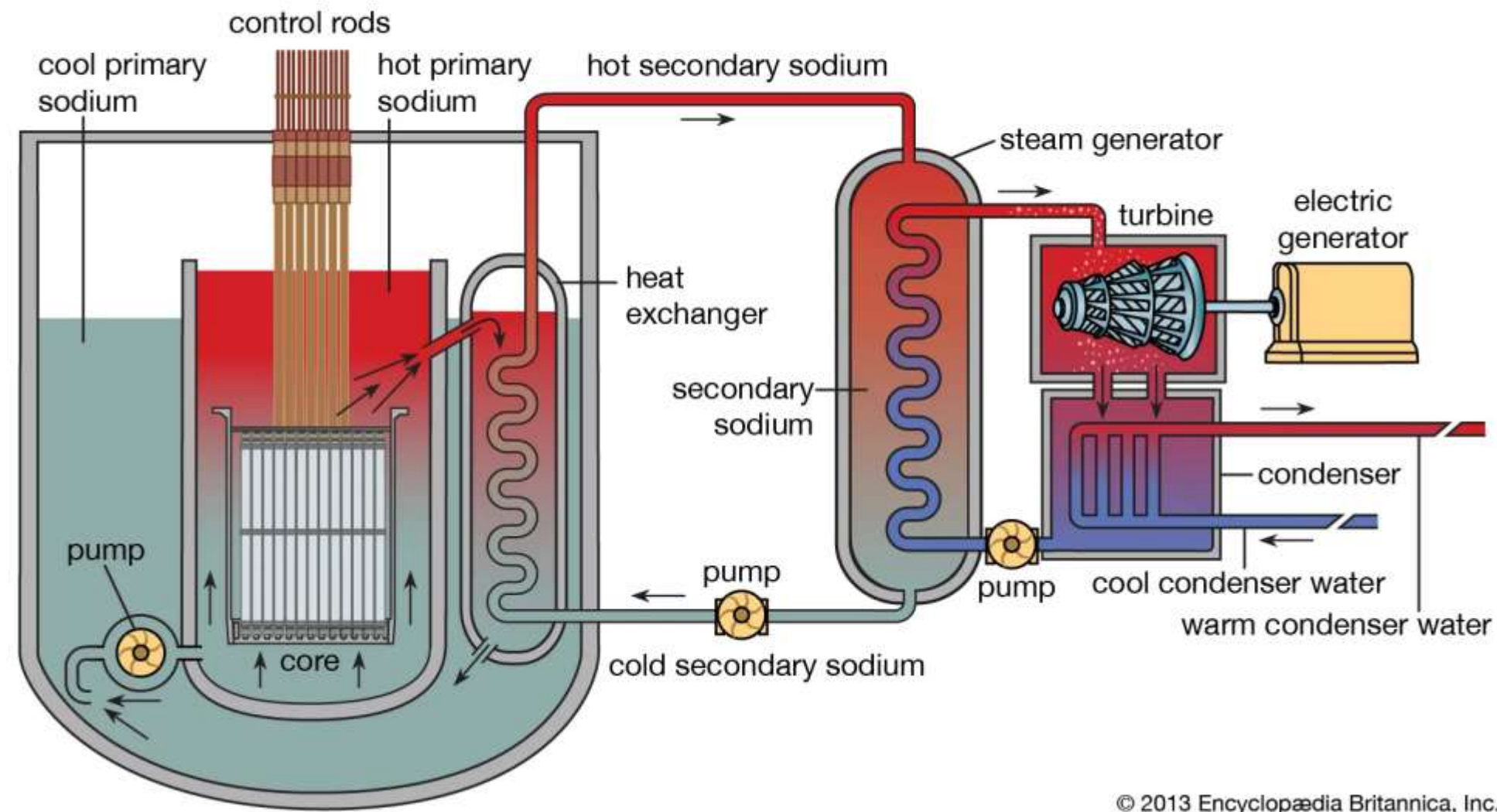


- Le concept nait dans les années 40
- Développé commercialement en France (UNGG) et en Grande Bretagne (MAGNOX) en mode réacteur thermique (Uranium Naturel, refroidi au CO<sub>2</sub>)
- Quelques prototypes en réacteur rapide et/ou à haute température (uranium enrichi, thorium, refroidi à l'hélium)
- Seuls les derniers AGR Anglais et un réacteur d'essai Chinois en fonctionnement
- **JIMMY** et hors France: **GTHTR 300, PBMR 400, ...**

# Le réacteur rapide refroidi au métal liquide



Sodium-cooled liquid-metal reactor

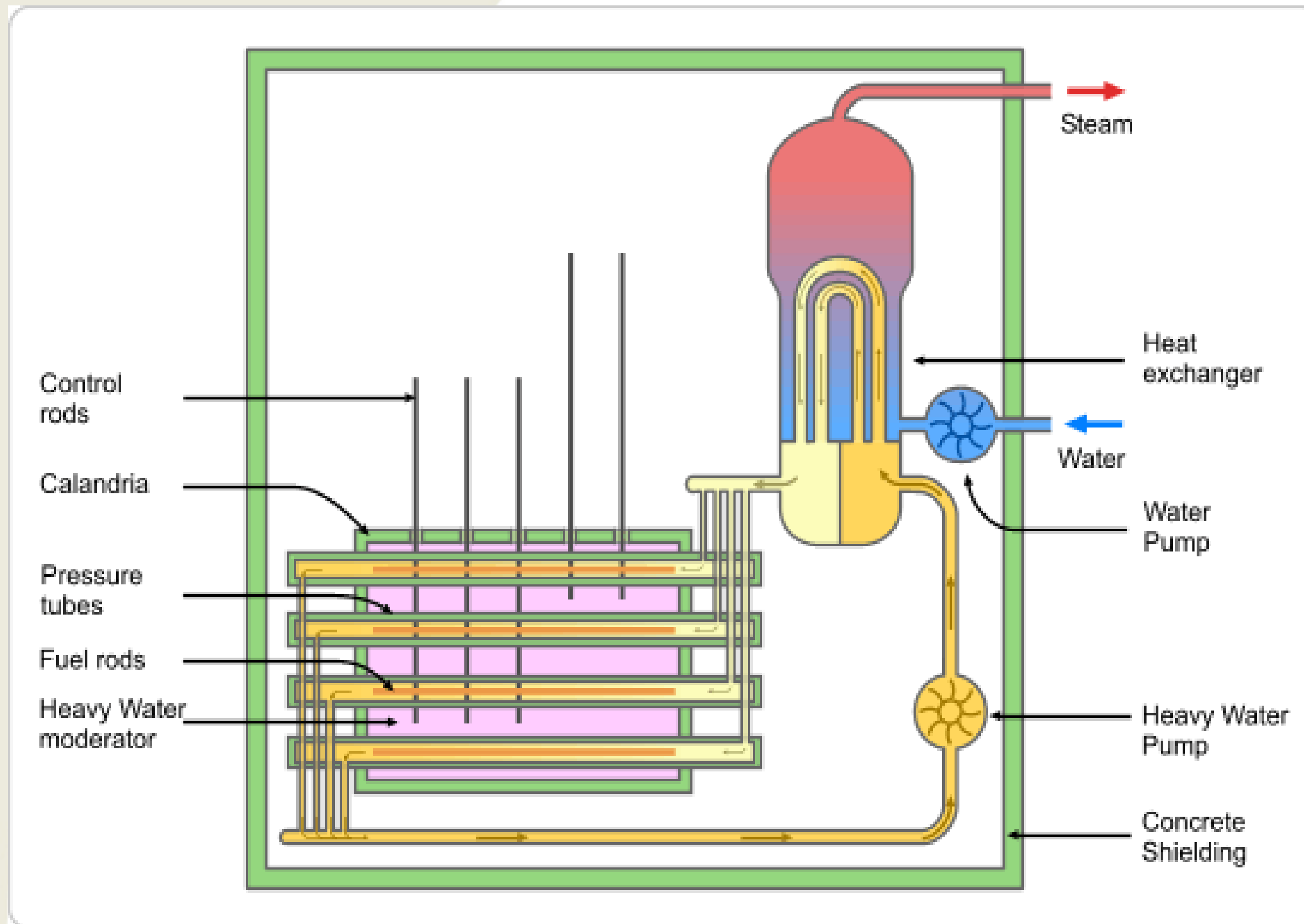


© 2013 Encyclopædia Britannica, Inc.

- Le concept naît dans les années 40
- Sous l'impulsion de W Zinn (et A Leipunsky pour le plomb fondu)
- 3 réacteurs en fonctionnement dans le monde- (refroidi au sodium, UO<sub>2</sub> enrichi ou PUO<sub>2</sub>, MOX ThO<sub>2</sub>)
- En France **HEXANA, NEEXT** et hors France: **BREST OD300, NATRIUM ...**

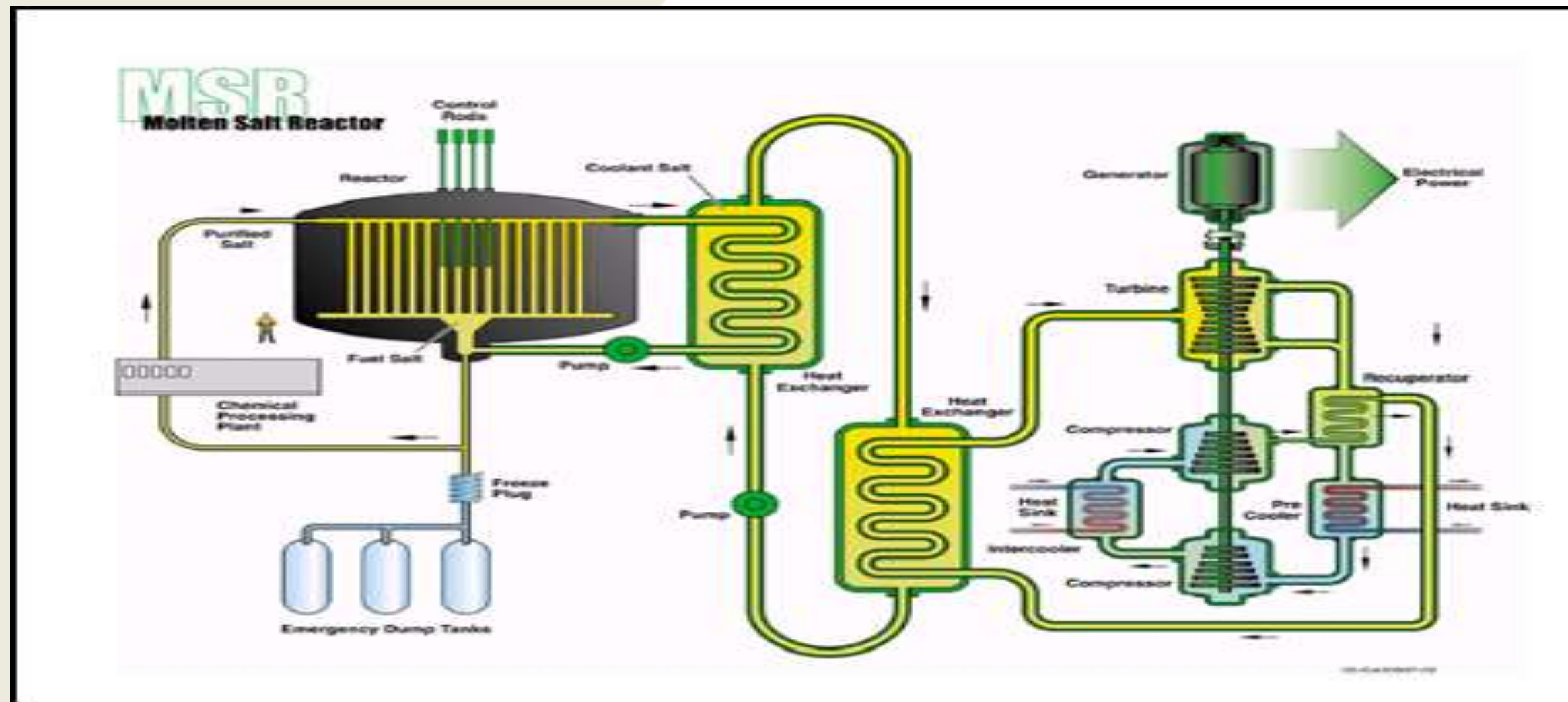
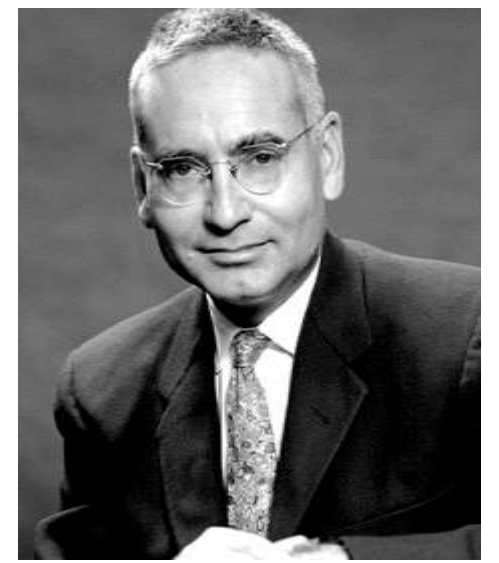


# Le réacteur thermique à eau lourde



- Le concept nait dès les années 40
- Sous l'impulsion de H Halban et L Kowarski
- Ce concept a donné lieu à une véritable filière au CANADA dénommée CANDU (modéré et refroidi à l'eau lourde, UO<sub>2</sub> naturel ou faiblement enrichi)
- **Pas de projet Français, hors France: CANDU SMR**

# Le réacteur thermique ou rapide à sel fondu



*Réacteur à sels fondus*

- Le concept naît dès les années 40
- Sous l'impulsion de A WEINBERG
- Ce concept a donné lieu à 2 prototypes à Oak Ridge l'un pour la défense l'autre pour le civil (refroidi au sel fondu de type chlorures ou fluorures, combustible uranium ou thorium dissous dans le sel, modérateur type graphite ou pas )
- **NAAREA, STELLARIA, et hors France: TMSR LF1, INTEGRAL SMR,**





## • SOMMAIRE

---

- IENA
- 11 septembre 2023

1. Quel besoin en énergie électrique en 2050?
2. Généalogie de la Propulsion Nucléaire française
3. SMR : un réacteur terrestre de propulsion navale ?
4. Quelques facteurs de succès



# Nucléaire Civil : la course vers les fortes puissances

$\text{COUTS } \text{€} / \text{MWh} = \text{Ensemble des Coûts} / \text{Energie Produite}$

## → Les paramètres de coût :

- Coût de construction (75-80% )
- Coût d'exploitation / maintenance (15-20%)
- Coût du combustible : proportionnel à la puissance (5%)

## → Les paramètres techniques clés de l'énergie produite :

- Puissance
- Coefficient de disponibilité : peu différent de la taille
- Durée de fonctionnement : pas différent de la taille





# Nucléaire Civil : la course vers les fortes puissances

COUTS € / MWh = Ensemble des Coûts / Energie Produite

Energie de référence  
(Puissance, disponibilité, durée)

Puissance X 1,5

Energie produite x 1,5

Coût de construction / Coût d'exploitation  
de référence

Coût de construction / Coût  
d'exploitation X 1,2

Coût Unitaire référence

Coût Unitaire référence x 0,8



# Nucléaire Civil : la course vers les fortes puissances

COUTS € / MWh = Ensemble des Coûts / Energie Produite

Energie de référence  
(Puissance, disponibilité, durée)

Puissance / 10

Energie produite / 10

Coût de construction / Coût d'exploitation  
de référence

Coût de construction / Coût  
d'exploitation / 5?

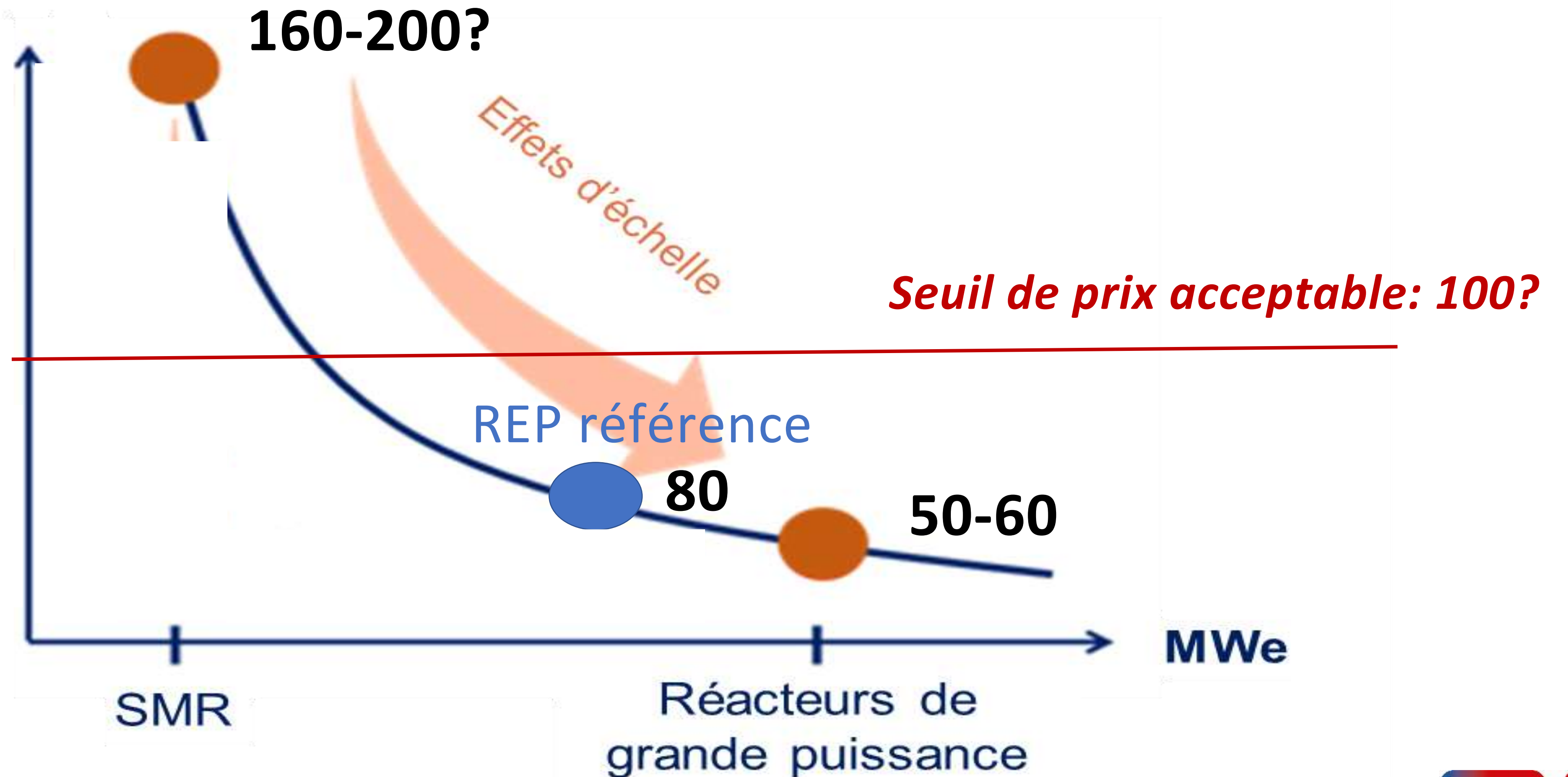
Coût Unitaire référence

Coût Unitaire référence x 2

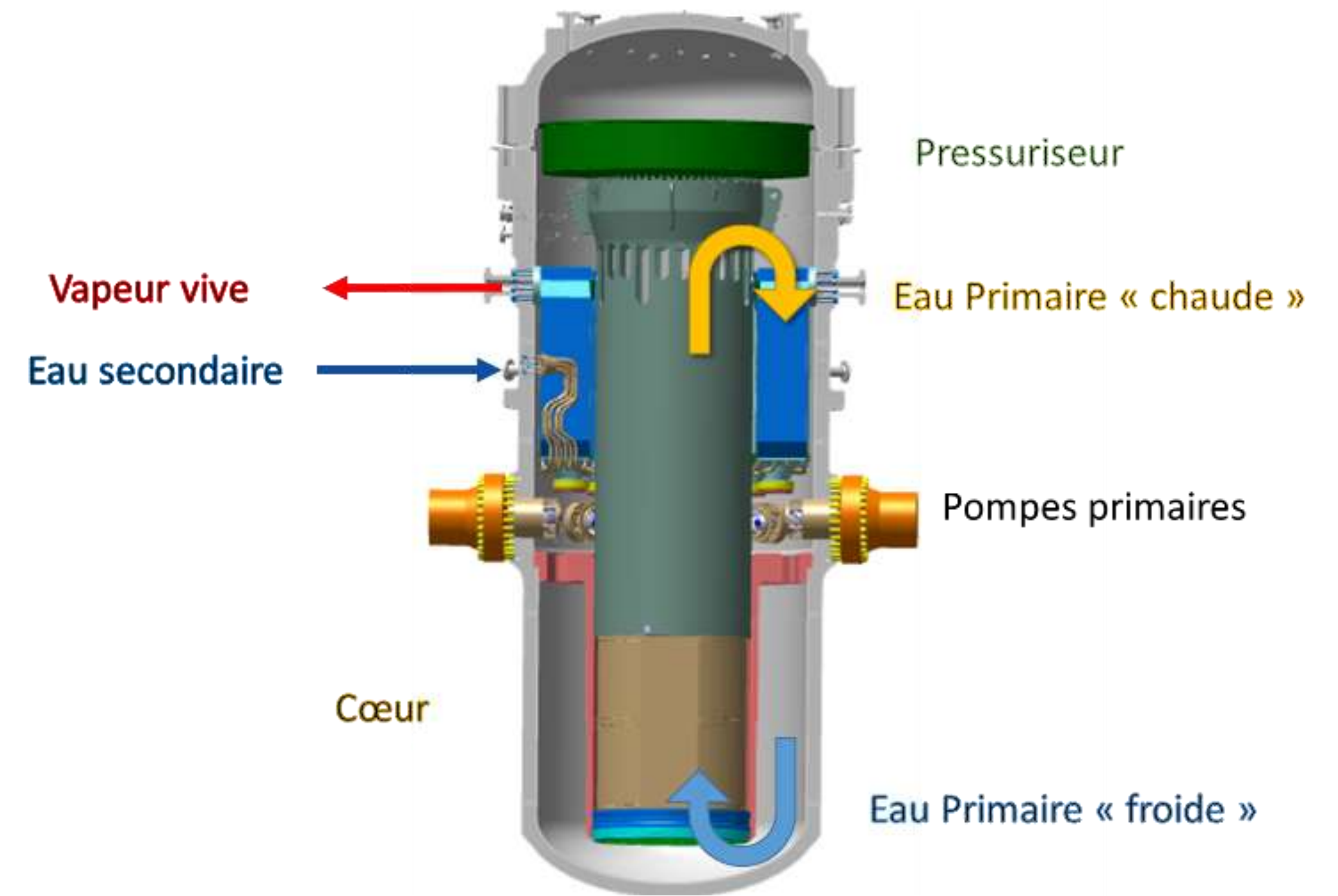
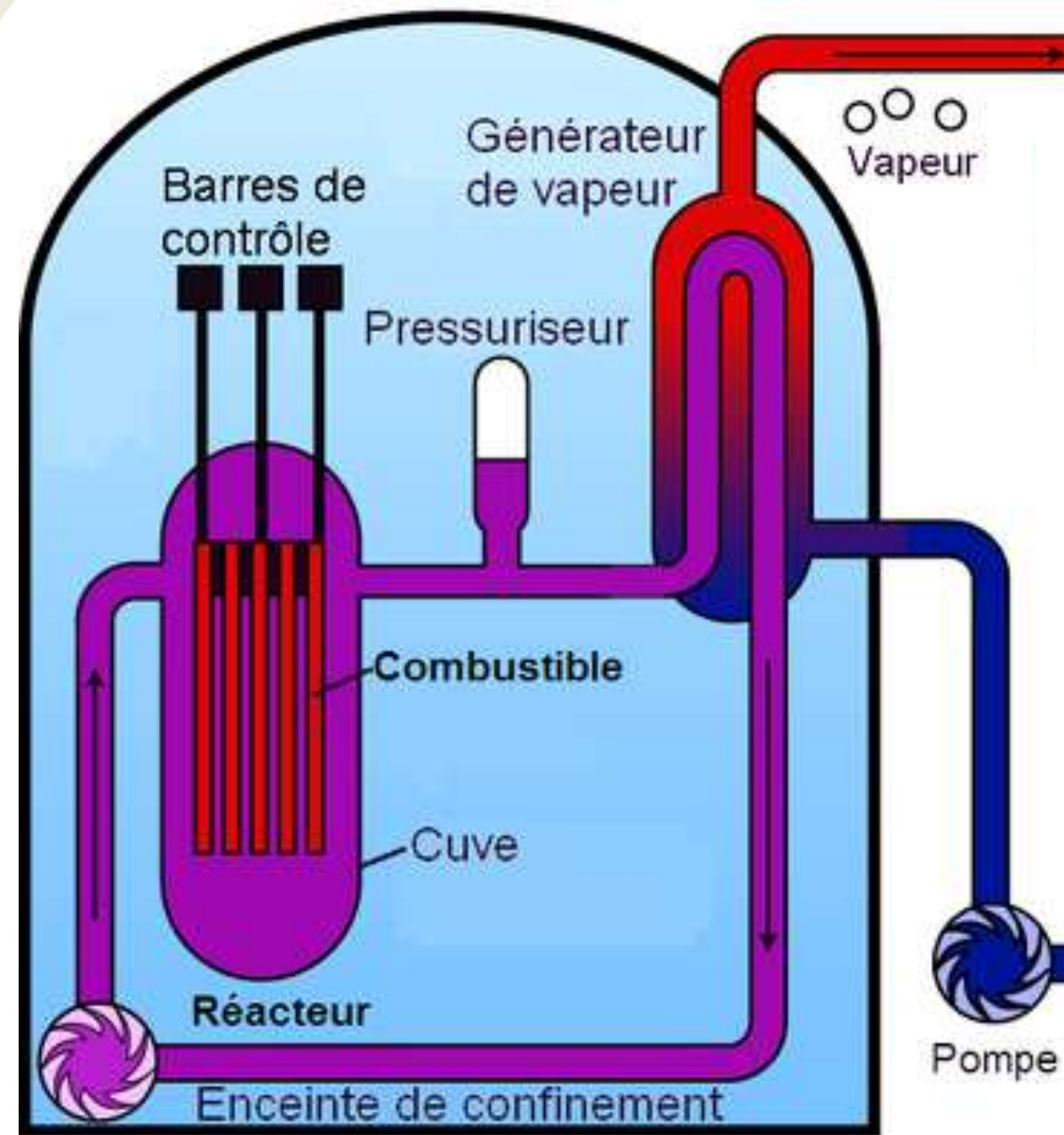


# Les SMR : une stratégie à l'opposé de la course vers les fortes puissances

Coût électricité



# Nuward : Réacteur intégré, filiation classique : simplicité / compacité



# Les SMR : une stratégie à l'opposé de la course vers les fortes puissances

## Coût électricité

Simplicité du  
design



Modularité

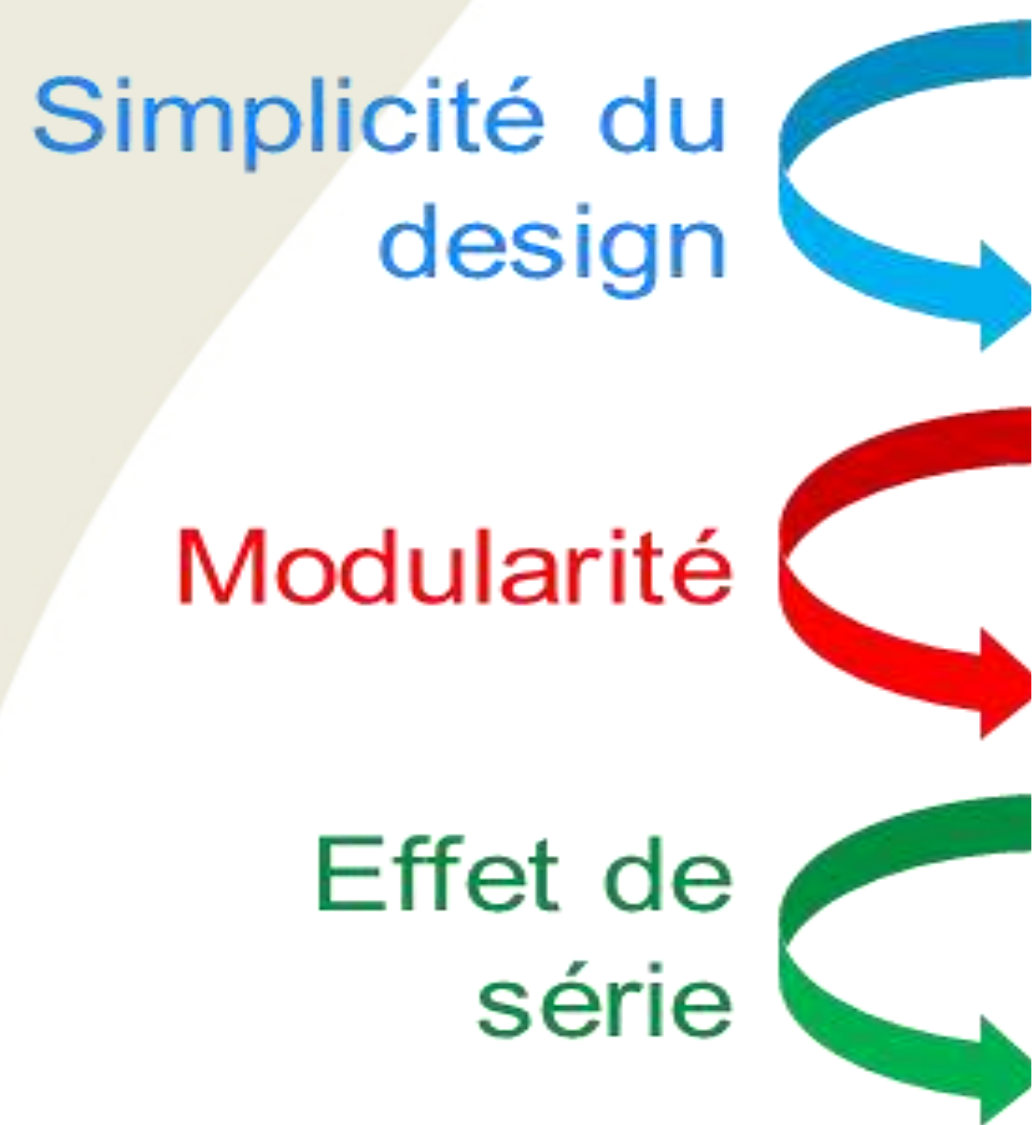


Les enseignements de la Propulsion Nucléaire



# Les SMR : une stratégie à l'opposé de la course vers les fortes puissances

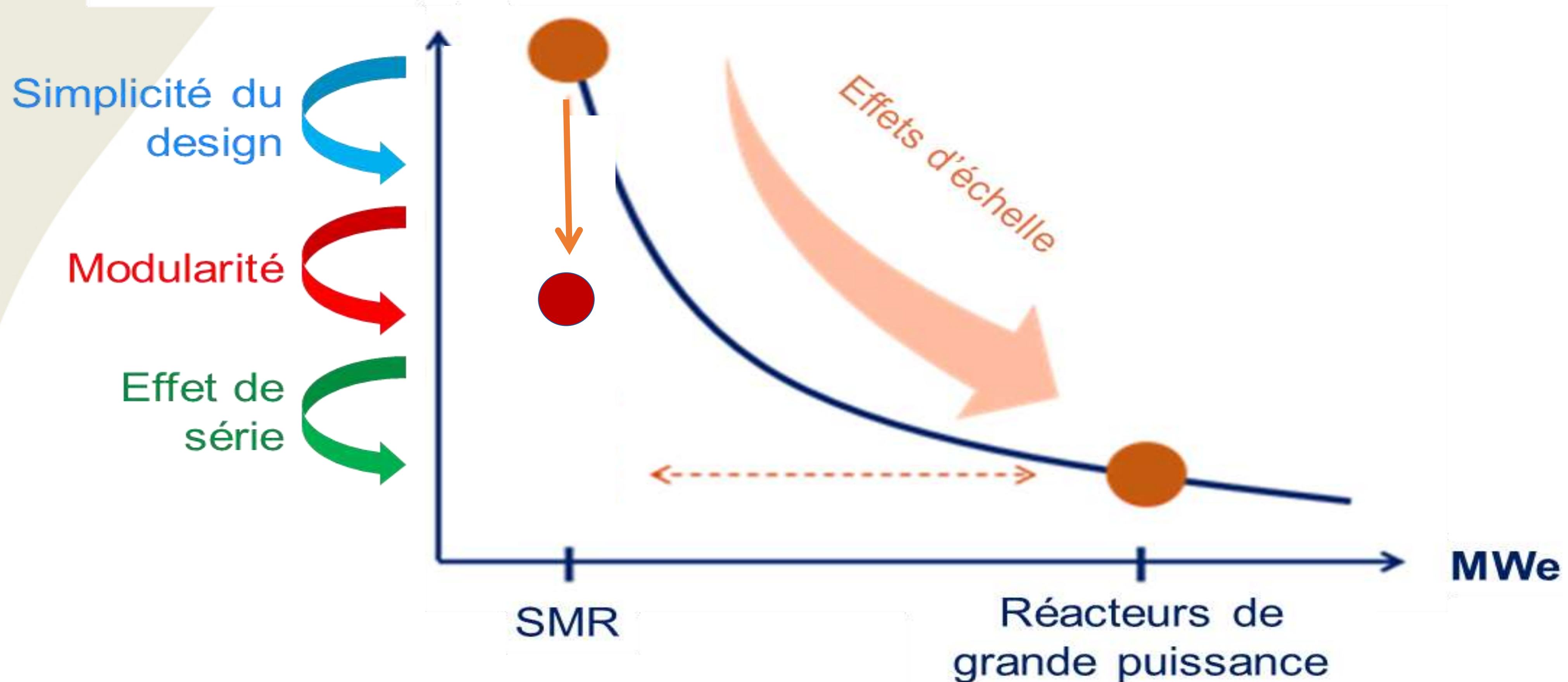
## Coût électricité



Les enseignements de la Propulsion Nucléaire

# Les SMR : une stratégie à l'opposé de la course vers les fortes puissances

## Coût électricité



# Enjeux de rupture des SMR

- ◆ Réussir la phase d'industrialisation des innovations
  - Exemple de Nuward : GV compact, transformer l'essai de la sûreté passive « by design »
- ◆ Gagner le pari du coût du MW installé
  - Une nouvelle relation avec la filière : **produire des composants en série**
  - Profiter de la petite taille des composants, pour monter des ensembles complets en usine / **Conception modulaire et montage en ligne**





# CONCLUSIONS

- **Une consommation d'énergie par habitant stabilisée mondialement, faible croissance du besoin**
- **L'électricité comme énergie finale dominante d'autant plus si on arrive à la stocker**
- **La production d'électricité ou de vapeur par la fission nucléaire : une partie de la solution**
- **Le SMR une équation économique à démontrer**





MERCI POUR VOTRE ATTENTION !

---

