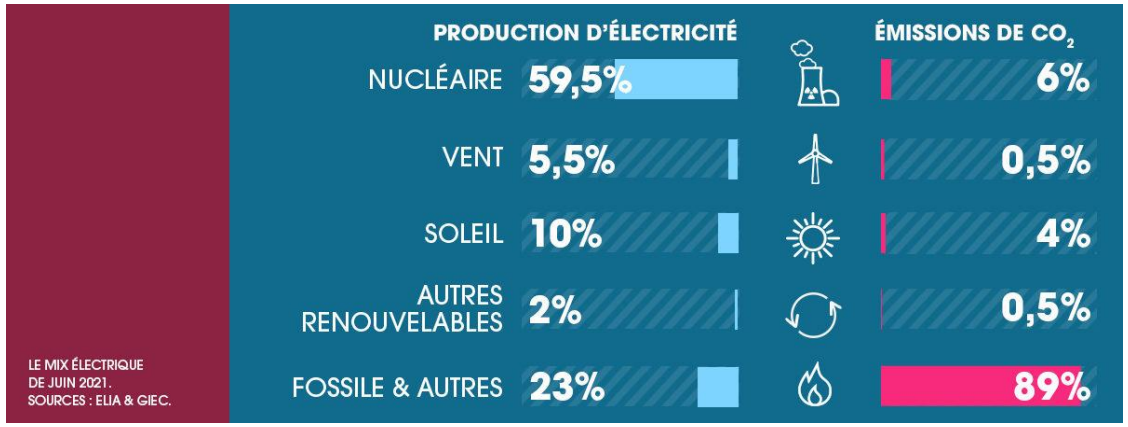
Plaidoyer pour la disponibilité d'électricité après 2025

Transition Energétique
Vers quelles énergies ?

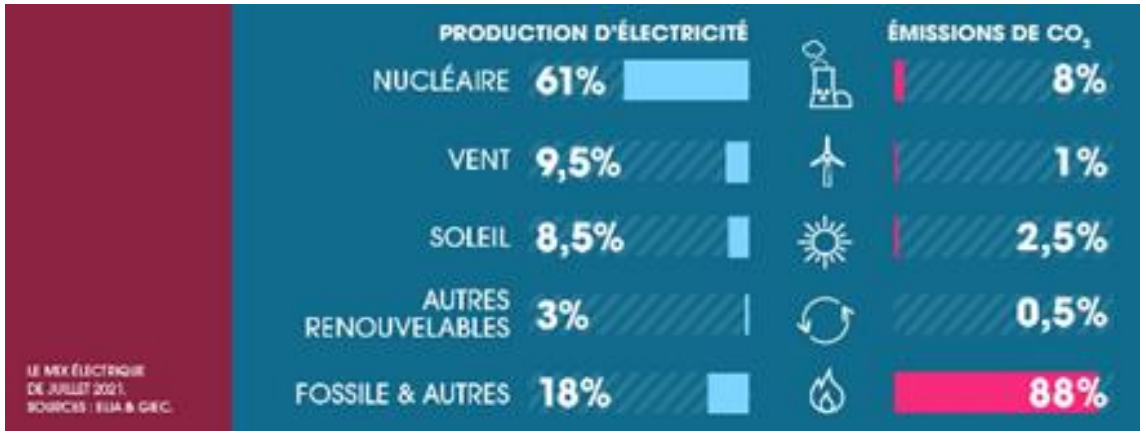
Remarques
à l'attention des collègues de 100 TWh

- Cette présentation a évolué depuis 2016 jusqu'en 2020 mais devrait encore être mise à jours pour certains aspects
- Elle a été utilisée au moins une dizaine de fois à la demande de groupes de citoyens de tous bords et se veut donc très limitée en ce qui concerne les aspects scientifiques et techniques.
- Elle a souvent été accompagnée du document de travail (en annexe) qui devrait également être mis à jour.

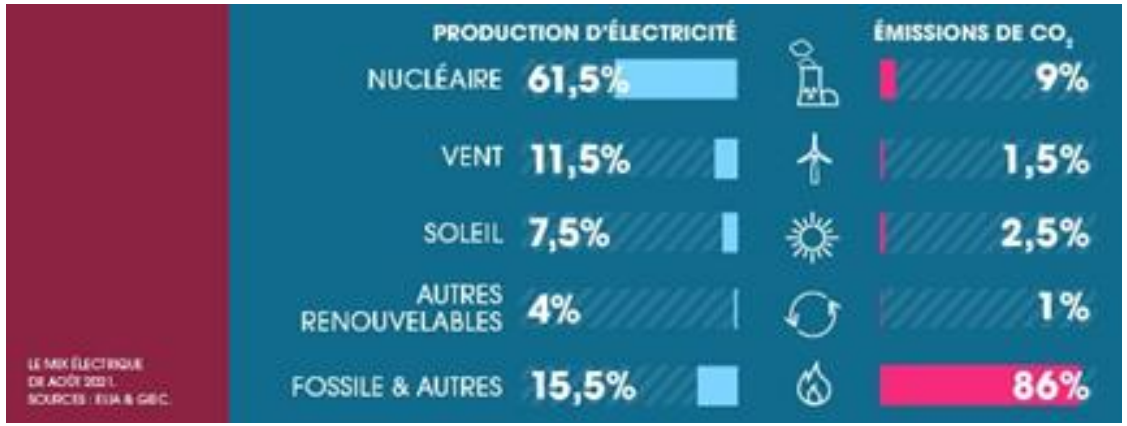
1. Nécessaire disponibilité d’électricité et tendances



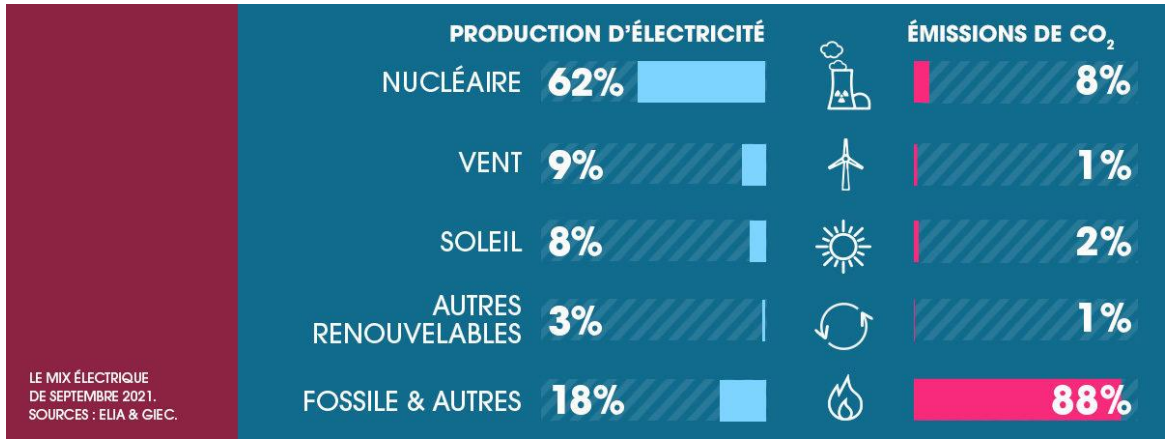
Electric mix of June 2021 (ELIA)



Electric mix of July 2021 (ELIA)



Electric mix of August 2021 (ELIA)



Electric mix of September 2021 (ELIA)

Scénarios futur proche : deux approches

- **Style « Loi Climat »:**

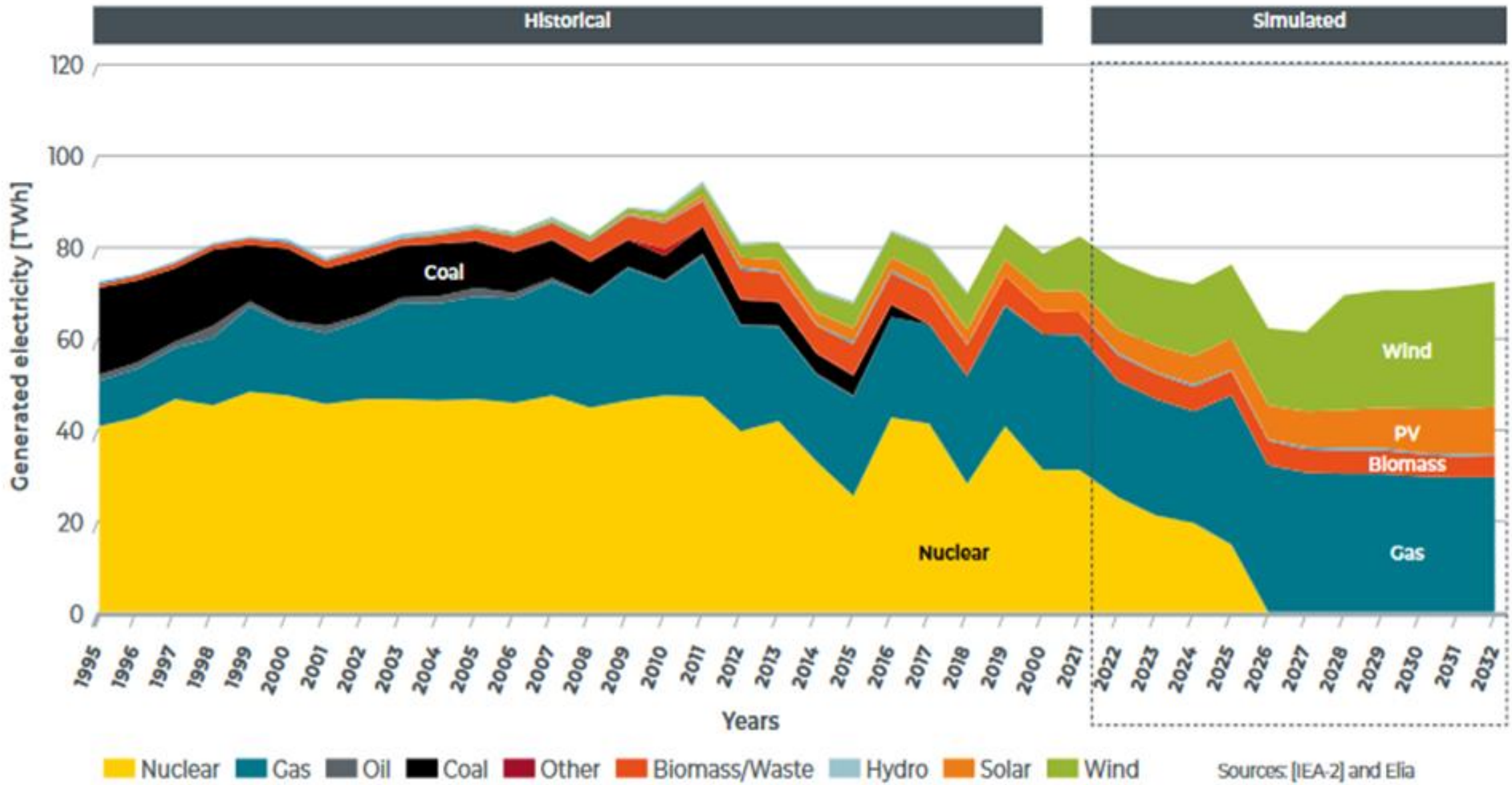
Abandon du nucléaire

- Efficacité énergétique ➔ gain de 32 % ????
- Mix renouvelable : 30 %
- Centrales au gaz
- Importations

- **Style « Forum Nucléaire »:**

- Augmentation de la demande: 70%
- Nucléaire et Renouvelables pour satisfaire la demande croissante.
- Stabilité des prix de l'électricité et sécurité d'approvisionnement

[FIGURE 5-65] — HISTORICAL AND FUTURE ELECTRICITY MIX IN BELGIUM IN THE EFFICIENT GAS SCENARIO



Sources: [IEA-2] and Elia

CONSOMMATION - Scénario 2026 ➔2030 Exemple 1

- Plus de nucléaire 0
- **Augmentation de l'éolien ➔ 20 %**
- Augmentation du solaire ➔ **7** %
- (Augmentation du Stockage – Hydrogène PM)
- Maintien de la biomasse et de l'hydraulique ➔ **3** %
- **Introduction de nouvelles centrales au gaz (TGV) ➔ 40 %**
- **Importation importante ➔ 30 %**
- **Total 100 %**
- **Réduction de la consommation(efficacité – modération ?) (-X %)**

Consommation - Scénario 2026 ➔2030 Exemple 2

- Deux réacteurs nucléaires T3 et D4 ➔ **15** %
- **Augmentation de l'éolien** ➔ **20 %**
- Augmentation du solaire ➔ **7** %
- (Augmentation du Stockage – Hydrogène PM)
- Maintien de la biomasse et de l'hydraulique ➔ **3** %
- **Introduction de nouvelles centrales au gaz (TGV)** ➔ **30 %**
- **Importation importante** ➔ **25 %**
- **Total** **100 %**
- **Réduction de la consommation(efficacité – modération ?)** **(-X %)**

Augmentation de l'émission annuelle de CO2

Production 2019 et émission de CO2

	% de production	kT de CO2
Nucléaire	42 TWh = **47** %	500
Centrales au gaz et autres fossiles	27 TWh = **30** %	13.200
Renouvelable existant	21 TWh = **23** %	1.900
Importation	PM	
Total	90 TWh = **100** %	**15.600**

Production 2030 et émission de CO12

	% de production	KT de CO2
Nucléaire	0	0
Centrales au gaz	45 TWh = 5**0** %	22.000
Renouvelable	27 TWh = 3**0 %**	2.450
Importation (Nuc/ENRi - Lignite)	18 TWh = **20 %**	1.900 – 18.000
Total	90 TWh = **100** %	**26.350 - 42.450**

Consommation d'électricité dans le futur (➔ 2050)

- **Selon l'IEA: Le besoin d'électricité sera énorme** même si l'on optimise les rendements, les isolations, les consommations et leur programmation!
- **Selon les écologistes: il faut réduire la consommation(-32%)** (augmenter l'efficacité énergétique: optimiser, isoler, programmer, …) et se baser sur les sources d'énergies renouvelables (30% en 2030)
- **Selon le Forum Nucléaire, weCARE, … : La combinaison d'énergies nucléaire et renouvelables** est la seule qui permette à long terme l'adéquation en matière de stabilité des prix de l'électricité, de sécurité d'approvisionnement et d'atteinte des objectifs climatiques et de pollution.

Cinq critères à respecter

La mise en œuvre de la stratégie doit répondre à plusieurs critères

(SOUTENABILITE)

1. **La sécurité de l'approvisionnement** énergétique**,**
2. Le maintien d'un **prix abordable** pour les ménages et les entreprises
3. La **sécurité** des installations.
4. Le respect des **accords de Paris** sur le climat (GIEC), (⇩CO2)
5. La **limitation de la pollution** (dans les villes)

Idéal : **C**lean **A**ffordable **R**eliable **E**nergy Mix

Energie Propre Abordable Fiable

https://www.wecareeu.org/

Avantage du nucléaire : la densité d'énergie

Energie électrique pour une vie de consommation

280.000 kWh (80 ans)

1,22 kg	d'Uranium (enrichit 2,5%)
100.000 kg	de Charbon
50.000 kg	de Gaz
70.000 kg	de Pétrole

15 minutes	de Tihange 3
15 jours	d'une éolienne terrestre (2,5 MW)
1 an	de 1.000 m² de PV

2. **Electricité nucléaire**

Mettre en évidence **le pourquoi de la peur du nucléaire** et dénoncer les exagérations

N’y a-t-il pas trop d’alarmisme ?

Réacteurs nucléaires (de puissance) en Belgique

Type PWR (Eau Pressurisée – 320°C – 140 x la pression atmosphérique)

Puissance totale : 6.000 MWe

Différentes causes de « risque »

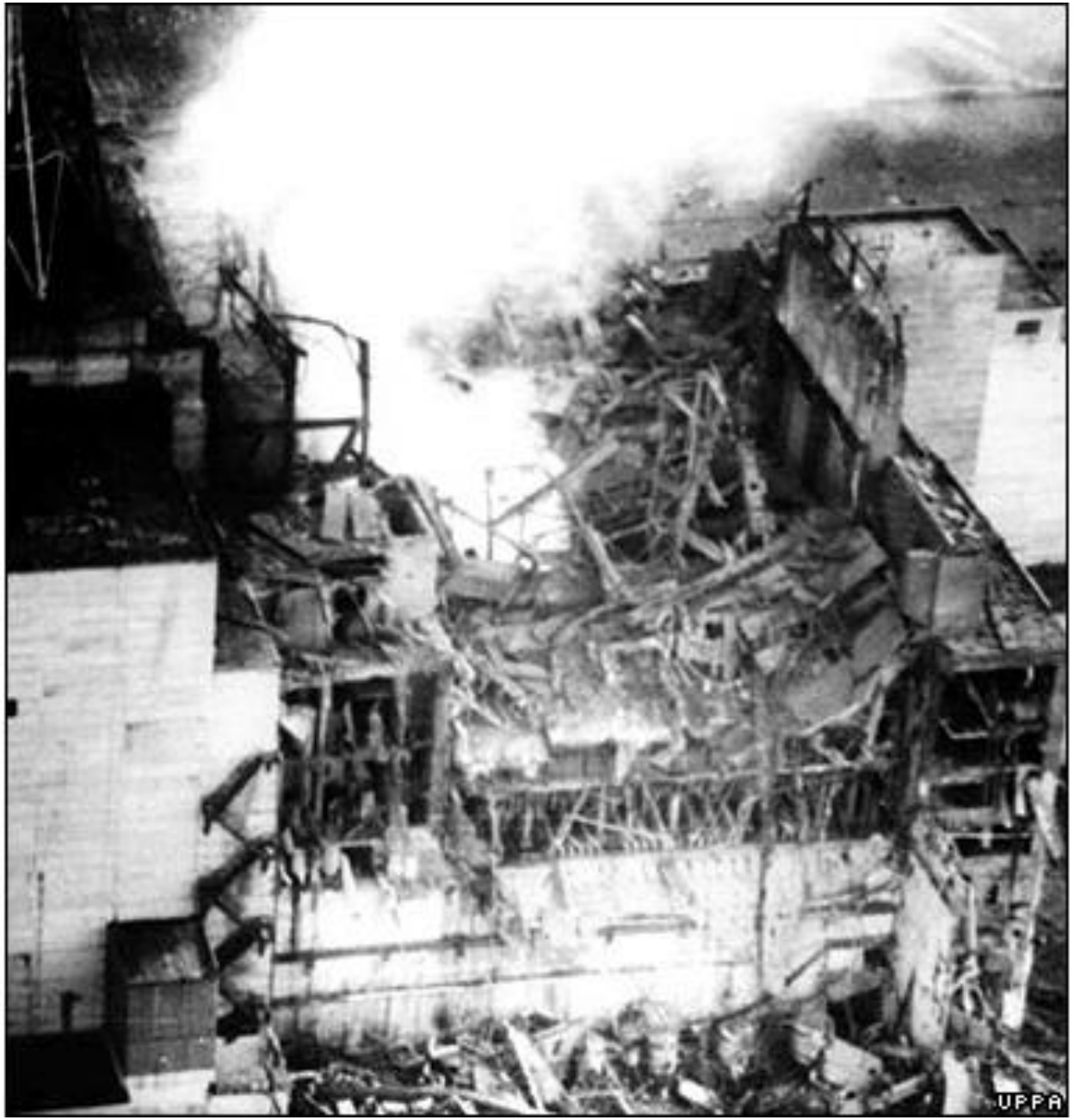
1. **Erreur humaine** Exemple Three Mile Island
2. **Défauts de la structure ou d'équipement** Exemple: fissures de la cuve du réacteur;
3. **Cause extérieure « naturelle »** Exemple: tremblement de terre ; inondation; chute d'un avion; …
4. **Terrorisme / Sabotage**
   - Sabotage des installations (extérieur / intérieur) . « Insider Threat »
   - Missile
   - Sabotage des outils informatiques. « Insider Threat »

➔ Peur d'un nuage radioactif

+ Gestion des déchets radioactifs

Risques de défaillance structurelle du PWR

1. **Erreur humaine involontaire ou manque de précaution ou même « volontaire »**
2. Défauts de la structure ou d'équipement
3. Cause extérieure « naturelle »
4. Terrorisme /Sabotage


UPPA

Exemples d'erreurs humaines

Radioactivité dans l'environnement:

- Chernobyl – essais à bas régime (RBMK – mod. Graphite)
- Three Mile Island - vapeur dans les pompes

Radiation limitée vers l'extérieur

Accidents dans des usines de fabrication du combustible : masse critique assemblée involontairement

Sans conséquence extérieure

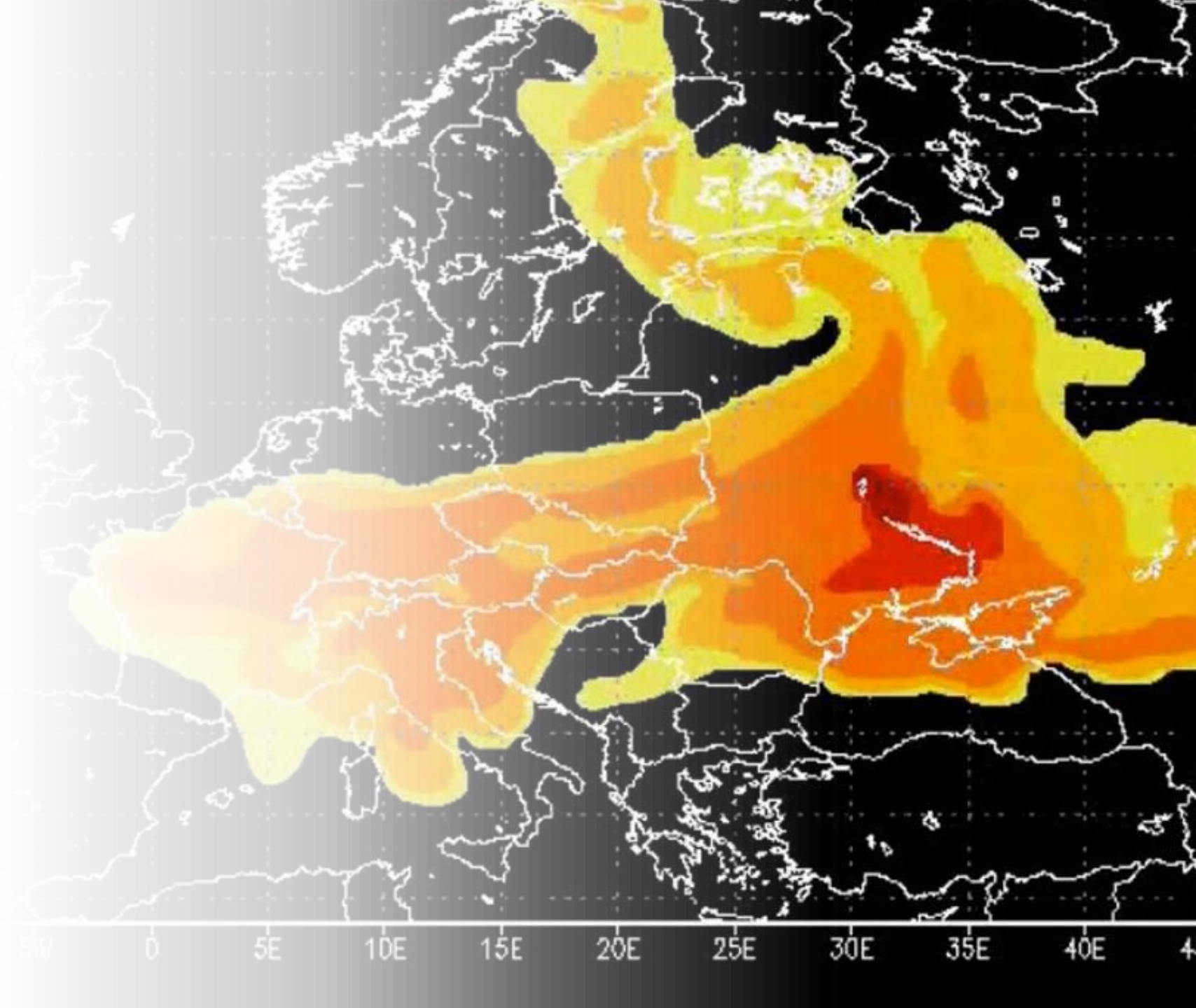
Liste des évènements: voir

AFCN
agence fédérale de contrôle nucléaire

➔ Crainte du nuage radioactif

Pour cause de:

- **Erreur humaine**
- **Défauts de la structure ou d'équipement**
- **Cause extérieure « naturelle »**
- **Terrorisme / Sabotage**



Risques de défaillance structurelle du PWR

1. Erreur humaine involontaire ou manque de précaution

2. **Défauts de la structure ou d'équipement**

3. Cause extérieure « naturelle »

4. Terrorisme

L’affaire des « fissures »

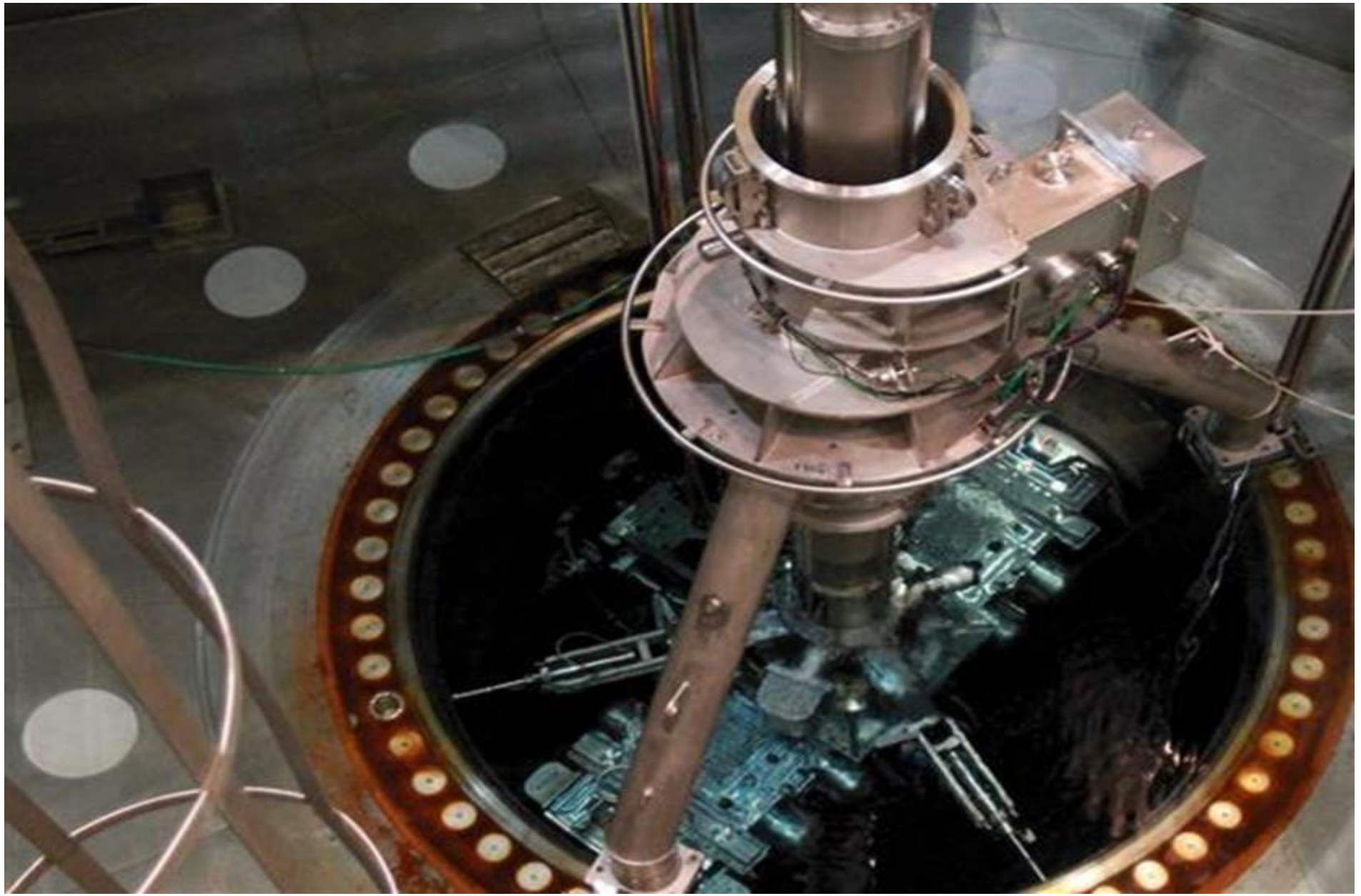
A DOEL,

En juillet 2012, sur la cuve du **réacteur nº3**, à l'occasion d’un contrôle par ultrasons de toute la zone fortement irradiée de cette cuve : nombreuses indications.

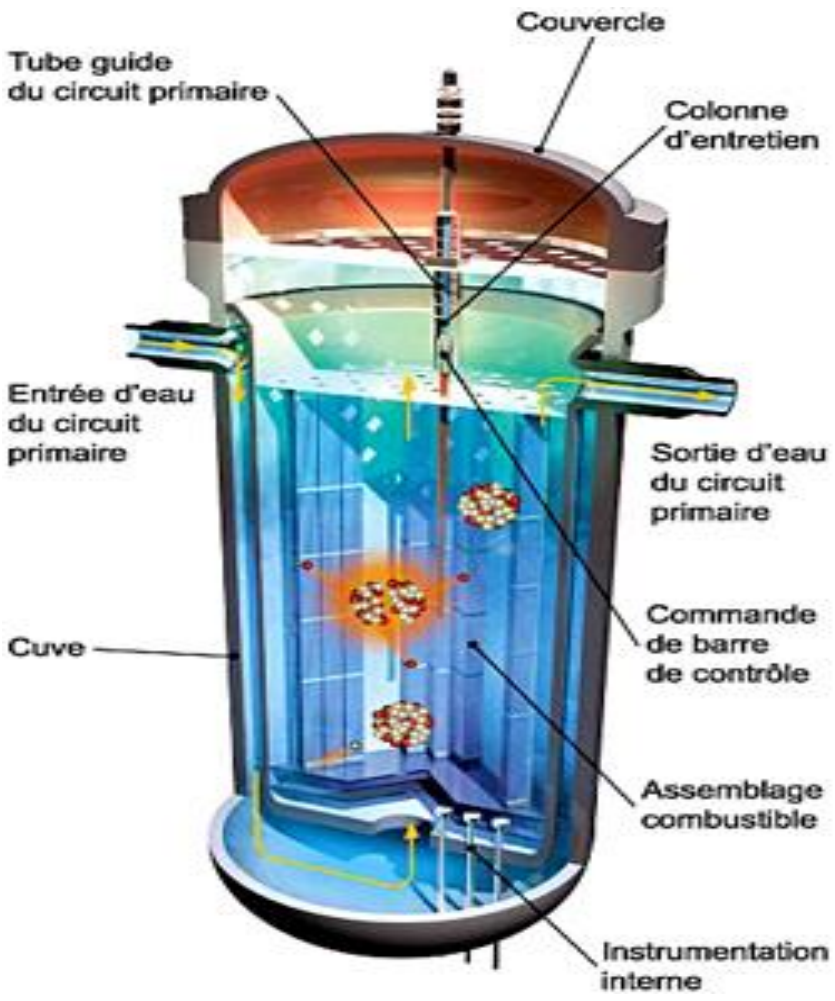
A TIHANGE,

- En septembre 2012, des indications sont découvertes sur la cuve du **réacteur n°2** de la centrale. On a parlé de microfissures
- En mars 2014, ce réacteur est mis à l'arrêt.
- En février 2015, de nouvelles analyses révèlent encore plus d’indications

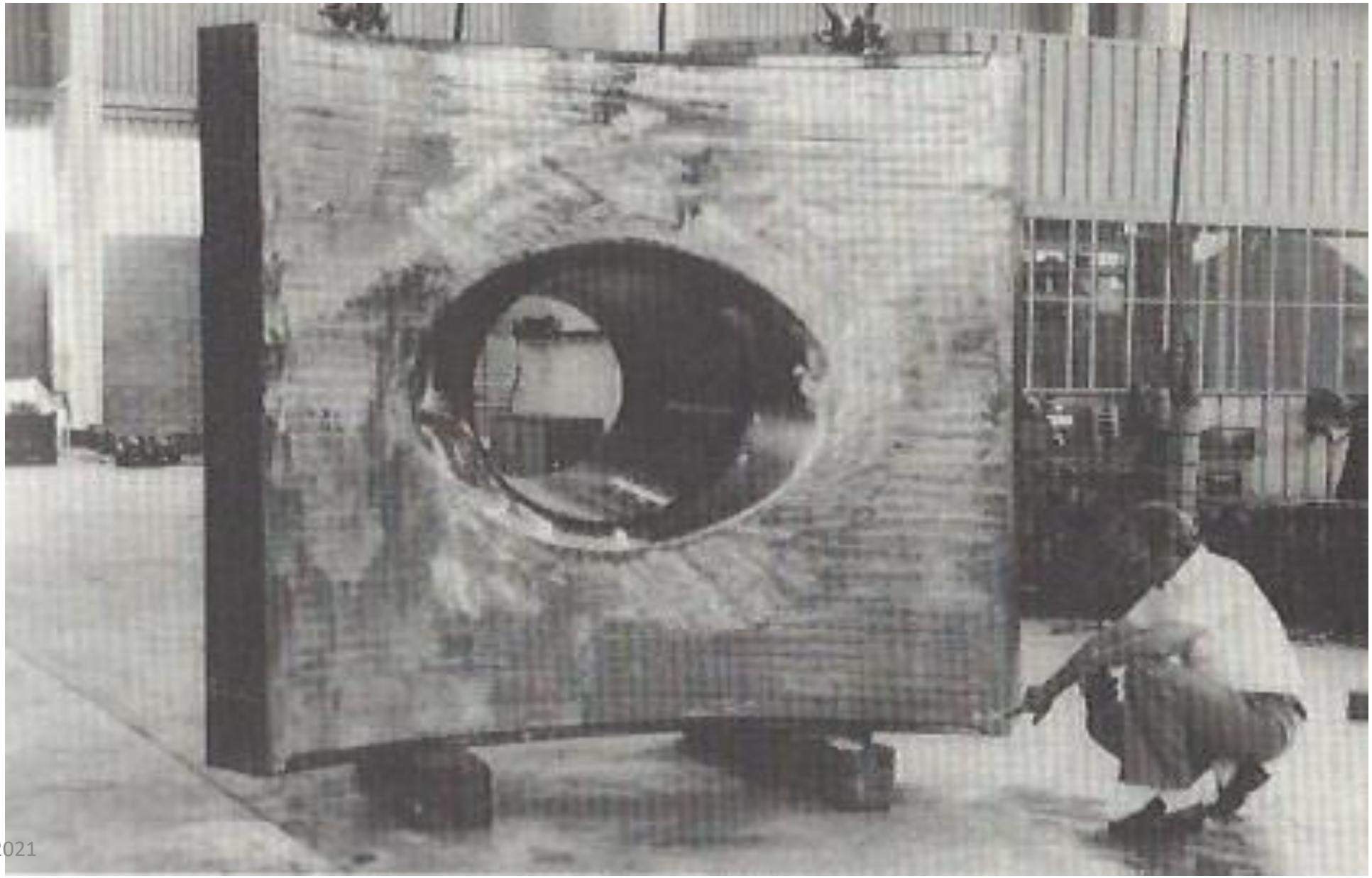
Centrale nucléaire à cœur ouvert!

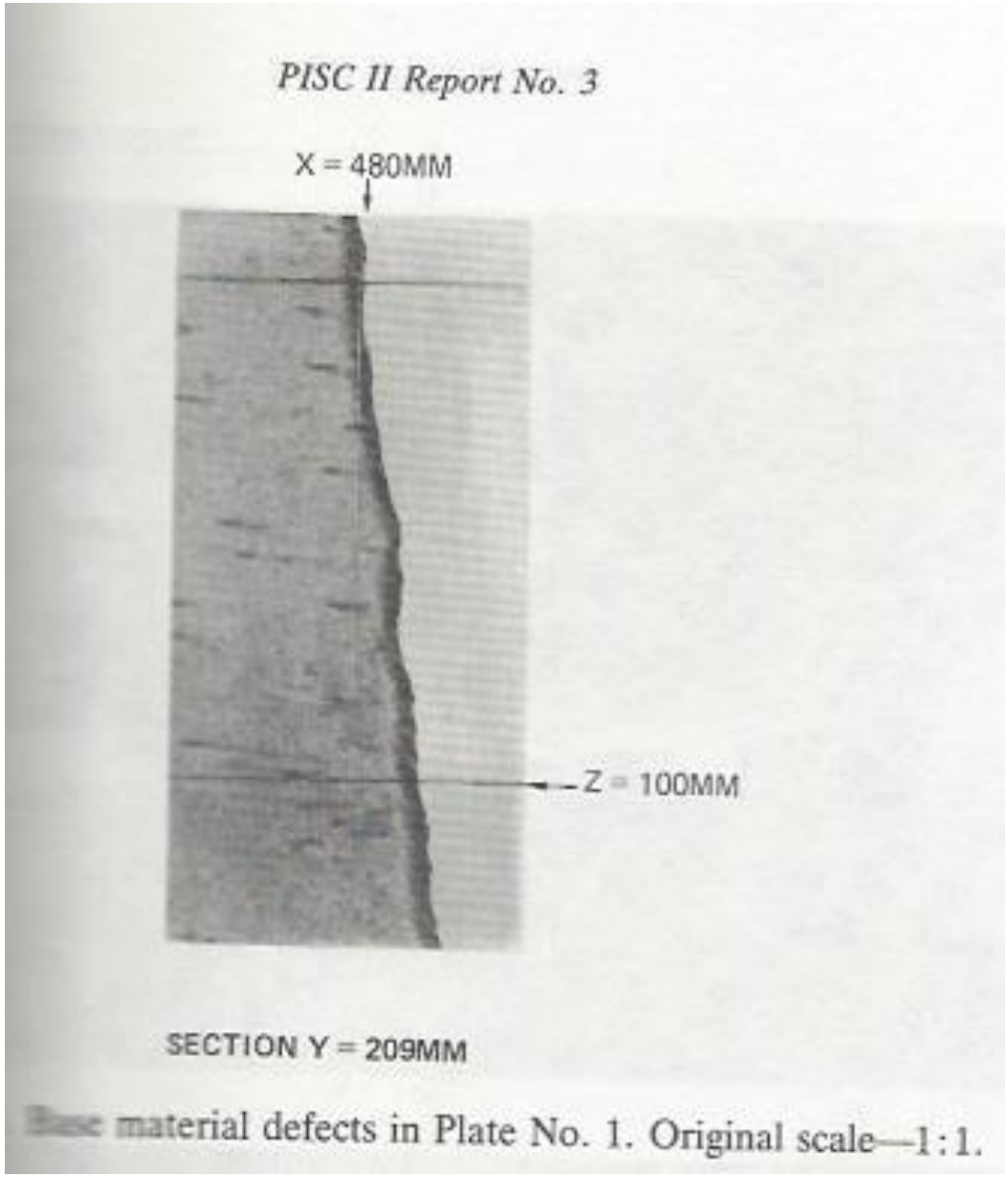


Elément essentiel de la structure du circuit primaire: la cuve



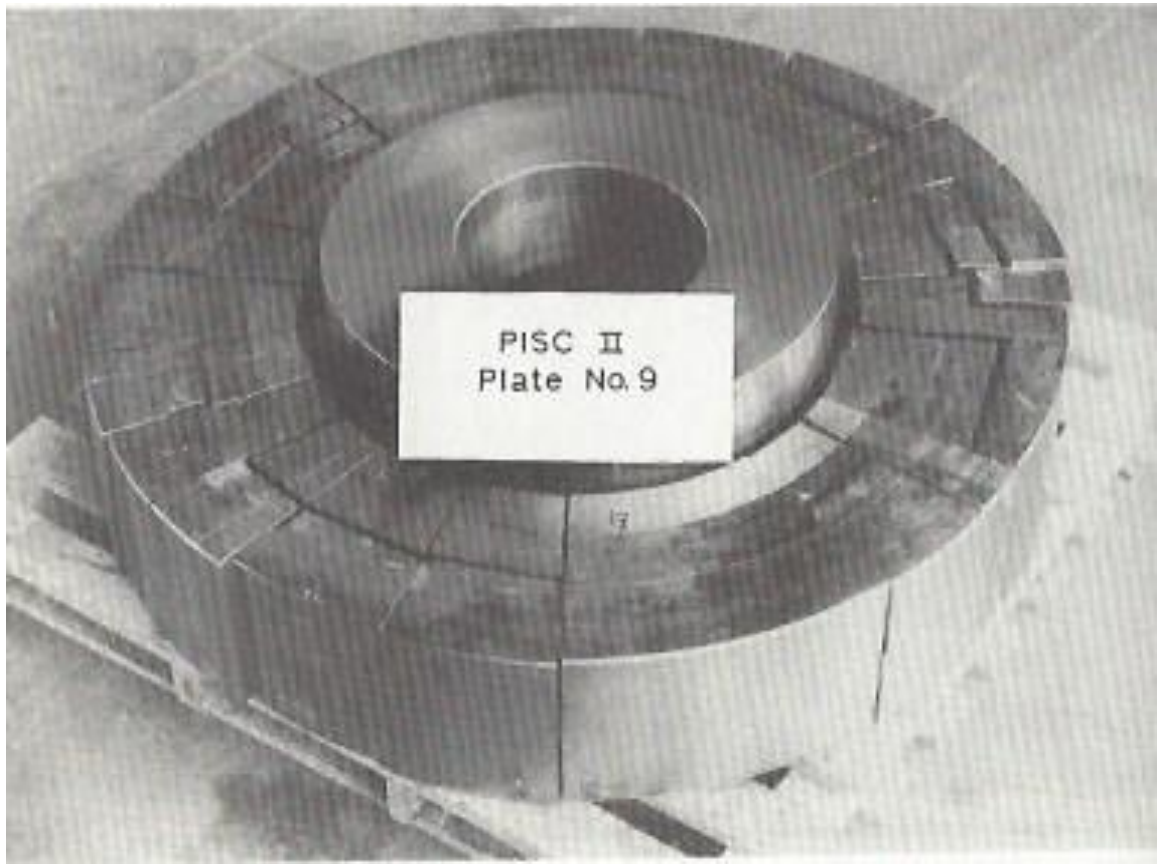
PISC III OECD-CE(EURATOM) CCR Ispra 1982





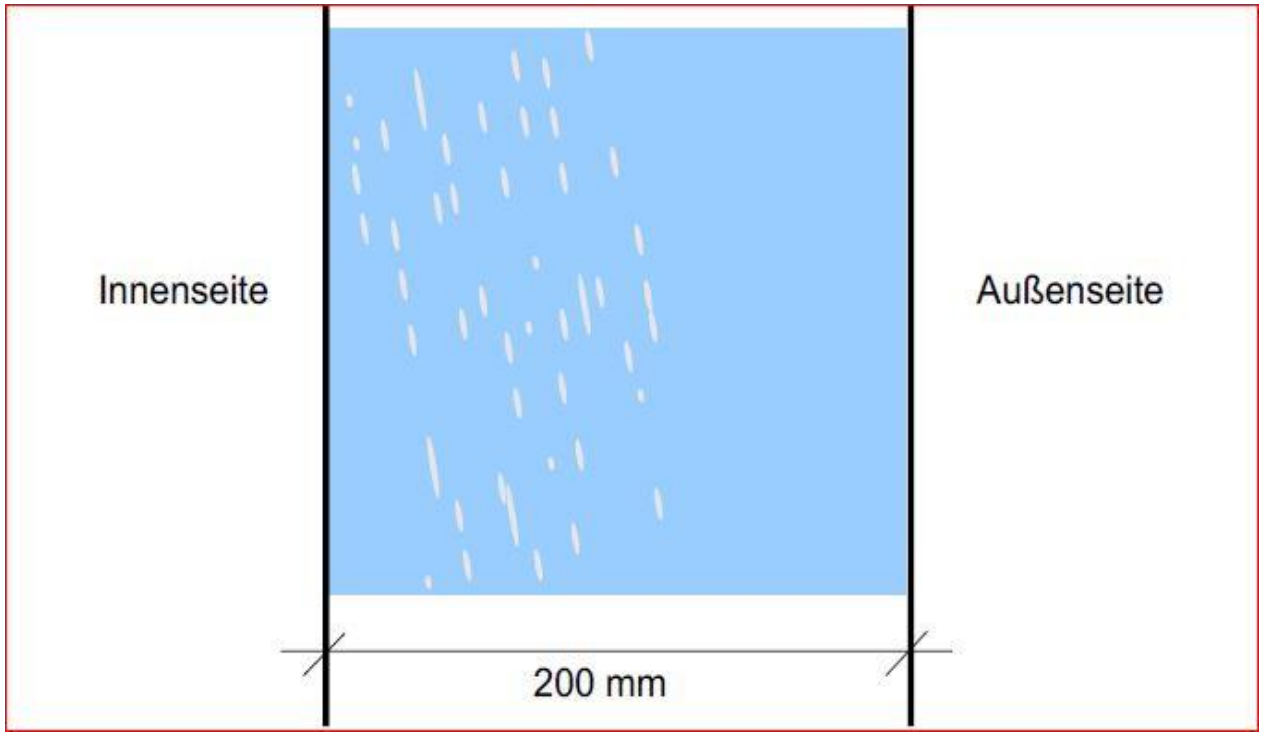
material defects in Plate No. 1. Original scale—1:1.

Examen métallographique après analyse destructive destructive



Examen par ultrasons focalisés

Face interne

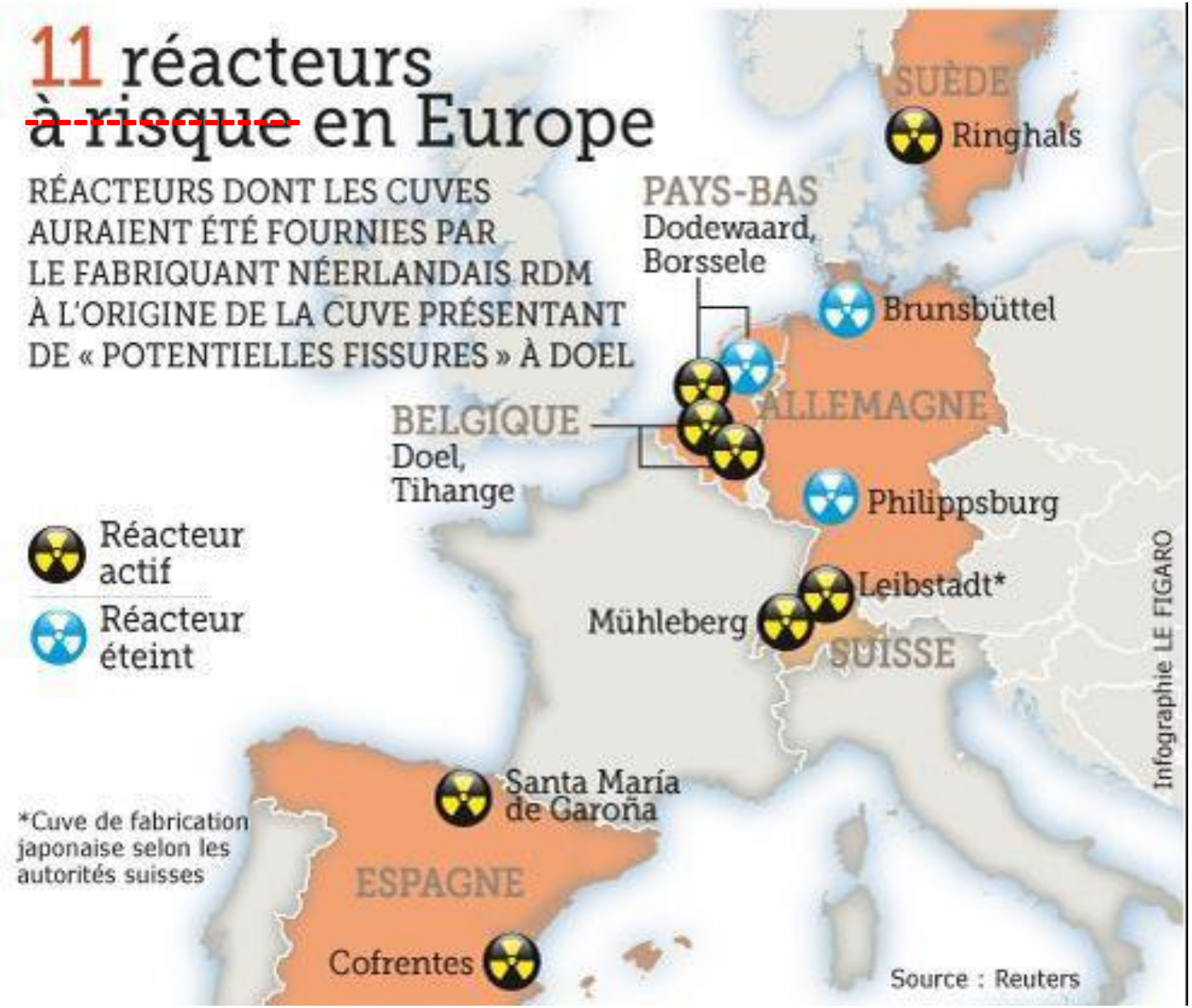


Face externe

2012 - 2013 IPPNW-Gruppe Aachen, Dr. med. W. Duisberg

1977
JRC Ispra

Programme
PISC (OECD-CE)


11 réacteurs à risque en Europe
RÉACTEURS DONT LES CUVES AURAIENT ÉTÉ FOURNIES PAR LE FABRIQUANT NÉERLANDAIS RDM À L'ORIGINE DE LA CUVE PRÉSENTANT DE « POTENTIELLES FISSURES » À DOEL
SUÈDE
Ringhals
PAYS-BAS
Dodewaard, Borssele
Brunsbüttel
ALLEMAGNE
BELGIQUE
Doel, Tihange
Philippsburg
Leibstadt*
Mühleberg
SUISSE
Réacteur actif
Réacteur éteint
Santa María de Garoña
ESPAGNE
Cofrentes
*Cuve de fabrication japonaise selon les autorités suisses
Infographie LE FIGARO
Source : Reuters

Prolongation de la durée de vie

L'important
est le maintien
de la ductilité de l'acier de la cuve
Critère LBB

Question à Electrabel:
À vous entendre,
garder les réacteurs
allumés au-delà de 2025
est donc faisable?

Philippe Van Troeye, le CEO d'Electrabel

Réponse:
Bien sûr que c'est faisable, d'autres l'ont prouvé.
Notamment les États-Unis qui sont passés <u>à 60 ans et à 80 ans</u> de durée de vie des centrales!
Techniquement il y a des réponses.

Risques de défaillance structurelle du PWR

1. Erreur humaine involontaire

2. Défauts de la structure ou d'équipement

3. Cause extérieure « naturelle » ou accidentelle

4. Terrorisme

Accident de **Fukushima Daiichi** le 11 mars 2011

Les réacteurs n’ont pas été affectés par le tremblement de terre mais bien par le tsunami (vague de 14 m)

Tsunami - Barrage de Vauglans (Savoie – France)

Rivière: l'Ain affluent du Rhône
Barrage à 75 km du site du Bugey
Autres sites nucléaires en aval (Cruas, Tricastin, …)
Barrage de 130m de haut 430 m de long
605 millions de m³ d'eau
Fissures sous contrôle dans la structure (EDF)

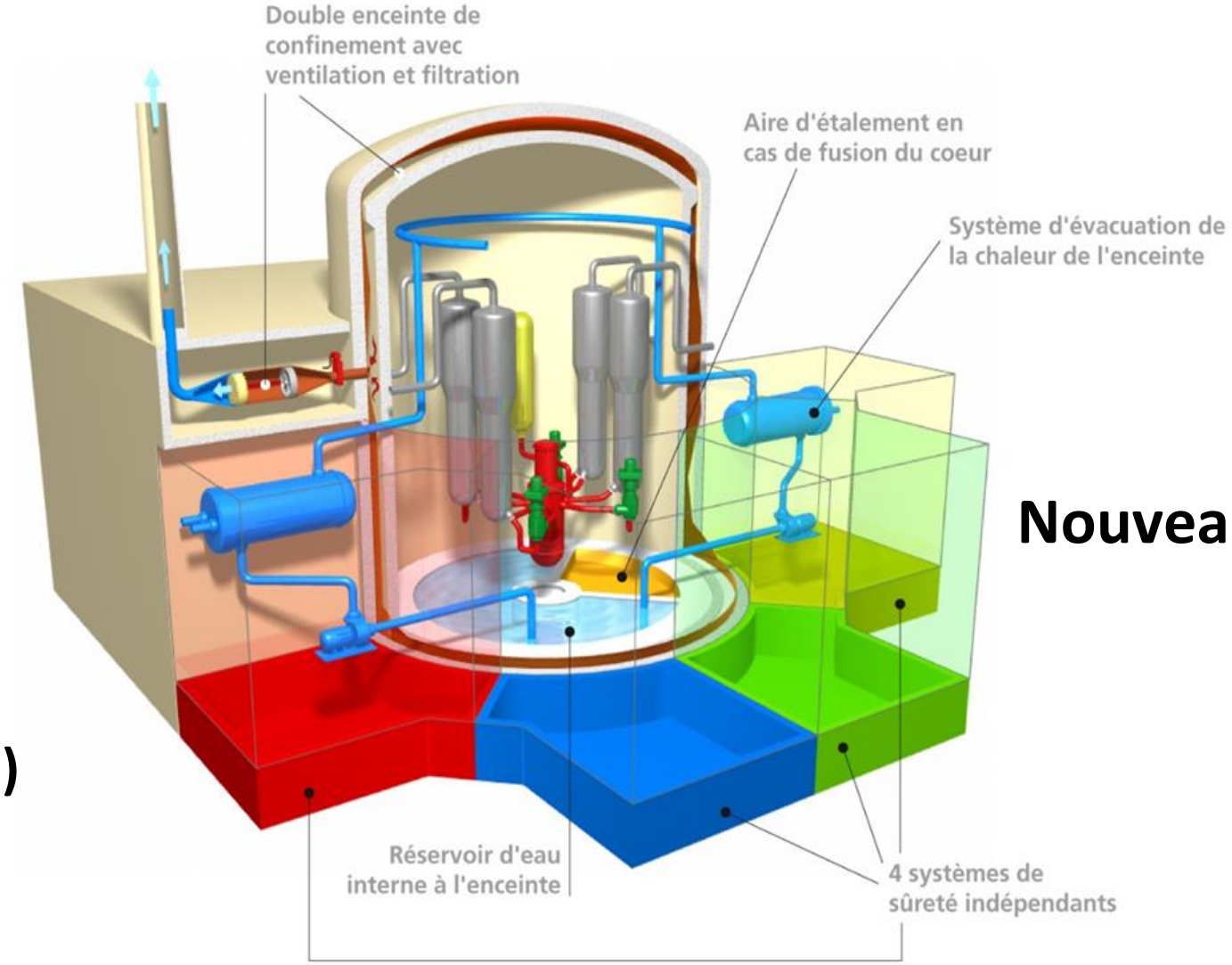
La rupture totale (séisme) entraînerait une vague de 10m de haut au Bugey

Tricastin

Bugey

Chute accidentelle d’un avion sur le site

Double dôme des réacteurs (PWR – EPR)



Nouveaux réacteurs EPR

(Doel 3 & 4)

(Tihange 1, 2 & 3)

On peut imaginer n'importe quoi ! Mais !

Une habitante de Wanze (Huy) a vu une météorite passer au-dessus de la centrale nucléaire de Tihange. Un événement confirmé sur écran radar par l'IRM (22.03.2017)

Tcheliabinsk, en Russie en 2013
1.500 blessés

18 décembre 2018, 11h48 **Mer de Bering**, explosion dix fois Hiroshima (NASA)

Risques de défaillance structurelle du PWR

1. Erreur humaine involontaire

2. Défauts de la structure ou d'équipement

3. Cause extérieure « naturelle » (ou pas)

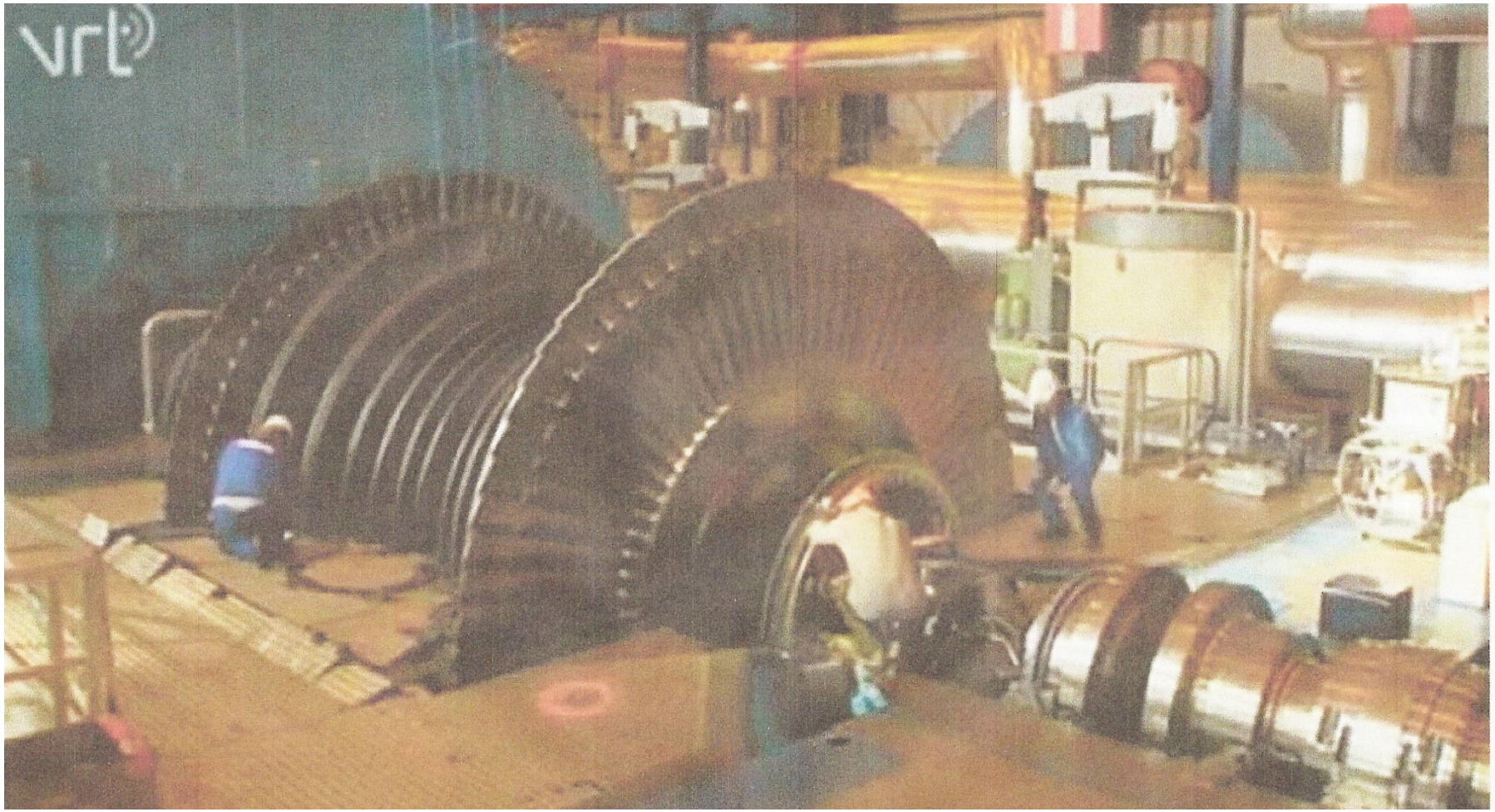
4. Terrorisme / Sabotage

Actions de démonstration de Greenpeace

Intrusions et démonstration de la possibilité d'effectuer des actes de sabotage

Action Greenpeace

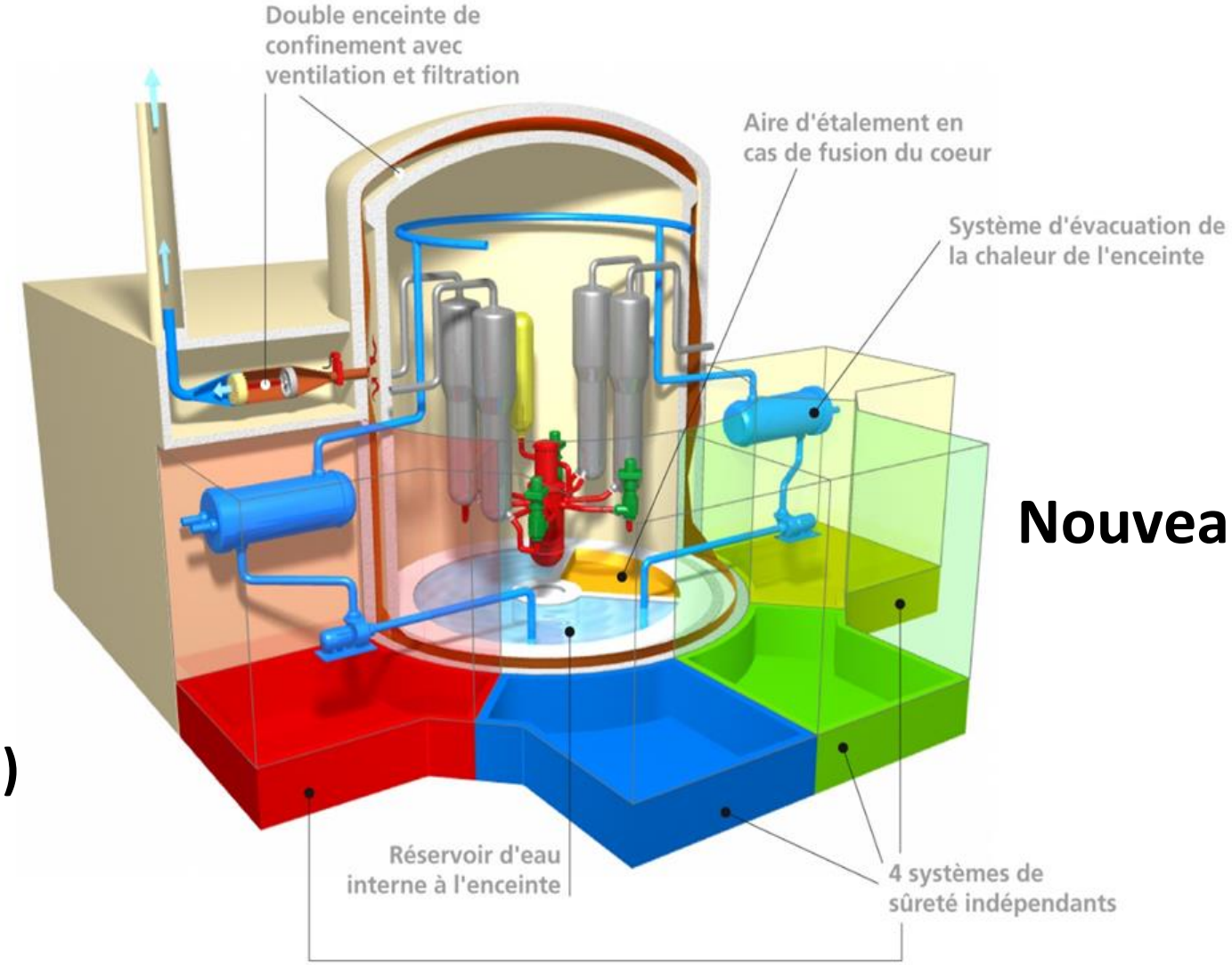
Sabotage du circuit secondaire
La turbine de DOEL 4 (évacuation de l'huile)



Chute d’un avion sur le dôme d’un réacteur (ou autre structure essentielle)

LE VOL BIERSET-MALAGA, IL PASSE BIEN AU-DESSUS DE TIHANGE?
TIC TAC
OUI POURQUOI ?
rtbf 7 décembre 2017

Double dôme des réacteurs (PWR – EPR)



Nouveaux réacteurs EPR

(Doel 3 & 4)

(Tihange 1, 2 & 3)

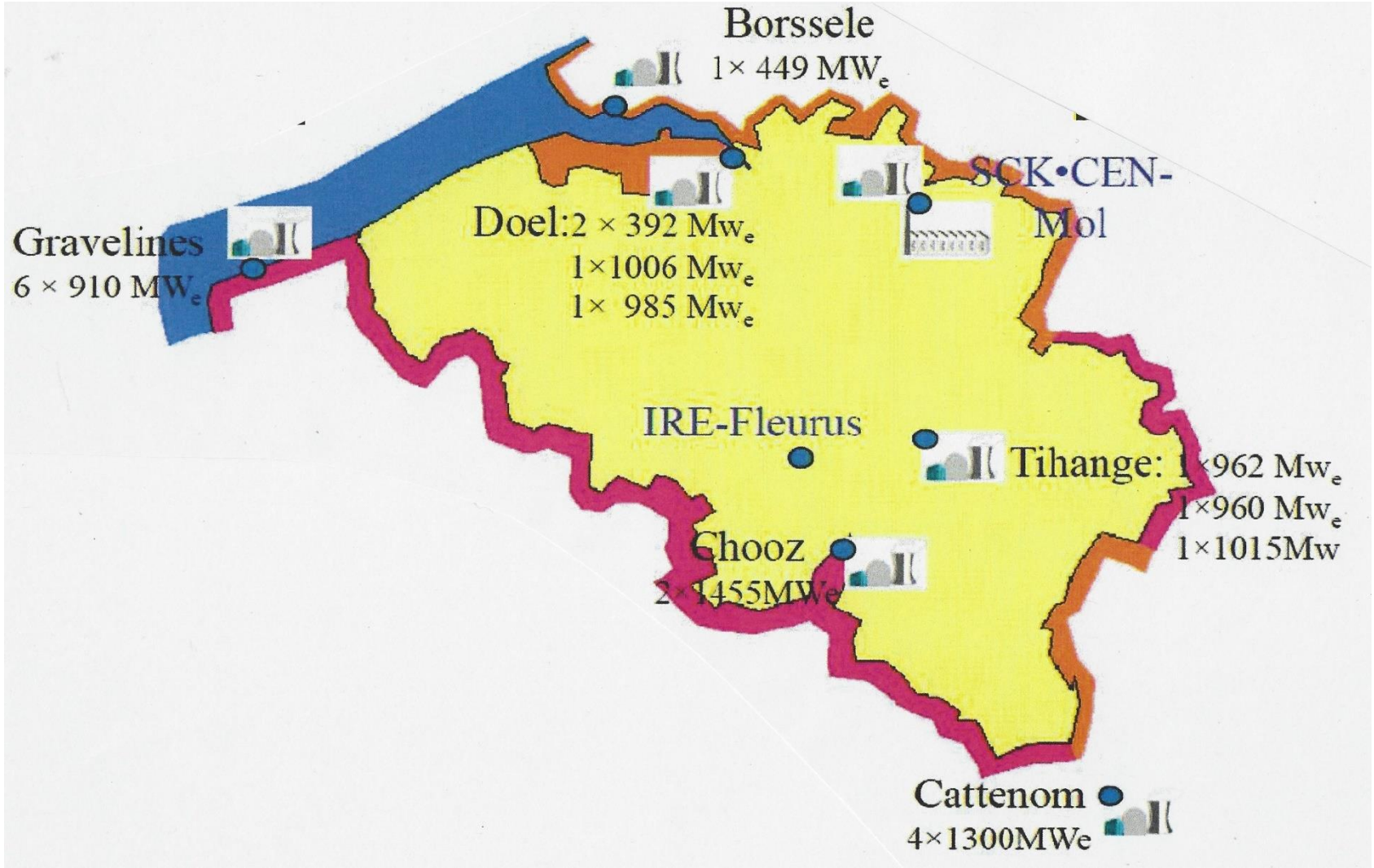
Cyber terrorisme

Gilles de Kerchove chef de l'antiterrorisme européen (2017)

Je ne serais pas étonné qu'avant 5 ans les terroristes puissent prendre le contrôle d'une centrale nucléaire.

Je ne serais pas étonné qu'avant 5 ans il y ait des tentatives de d'utiliser Internet pour commettre des attentats.

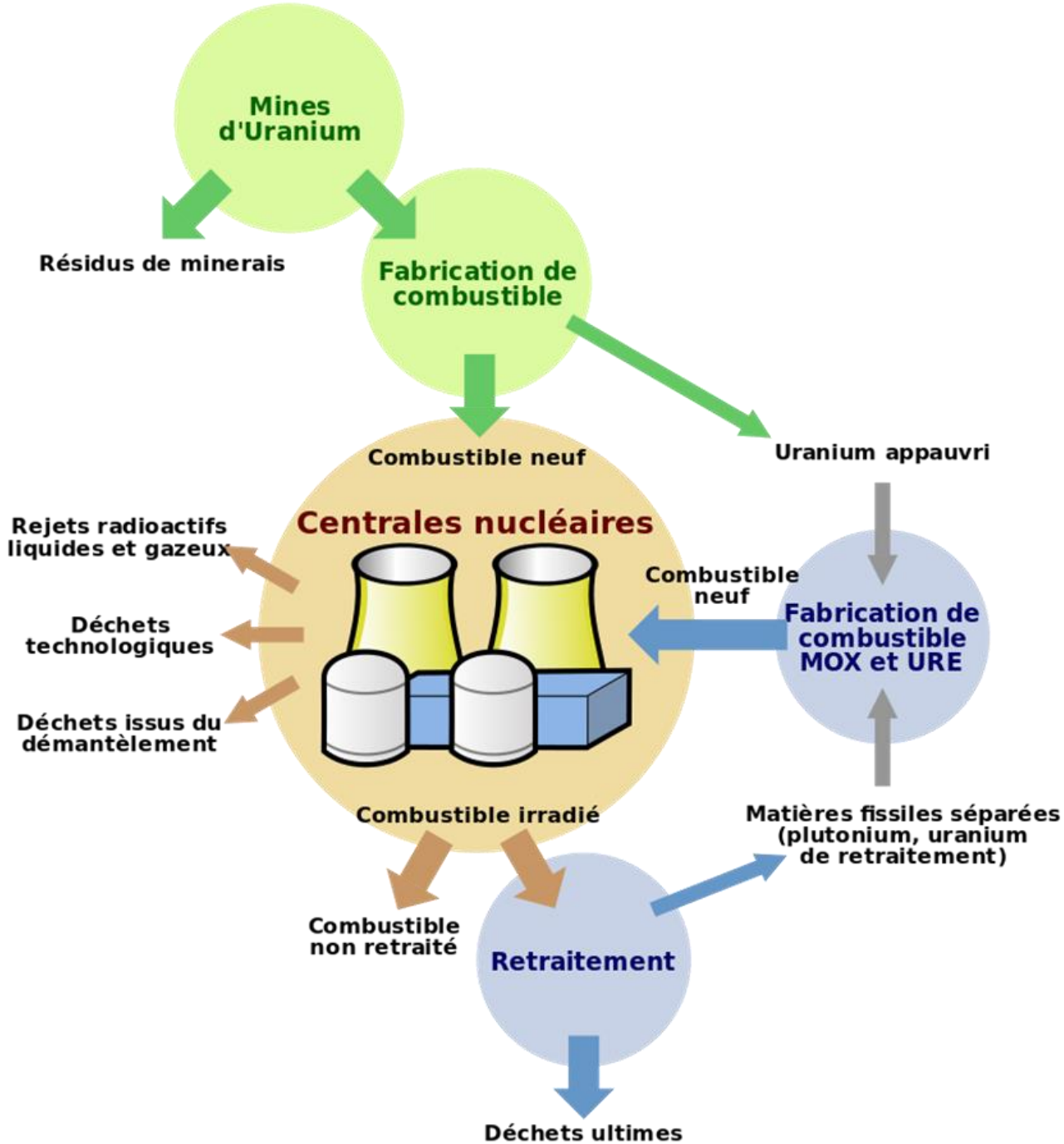
La Belgique est entourée de 13 réacteurs



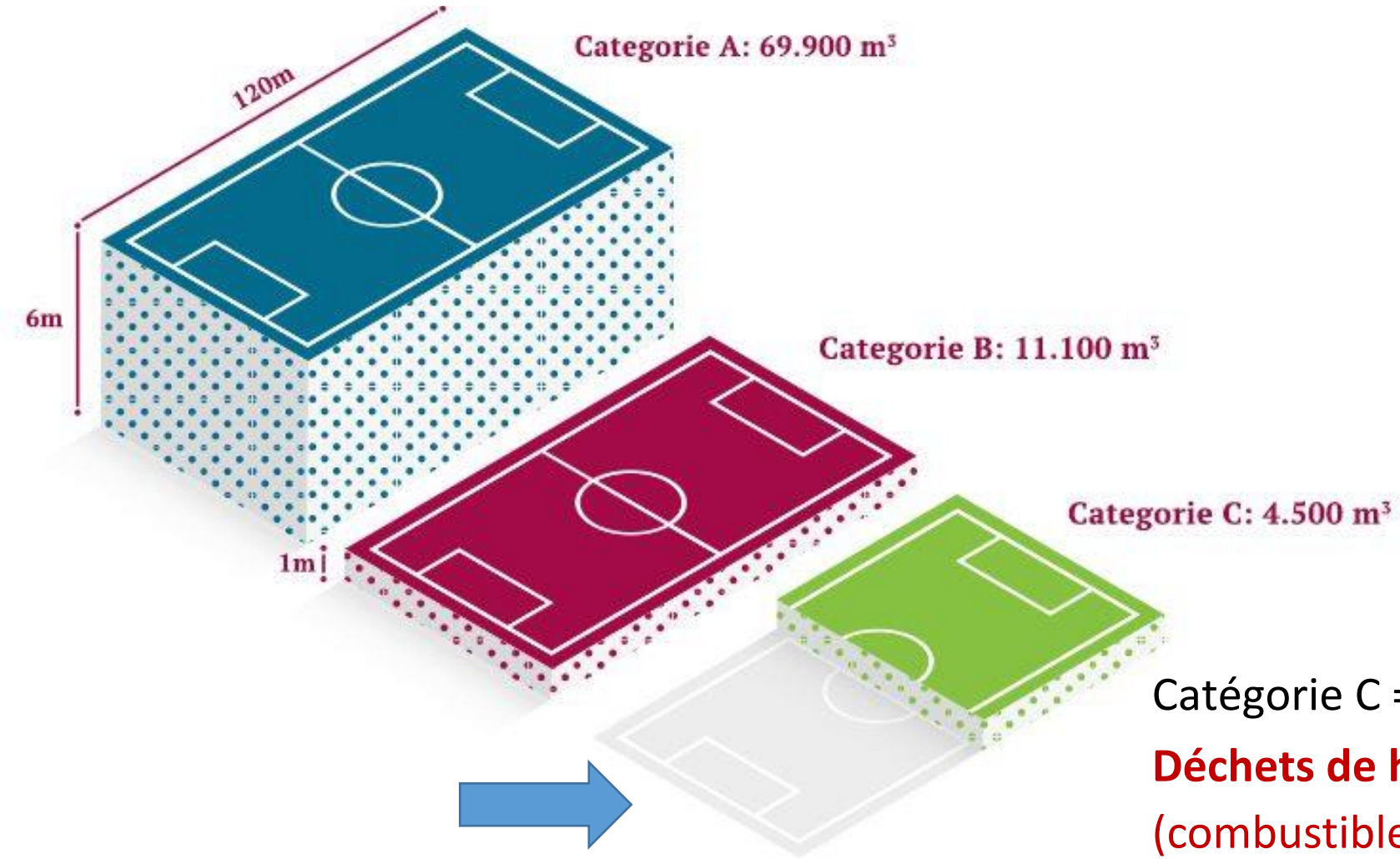
Problème des déchets radioactifs
Ce qu'en pense FORATOM

Les déchets de l'énergie nucléaire : leur **volume est si petit** qu'il peut être traité en toute sécurité et sont également le **combustible pour d'autres réacteurs**.

Les déchets de combustibles fossiles, en particulier de dioxyde de carbone (CO2), **sont si énormes** que nous ne savons pas comment les gérer.


Mines d'Uranium
Résidus de minerais
Fabrication de combustible
Combustible neuf
Uranium appauvri
Centrales nucléaires
Rejets radioactifs liquides et gazeux
Déchets technologiques
Déchets issus du démantèlement
Combustible neuf
Fabrication de combustible MOX et URE
Combustible irradié
Matières fissiles séparées (plutonium, uranium de retraitement)
Combustible non retraité
Retraitement
Déchets ultimes

En Belgique

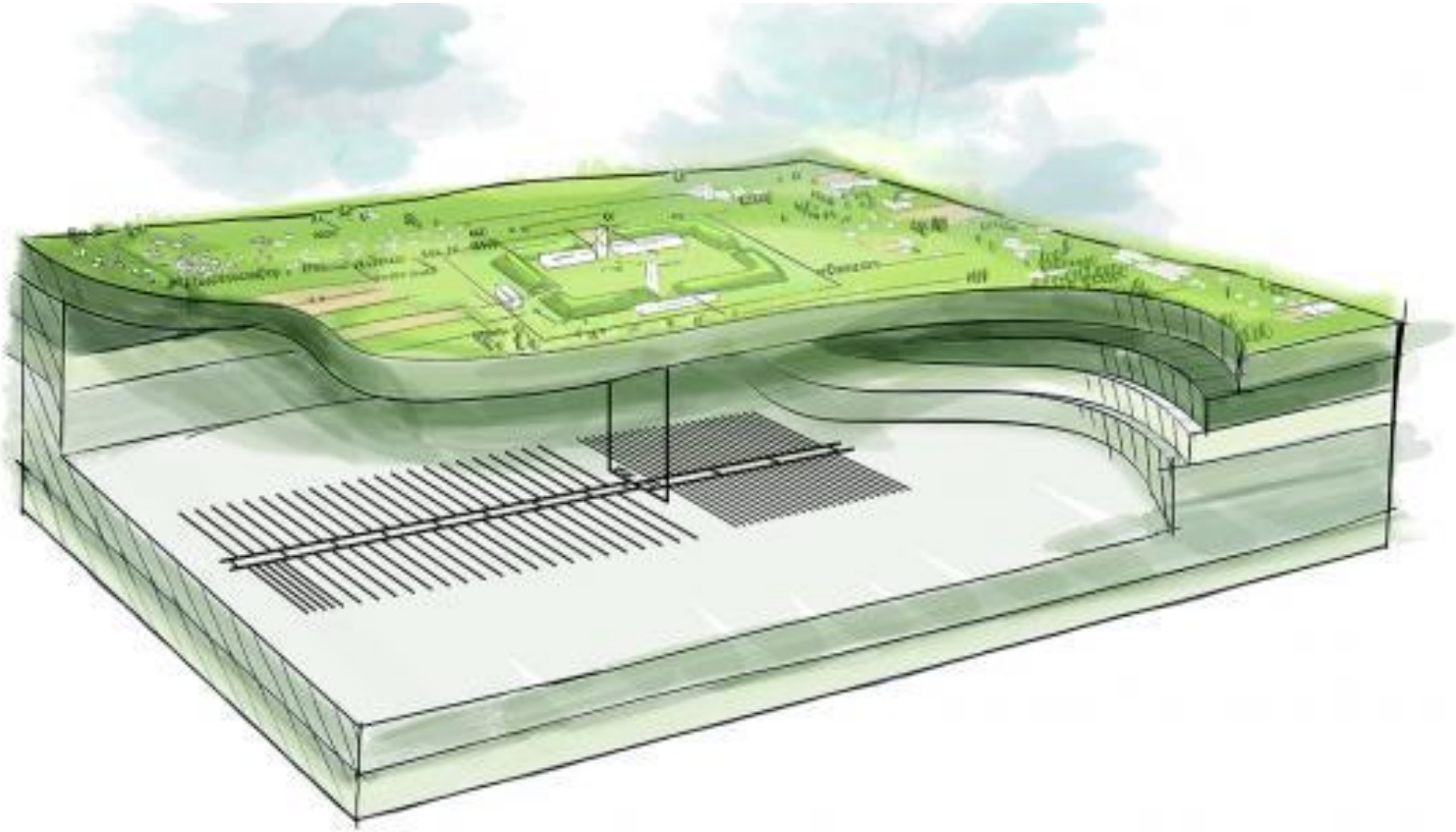


Catégorie C =

Déchets de haute activité

(combustible nucléaire)

La gestion des déchets radioactifs



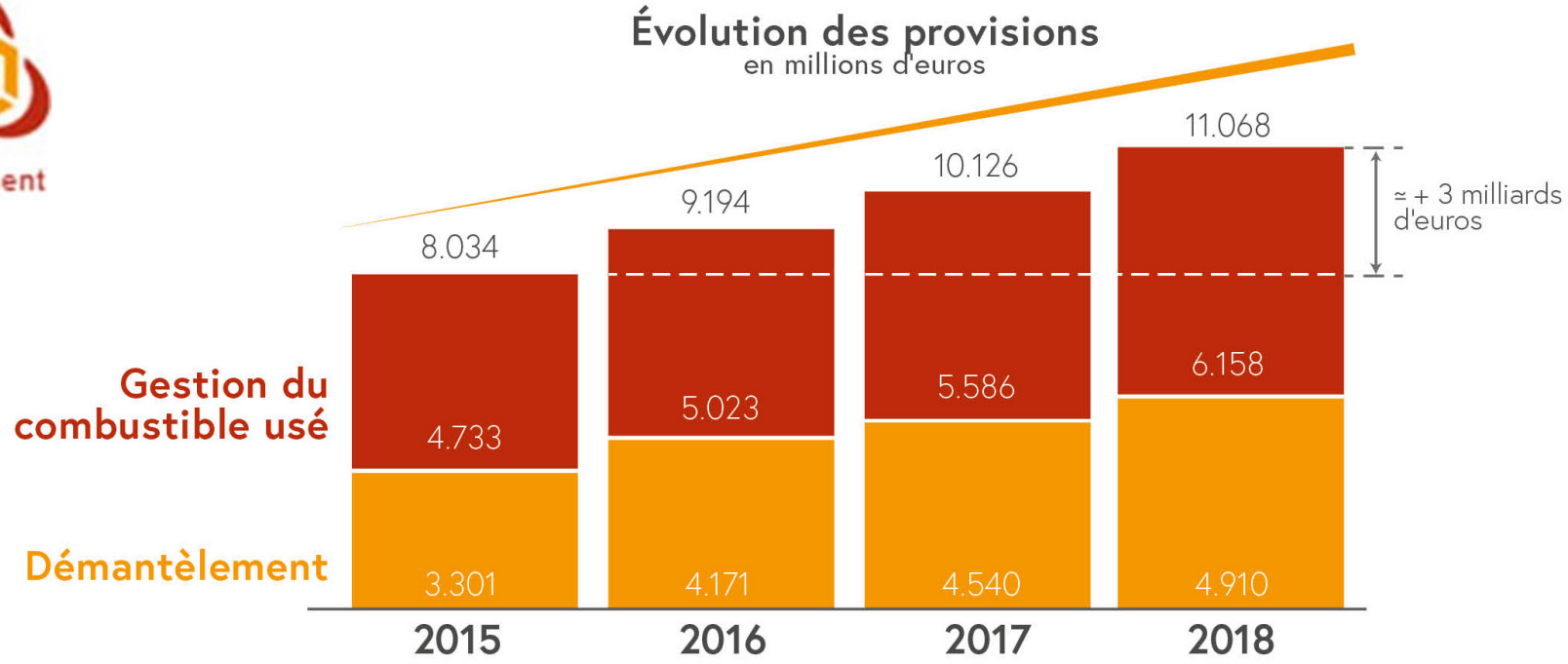
Décidé en Finlande et en Suède

HADES – dépôt souterrain
(ONDRAF) (Mol)

Réserve pour démantèlement des installations et gestion du combustible irradié

Synatom
Excellence in nuclear fuel cycle management

12 Milliards € en 2019



ONDRAF

Gestion des déchets

+/- 12 Milliards €

Future gestion des déchets ? Transmutation

Le SCK•CEN travaille activement à la conception et à la construction d'une nouvelle installation de recherche multifonctionnelle : MYRRHA

Future gestion des déchets ? Transmutation

MYRRHA (*Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications).*

Un des objectifs: démontrer que la transmutation des déchets les plus radiotoxiques (actinides mineurs) est faisable à l'échelle pré-industrielle

---

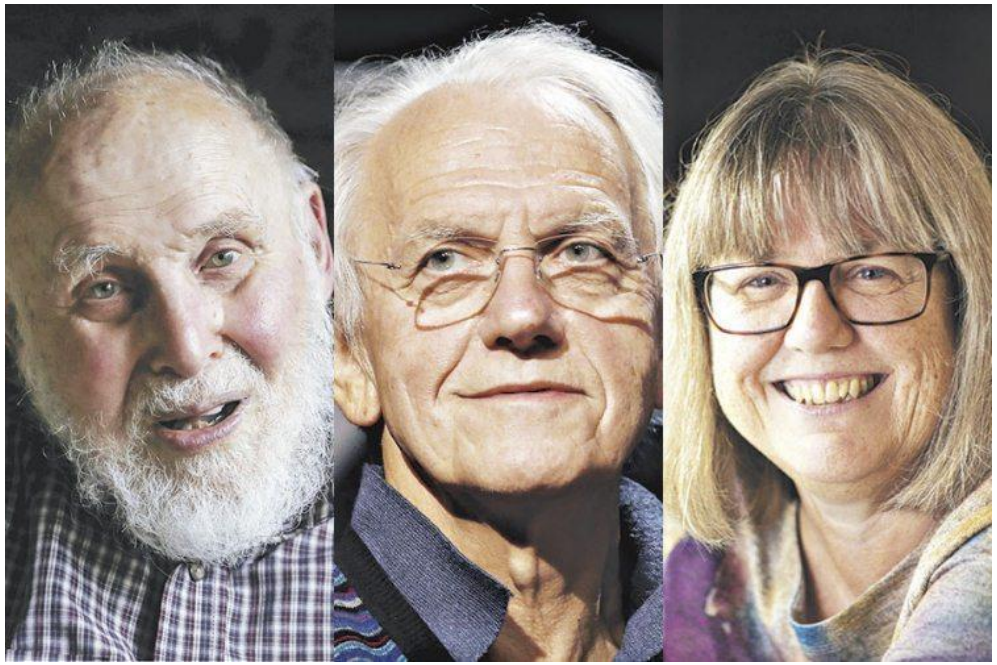
A noter: prix Nobel 2018 de Physique

(Gérard Mourou FR, Donna Strickland CND, Arthur Ashkin USA)

Impulsions laser ultra puissantes 10^{15} W qui peuvent forcer la transmutation.

Exemple. Technétium: durée de vie de 200.000 ans ramenée à 16 secondes.

Développements difficiles !



Vu les notions de risque considérées, il est licite que certains citoyens désirent « quitter le nucléaire »

Mais : conséquences pour la disponibilité d'électricité ?

Conclusions relatives au risque nucléaire 1

1. Le problème de la sureté nucléaire n'est pas celui des « fissures »

2. Réduire le risque hypothétique des installations nucléaires demande:

- Le maintien de la **priorité à la sureté** par rapport aux aspects économiques (AFCN)
- Le maintien de la capacité de contrôle et d'analyse de **l'intégrité des structures**
- Eviter les **erreurs humaines** (niveau de formation – qualification – attention aux prestataires de service !)

Conclusions relatives au risque nucléaire 2

- Une **protection physique** (surveillance et confinement) supérieure à celles que les exploitants et les autorités de sureté ont appliquée avant la prise de conscience des attentats des dernières années.

- Des **stratégies bien pensées** (déjà disponibles) pour le **démantèlement des installations**, pour la **gestion des déchets radioactifs** et pour **la protection des radio-isotopes** utilisés en médecine et ailleurs ….

- Conceptions très différente des réacteurs de 4ème génération

Il convient de comparer les risques entre eux !

Les risques les plus graves peuvent être minimisés par une solution proposant des risques moins graves:

Le nucléaire pour réduire le risque climatique

Risque R = f(Probabilité;Conséquences)

Pour notre société:

- Risque de l'**Automobile**:

R = **P**.Grande x **C**.Limitée

- Risque du **Nucléaire**:

R = **P**.Petite x **C**.Grande

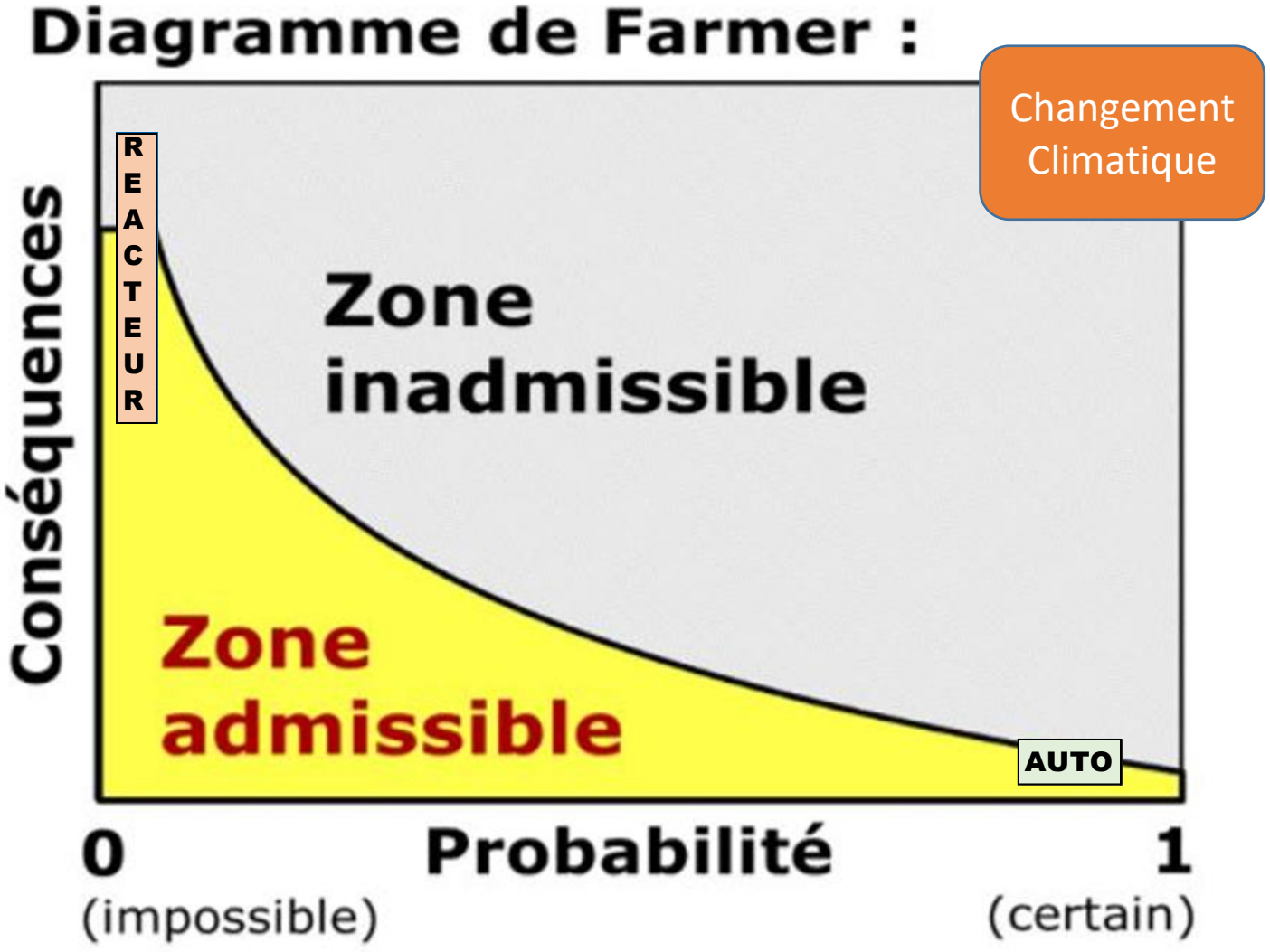
- Risque **Climatique**

R = **P**.Grande x **C**.Grande

Note: nombre de morts directs.

Fukushima: zero

Chernobyl: 180



Nous ne pouvons pas sortir du nucléaire !

Arrêter les réacteurs ?

Mais, il faut continuer à gérer:

- Les autres installations nucléaires
- L'utilisation des isotopes médicaux
- Le démantèlement des installations
- La gestion des déchets
- La recherche (également pour la gestion des déchets)
- (Le militaire)

3. Techniques de production Alternatives Non nucléaires

Mettre en évidence **les limitations des énergies renouvelables / vertes** et leurs conséquences

Alternatives au Nucléaire (pour l'électricité)

RAPPEL : Alternatives considérées par le Pacte énergétique belge (après 2025)

A. **Energies « vertes »** (Investissement important nécessaire)
Energie éolienne; Energie solaire; Géothermie(à développer); Biomasse; Hydraulique ; Hydrogène (Vecteur d'énergie et stockage)

B. **Centrales au gaz** (Cycle combiné gaz-vapeur – Plusieurs à construire – Prix du gaz ? – Dépendance énergétique ! - CO2?)

C. **Importation d'électricité** (En développement – Jusqu'à 35% pendant un temps !!! - Indépendance énergétique ?)

D. **Economies d'énergie** !!! (rendement; isolation; programmation; acceptation du risque de délestage; privations !)

\+ Modifications du réseau de distribution

B. Les Energies Renouvelables EnR

1.- La filière éolienne (terrestre et maritime)
2.- La filière photovoltaïque (PV) (terrestre / flottante)
3.- La filière hydraulique (limité)
4.- La filière biomasse solide
5.- La filière biogaz (limité)
6.- La filière déchets urbains renouvelables
7.- La filière géothermie
8.- La filière énergies marines (EMR)
9.- La filière solaire thermodynamique (pm)

Energies solaires (principalement photo voltaïque)

Solaire thermique (thermodynamique)
Solaire photovoltaïque

Kristal Solar Park - Lommel (BE)

99,5 MW, **303.000 modules solaires**, 2200 km de câbles, terrain de 93 ha.

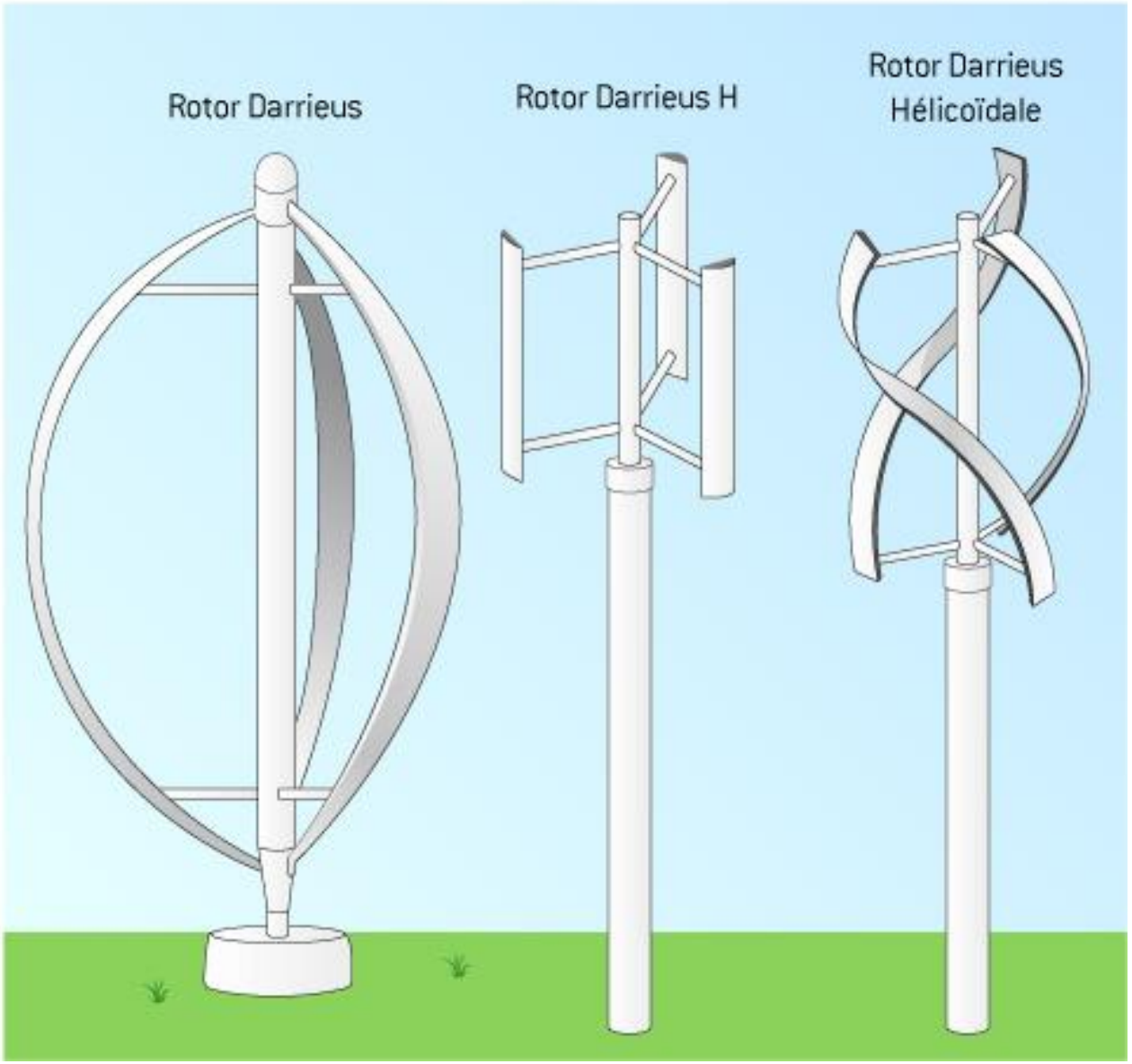
Plus grand parc solaire du Benelux. Production : +/- **85000 MWh par an**.

Soit l'équivalent de la production de la centrale de

THIANGE 3 pendant 4,5 jours

Centrales solaires PS10 ET PS20 en Espagne

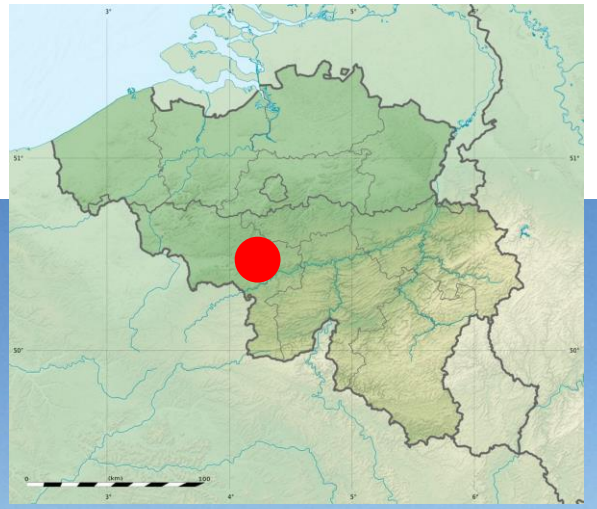
Eolienne Darrieus



Le parc éolien d'Estinnes

11 Eoliennes de 198 m 81 Mw (11 x 7,5 MW) 180.000 MWh/an

= Tihange 3 pendant 9,5 jours



Modular offshore grid (MOG)

1000 MW

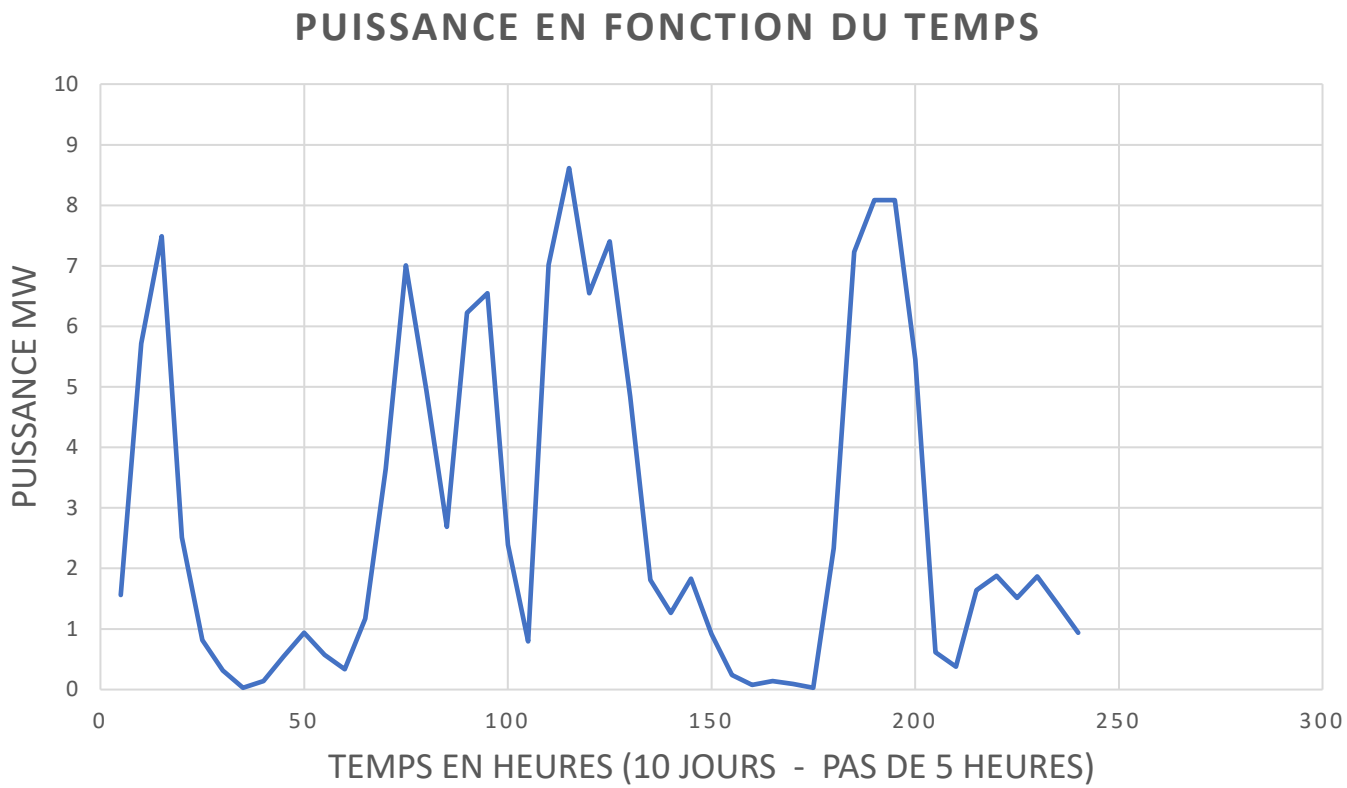
Par la plateforme MOG d'ELIA

Au large de ZEEBRUGES

En 2020 : +/- 10 % de l'électricité

En 2030 : +/- 20%

Intermittence éolienne à Gembloux en 10 jours
6 éoliennes de 1,5 MW pour un vent à 10 m/s = 36 km/h

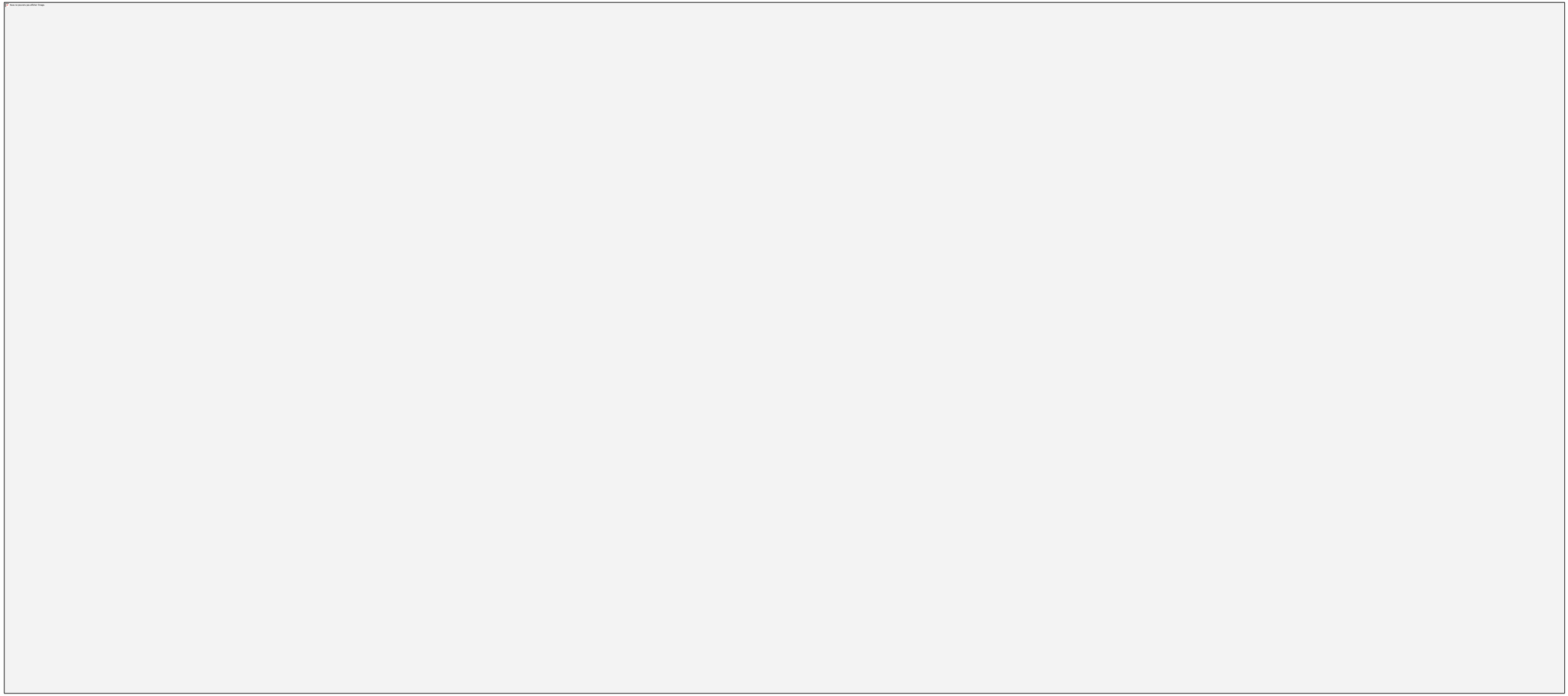


$Pe=Pi*r = kV^3$ pour V entre 2 et 12m/s

Pe : puissance électrique
Pi : puissance incidente du vent
V : vitesse du vent
R : rendement de la machine
K : constante fonction des propriétés de l'air …

Intermittence du parc d'éoliennes de Gembloux/Sombreffe en 10 jours : 6 éoliennes de 1,5 MW
(Calcul approximatif en fonction de la vitesse du vent enregistrée par la station météo – du 30.01 au 08.02.2021)

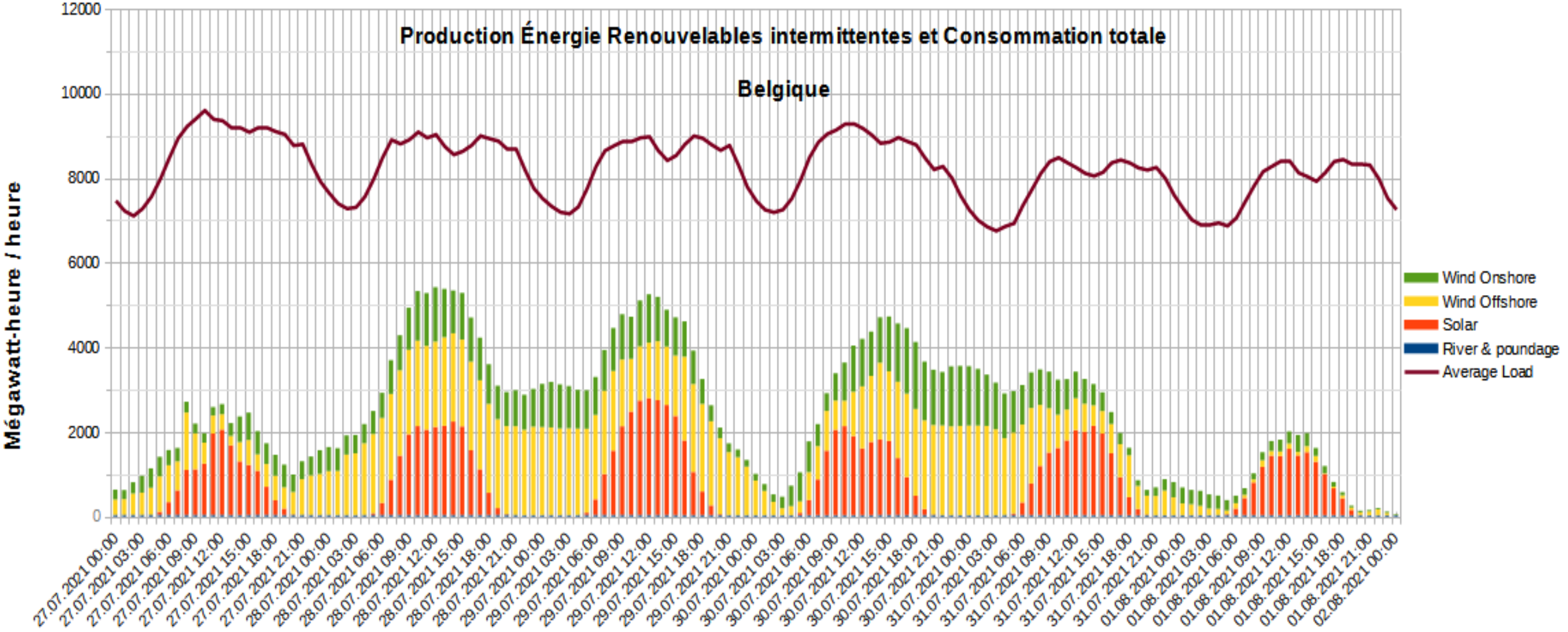
Période de manques d'EnR(i) (example du 15 au 21/12/2021)



10.04.2021

https://transparency.entsoe.eu/load-domain/r2/totalLoadR2/show

Période d'excès potentiel d'EnR(i) (example du 27/07 au 01/08/2021)



https://transparency.entsoe.eu/generation/r2/actualGenerationPerProductionType/show

1. Subsides pour l'implantation des éoliennes et PV.
2. Energie renouvelable subsidiée: certificat vert car non rentable pour les opérateurs.
3. Construction de centrales thermiques (au mieux au gaz) destinées à prendre le relais vu l'intermittence.
4. Assurer un revenu (CRM) aux exploitants des centrales au gaz.
5. Emissions de CO_2 qui explosent.
6. Taxe carbone (même si ETS) alourdit la fiscalité.

Centrales au gaz

Exemples de centrales existantes

Drogenbos Seraing Vilvoorde

Amercoeur Zandvliet St Ghislain

Herdersbrug (Awirs) Ringvaart

Puissance type : 460 MW

A construire en plus : 2.000 MW ?

= 4 à 6 centrales au gaz ?

Centrale au Gaz de Seraing à renouveler
(Luminus)

Refus de projets de centrales au gaz Dilsen-Stokkem et Vilvorde

La région Limbourgeoise a décidé de ne pas accorder le permis d'urbanisme pour une nouvelle centrale électrique au gaz à Dilsen-Stokkem

Le projet n'est pas conforme aux règles de l'urbanisme et les émissions d'oxyde d'azote peuvent également causer des problèmes pour le parc naturel voisin des Hoge Kempen

Le Brabant flamand refuse le permis pour la centrale au gaz de Vilvorde vu les émissions de CO2

https://www.tijd.be/ondernemen/milieu-energie/provincie-limburg-weigert-vergunning-voor-gascentrale/10298384

Nord Stream II – Gaz russe vers l'Europe

Garantie donnée aux centrales au gaz

CRM **M**écanisme de **R**émunération de **C**apacité (permet aux centrales au gaz de se développer sans savoir si elles seront rentables, vu la fluctuation du prix du gaz et de l'électricité).

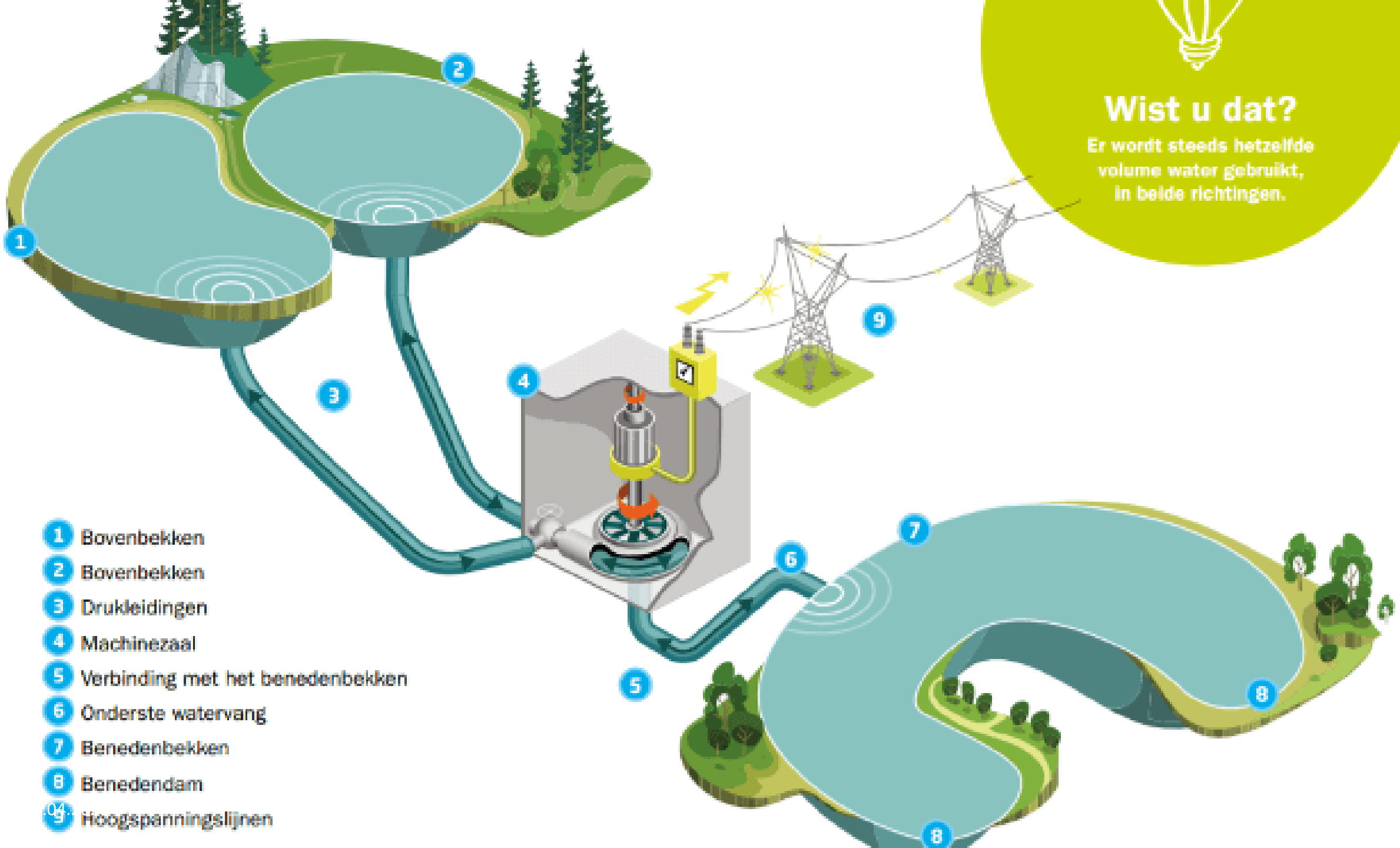
Adopté par
Le gouvernement
en 2019 et
confirmé en 2021

28.04.2019

Problème du stockage pour les systèmes ER intermittents

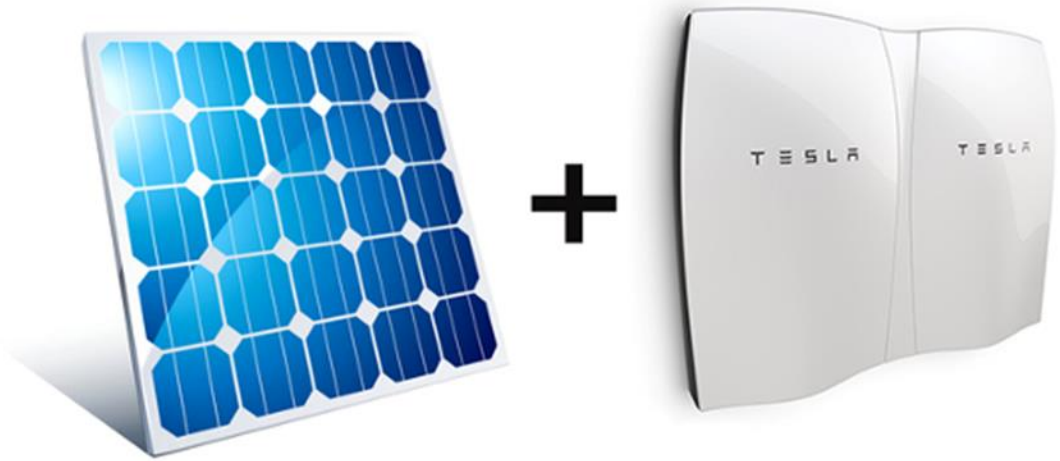
Stockage de l’énergie (Nuc et verte) Coo – Amblève

Permet de stocker jusqu'à 5.000 MWh (1.000 MW durant 5h) (STEP) - Temps de démarrage inférieur à 2 minutes


Wist u dat?
Er wordt steeds hetzelfde volume water gebruikt, in beide richtingen.
1 Bovenbekken
2 Bovenbekken
3 Drukleidingen
4 Machinezaal
5 Verbinding met het benedenbekken
6 Onderste watervang
7 Benedenbekken
8 Benedendam
9 Hoogspanningslijnen

Stockage « individuel »

- **Batterie « solaire». S**e décharge progressivement et supporte bien les décharges fréquentes peu profondes.



Sur 20 ans, investissement de 13.500 € pour 5 kWc ➔ 1kWh = 0,17€

Hydrogène

Pour être complet: hydrogène pour le transport ou le stockage d'énergie.

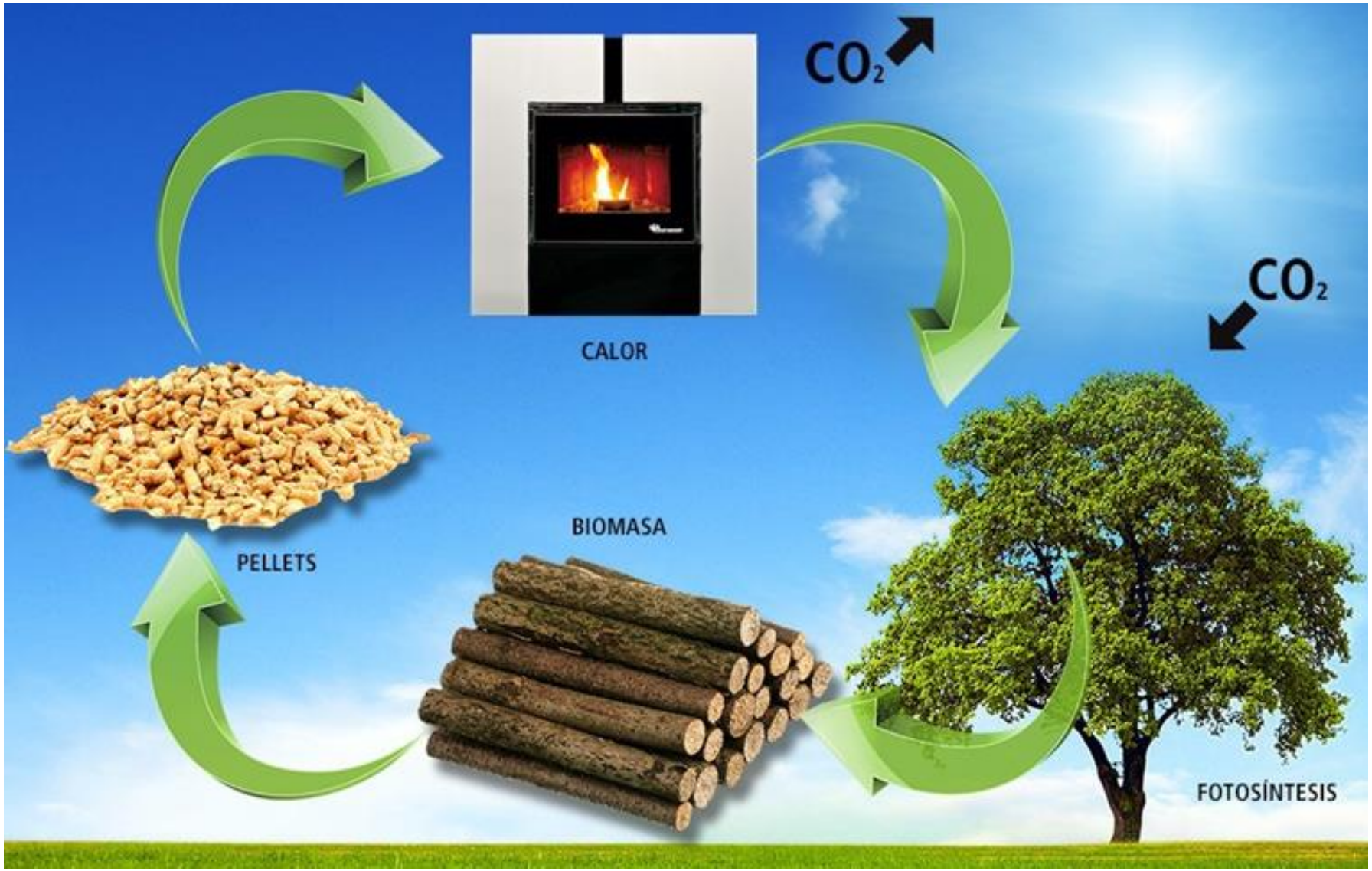
La combustion de l'Hydrogène ne donne pas de CO2 !

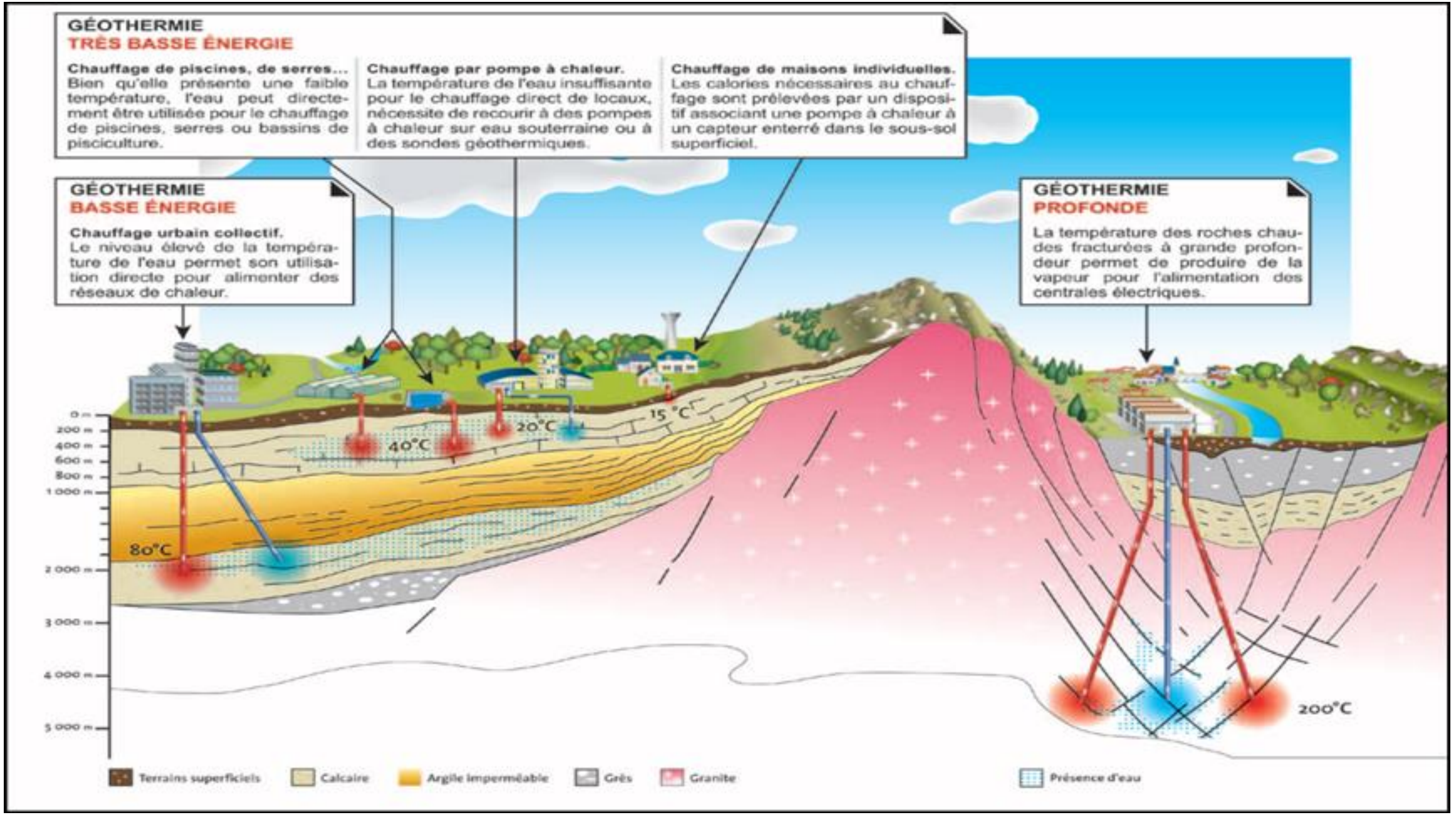
MAIS

- Demande plus d'énergie pour la produire que n'en donne son cycle (cycle complet électrolyse : **rendement=28%)**
  (Electrolyse ; haute température; … => réacteurs nucléaires)
  (Ou prix très bas de l'électricité)

- Explosif
- Corrosif

Biomasse




GÉOTHERMIE
TRÈS BASSE ÉNERGIE
Chauffage de piscines, de serres...
Bien qu'elle présente une faible température, l'eau peut directement être utilisée pour le chauffage de piscines, serres ou bassins de pisciculture.
Chauffage par pompe à chaleur.
La température de l'eau insuffisante pour le chauffage direct de locaux, nécessite de recourir à des pompes à chaleur sur eau souterraine ou à des sondes géothermiques.
Chauffage de maisons individuelles.
Les calories nécessaires au chauffage sont prélevées par un dispositif associant une pompe à chaleur à un capteur enterré dans le sous-sol superficiel.
GÉOTHERMIE
BASSE ÉNERGIE
Chauffage urbain collectif.
Le niveau élevé de la température de l'eau permet son utilisation directe pour alimenter des réseaux de chaleur.
GÉOTHERMIE
PROFONDE
La température des roches chaudes fracturées à grande profondeur permet de produire de la vapeur pour l'alimentation des centrales électriques.
0 m
200 m
400 m
600 m
800 m
1 000 m
2 000 m
3 000 m
4 000 m
5 000 m
15 °C
20°C
40°C
80°C
200°C
Terrains superficiels
Calcaire
Argile imperméable
Grès
Granite
Présence d'eau

VITO a choisi ENGIE Fabricom pour participer à la construction et l'entretien de la toute première centrale de géothermie profonde en Belgique, à Mol

Hydroélectricité – grand barrage (Itaipu)

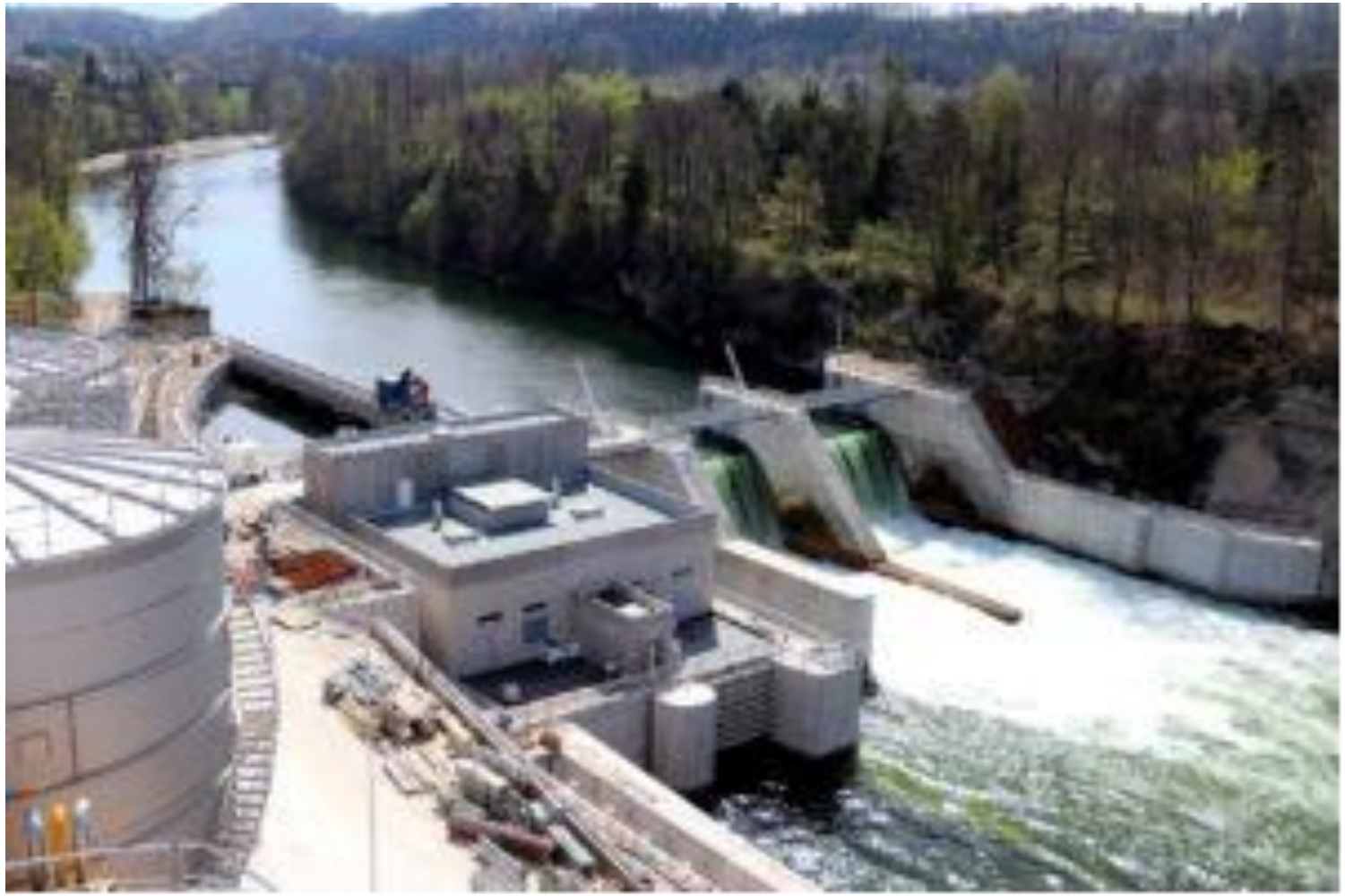
Par Dario Alpern — Travail personnel, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2983564

14.000 MW 98 TWh/an

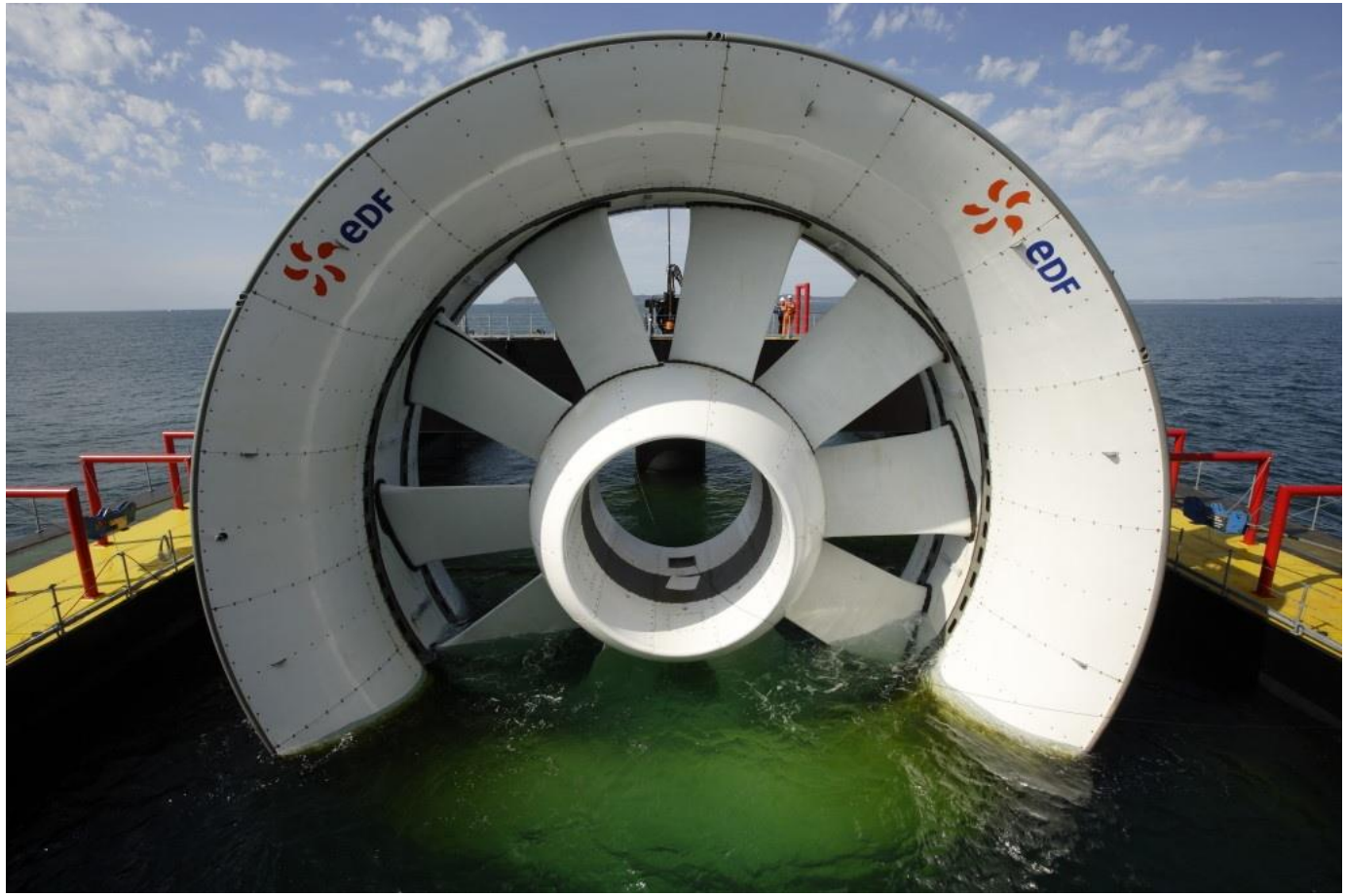
0,0029 TWh/an

0,0033 TWh/an

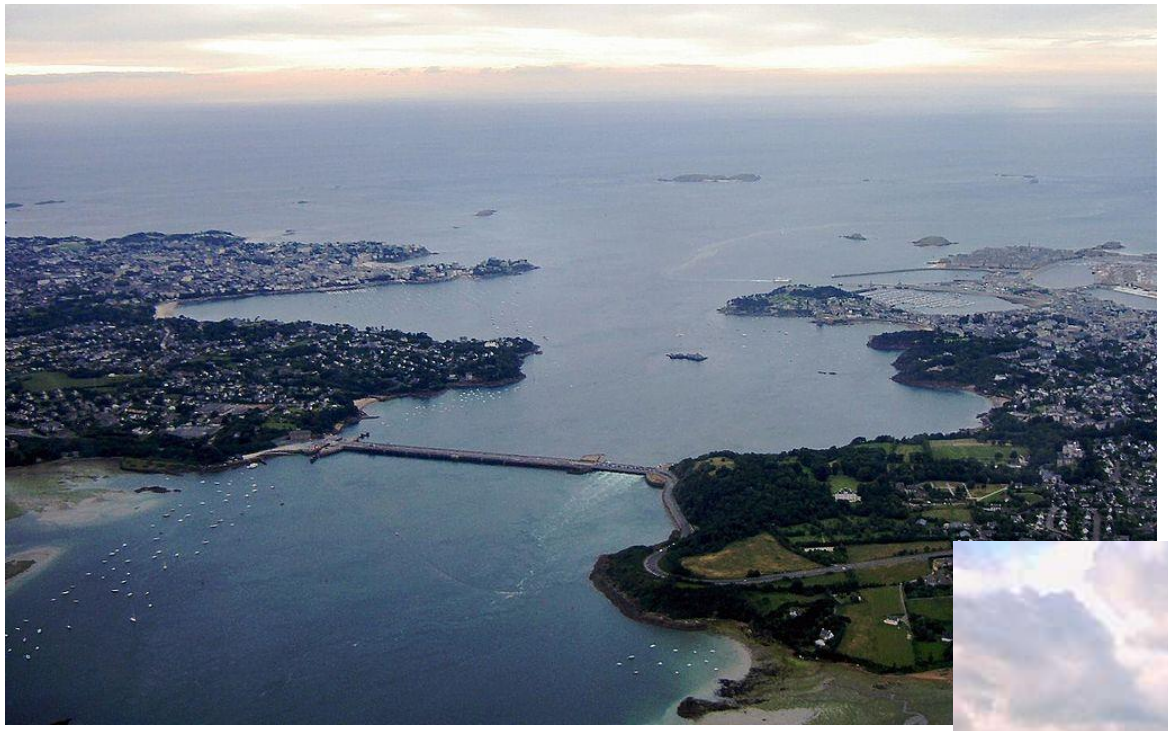
Hydroélectricité - au fil de l'eau



Energie hydrolienne (courants marins)



Energie marée-motrice



Usine de la Rance EDF

Limitations
relatives aux énergies vertes

ER : Limitations dues à l'intermittence

- Les facteurs de charge (éolienne: 20 à 40% solaire: 10%) vent faible ou pas de soleil : intermittence ➔
- La nécessité d'installer une autre source : le gaz
- Ou développer le stockage : construire des lacs ou autres systèmes de stockage (Hydrogène ? Rendement bas)
- Tenir compte des pertes durant le stockage, déstockage et transport
- La nécessité d'augmenter la capacité du réseau de transport de l'électricité et modifier la structure (➔ Smart Grid)
- **Une étude récente d'EDF montre que 60% d'énergie renouvelable dont 40% d'éolien et solaire, est un maximum au-delà duquel il est difficile d'éviter des problèmes de stabilité des réseaux**

Limitations dues à l'espace nécessaire

Limitation due à l'espace nécessaire:

Pour disposer de 1.800 MW, il faut

- 4 km² d'espace pour le nucléaire (EPR)
- 56 km² de panneaux solaires (autre calcul: 36 km2)
- 437 km² d'espace pour les éoliennes

  (100 km² théoriques selon Greenpeace)

Source: Eurostat 2018

Limitations dues aux déchets et au réseau

- La durée de vie des éoliennes ou des panneaux voltaïques est de 25 ans (?)
- **Les matériaux de base et les déchets des systèmes ER (PV, éoliens, … et des systèmes de stockage) ne sont pas à oublier.**

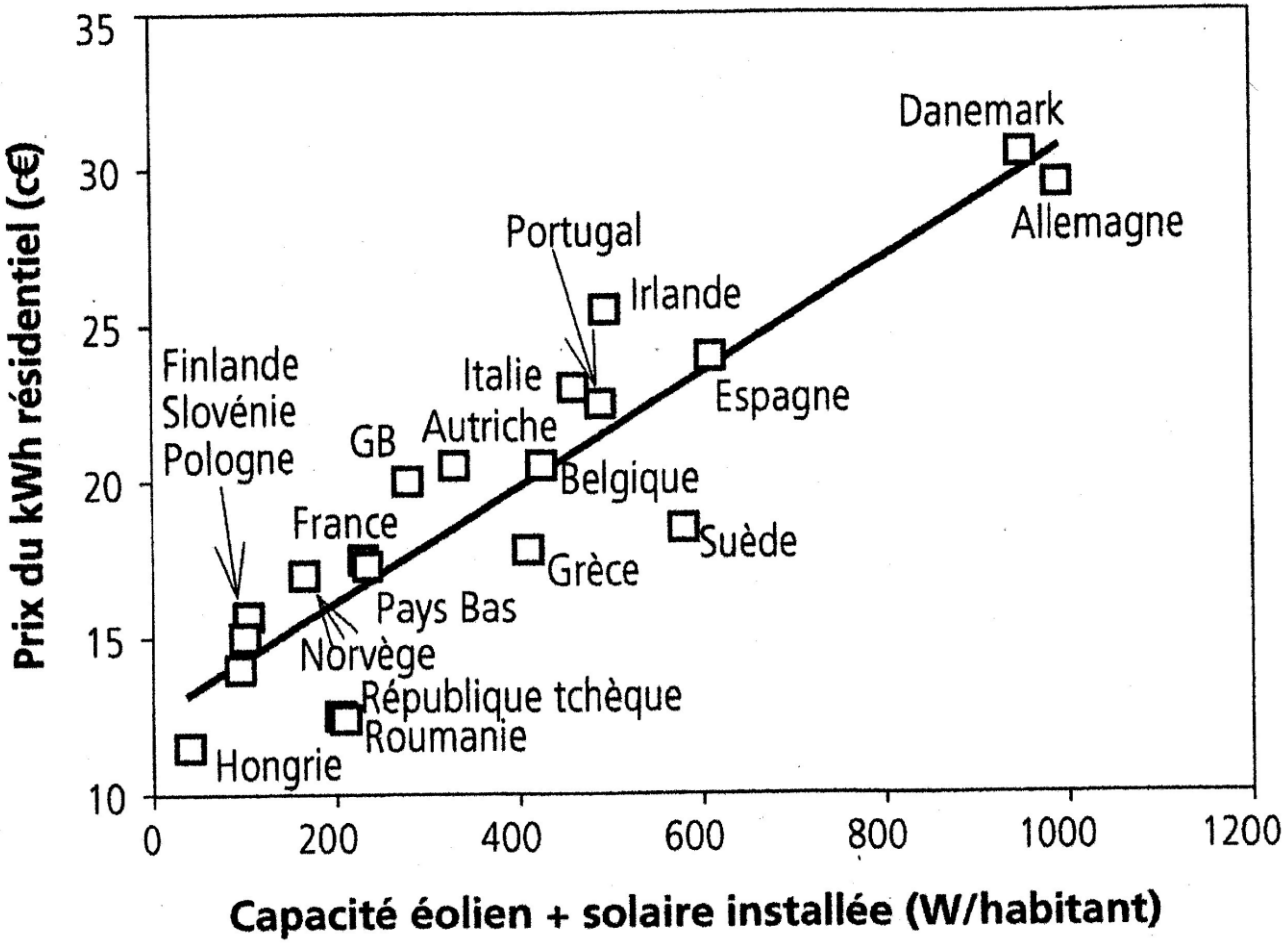
Ils représentent des problèmes de notre société car :

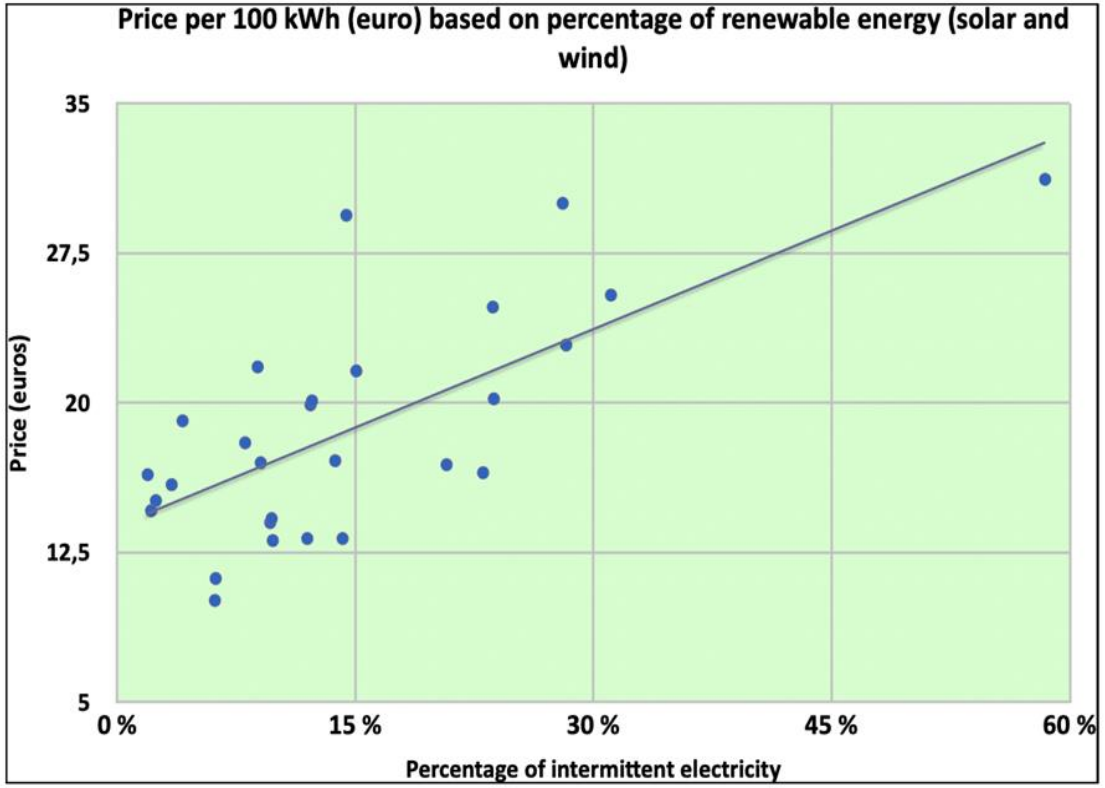
– ces matériaux de base peuvent être en quantité limitée et difficiles à extraire

– ces déchets ne sont pas nécessairement faciles à recycler

- **Grandes quantités de béton nécessaires pour les éoliennes**

Prix de l'électricité = f(pénétration du renouvelable)





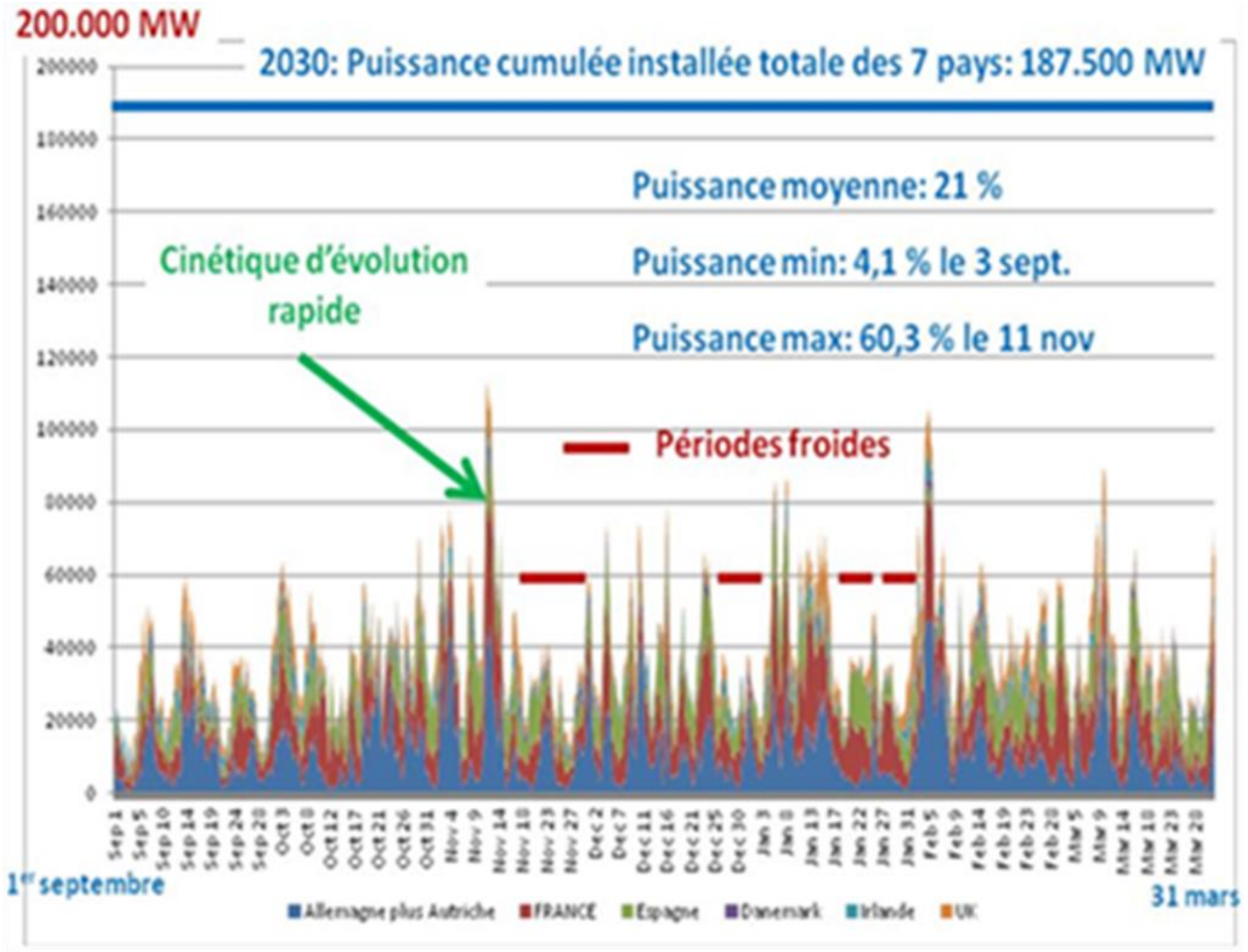
Source :

Eurostat 2015 *Eurostat 2020*

4. Interconnexions entre pays pour **l'importation d'électricité**

L'interconnexion poussée de tous les réseaux ENRi européens permettrait de minimiser les besoins de stockage ou de production alternatives d'électricité ?

Foisonnement : concomitance en Europe !!!



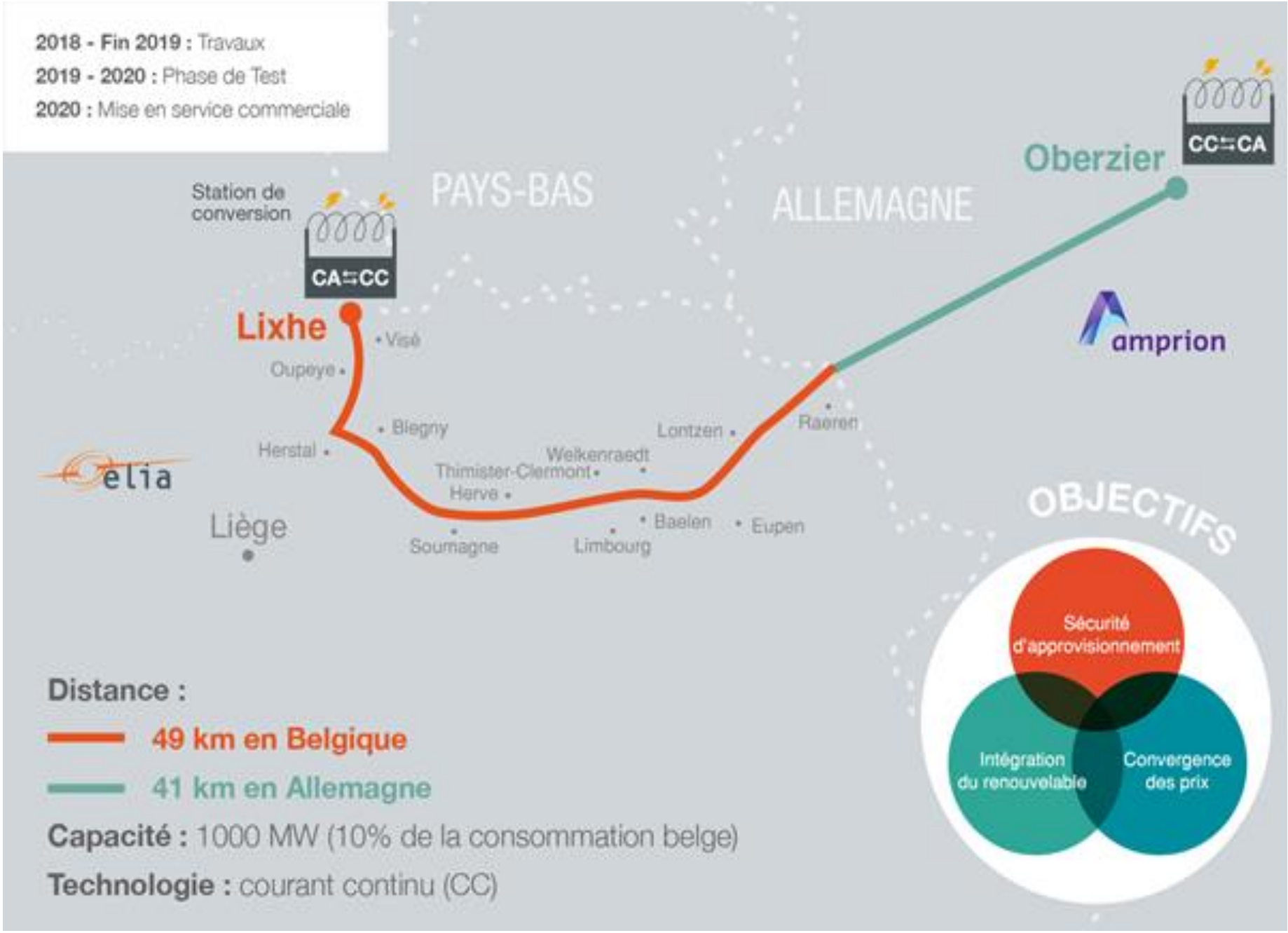
Interconnexion électrique

entre

la Belgique et l'Allemagne

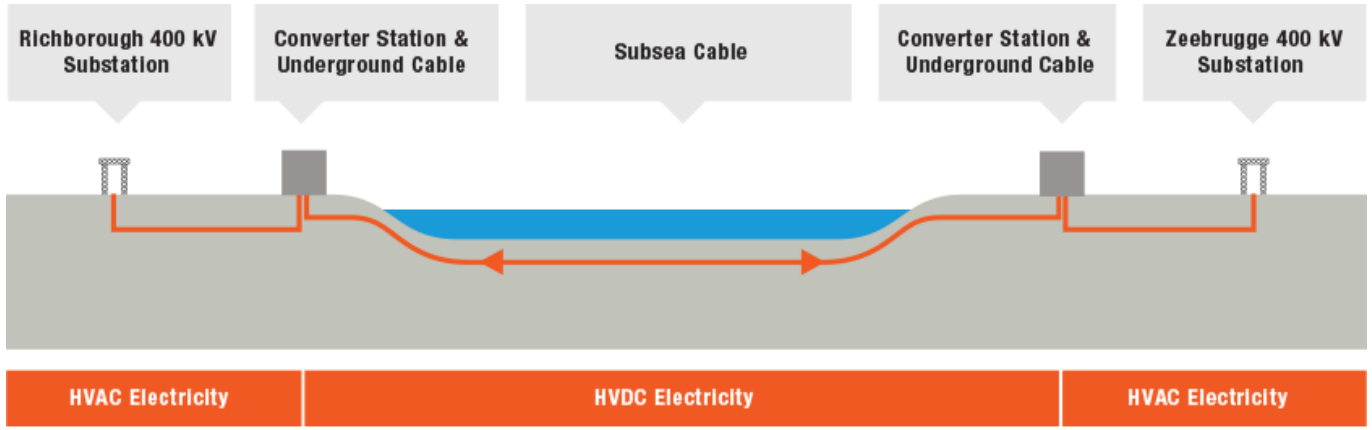
Alegro (Elia)
(Aachen Liège Electric Grid Overlay)

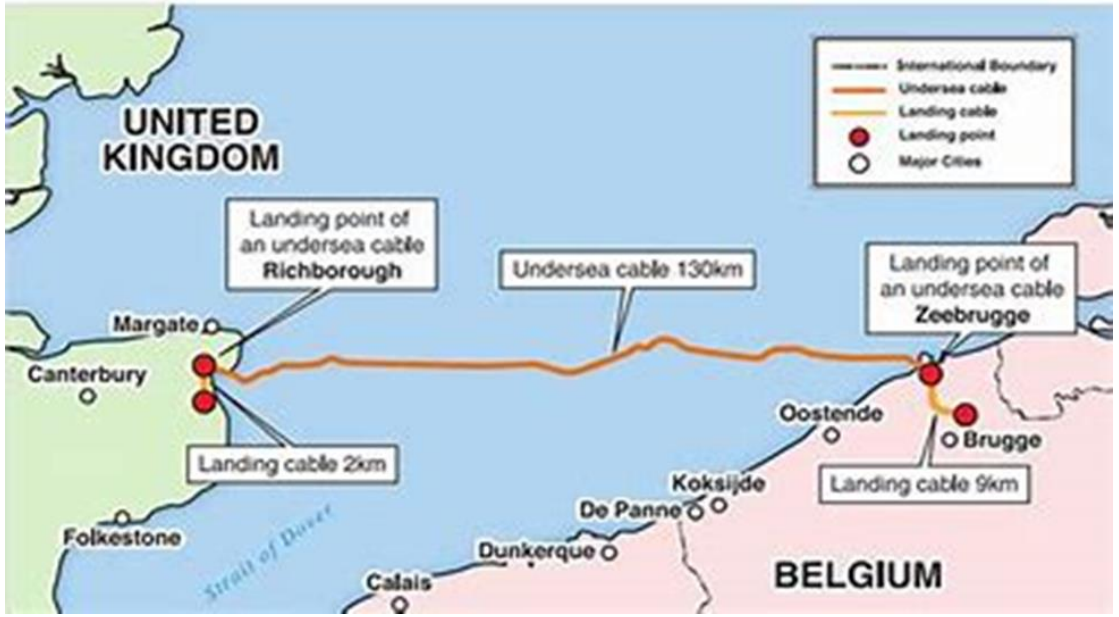
500 Moi€



NEMO LINK (1.000 MW à 400 kV)

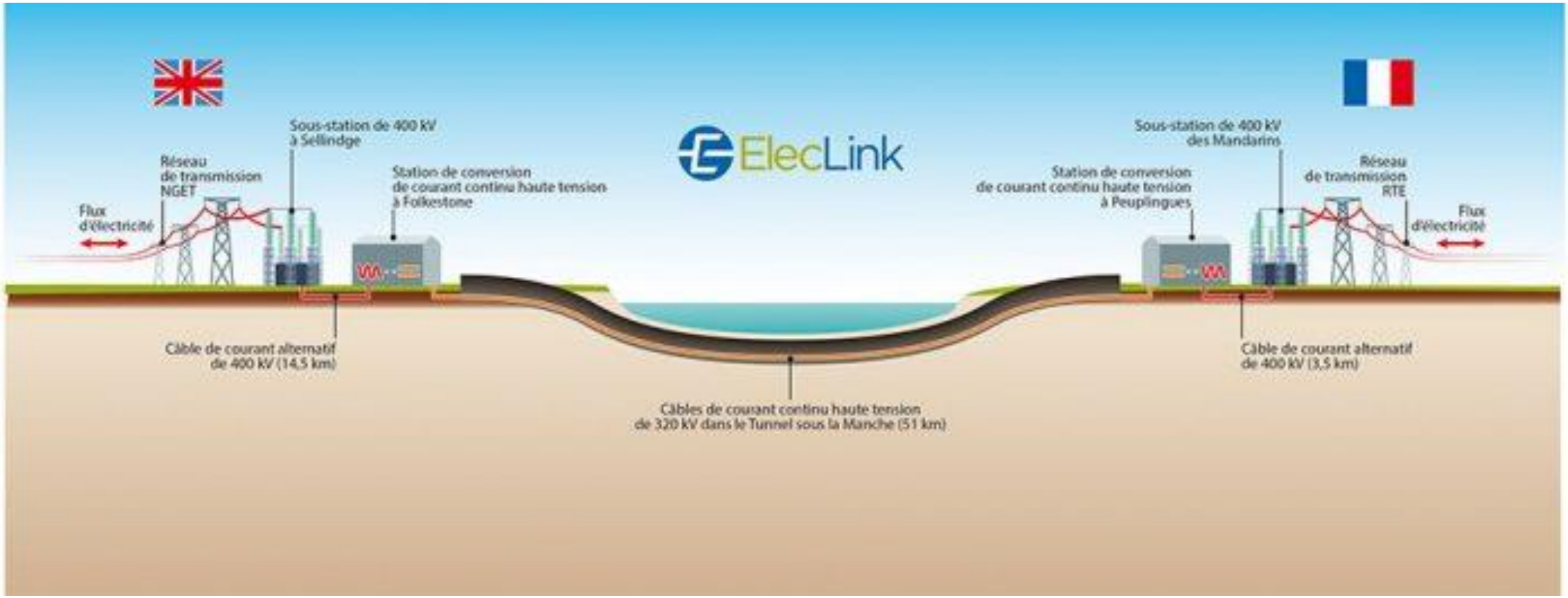
- **L'interconnexion entre la Belgique et la Grande-Bretagne est opérationnelle depuis le 31 .01.2019**
- L'interconnexion est un projet commun des gestionnaires de réseau de transport belge et britannique, Elia et National Grid.
- Nemo Link contribue à mettre en place un réseau européen intégré où les excédents d'énergie sont échangés au niveau international





Eleclink - Eurotunel

Interconnexion électrique en courant continu de 1000 MW



5. Réduction de la consommation

Réduction de la consommation = Privations ?

- Rendement plus élevé exigé
- Isolation des bâtiments publics et privés exigée (€ !)
- Programmation de la consommation (consommation au haut de la production)

➔**La demande doit s'adapter à la production et non plus comme actuellement: la production s'adapte à la demande !!!**

- Développement du stockage (€ !)
- Smart Grid = gestion par intelligence artificielle (OK ??? Nouvelle dictature)
- Acceptation du risque de délestage ➔ Coupures sporadiques ? (OK?)
- Augmentation importante du prix du kWh ➔ Tarification différentiée

6. Autres alternatives:

Du nucléaire pour remplacer le nucléaire

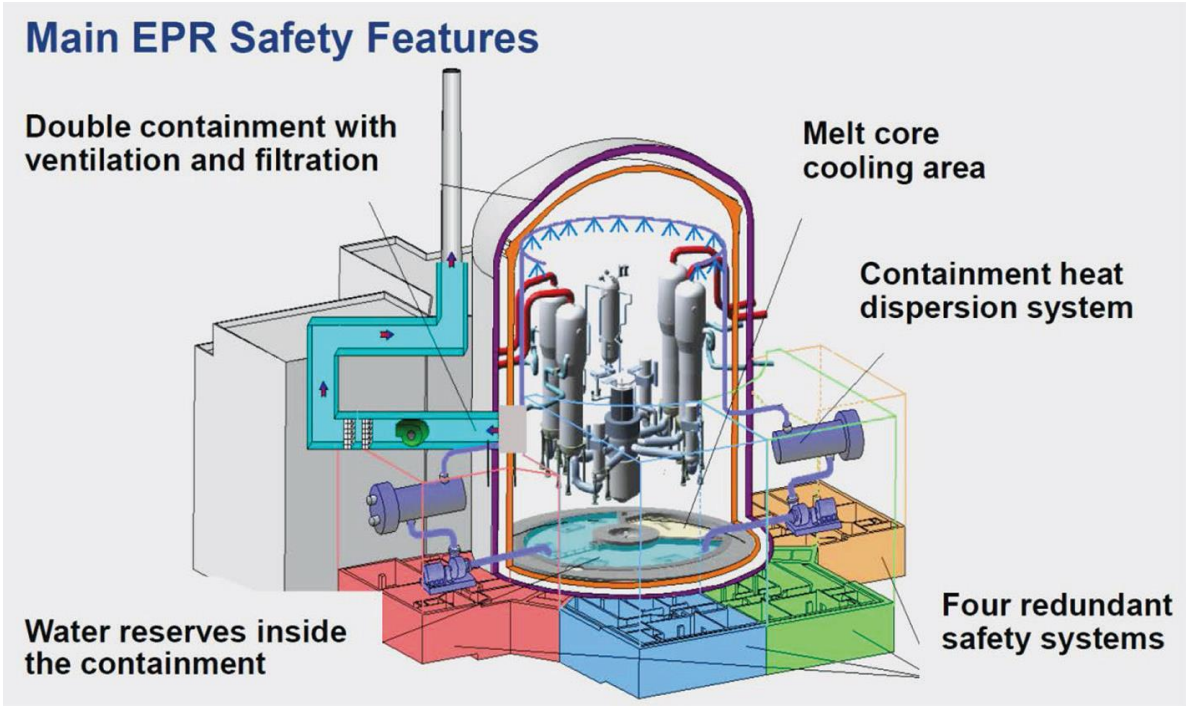
Rappelons que nos centrales de Tihange et Doel peuvent vivre 60 ans et plus !
Nous aurions donc tout le temps !

EPR European Pressurised Reactor – Evolutionary Power Reactor

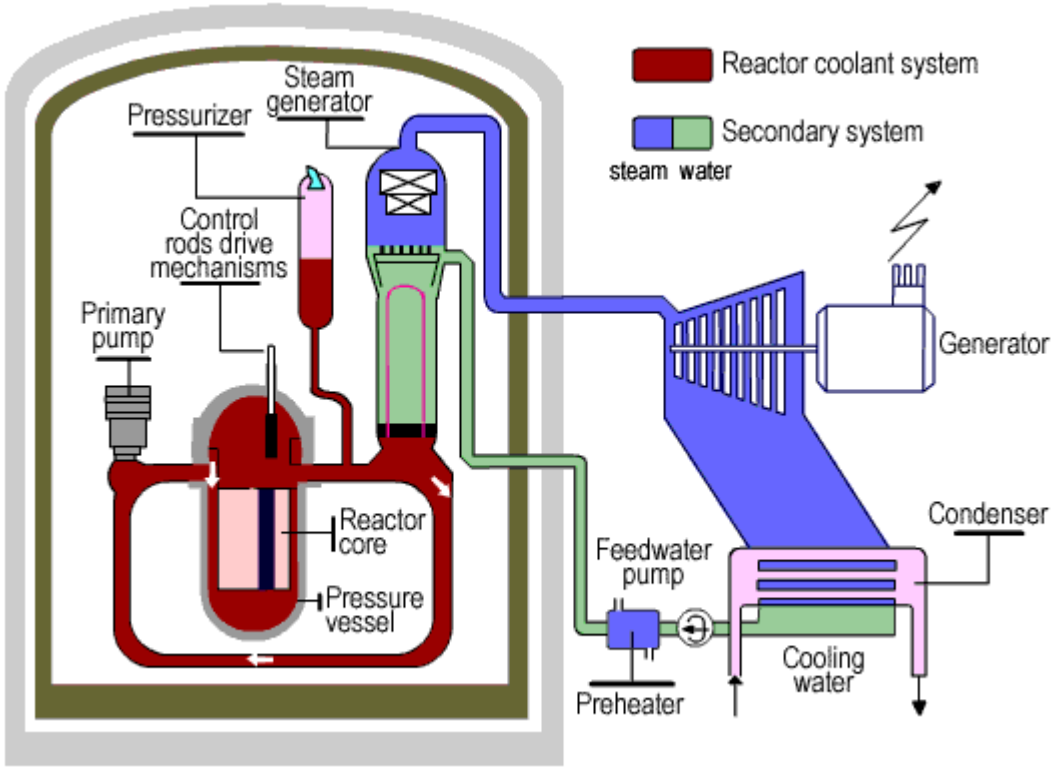
Difficulté: additionne toutes les mesures de sécurité. 4 projets seulement et donc pas d'effet d'échelle. Capital important ➔ intérêts !

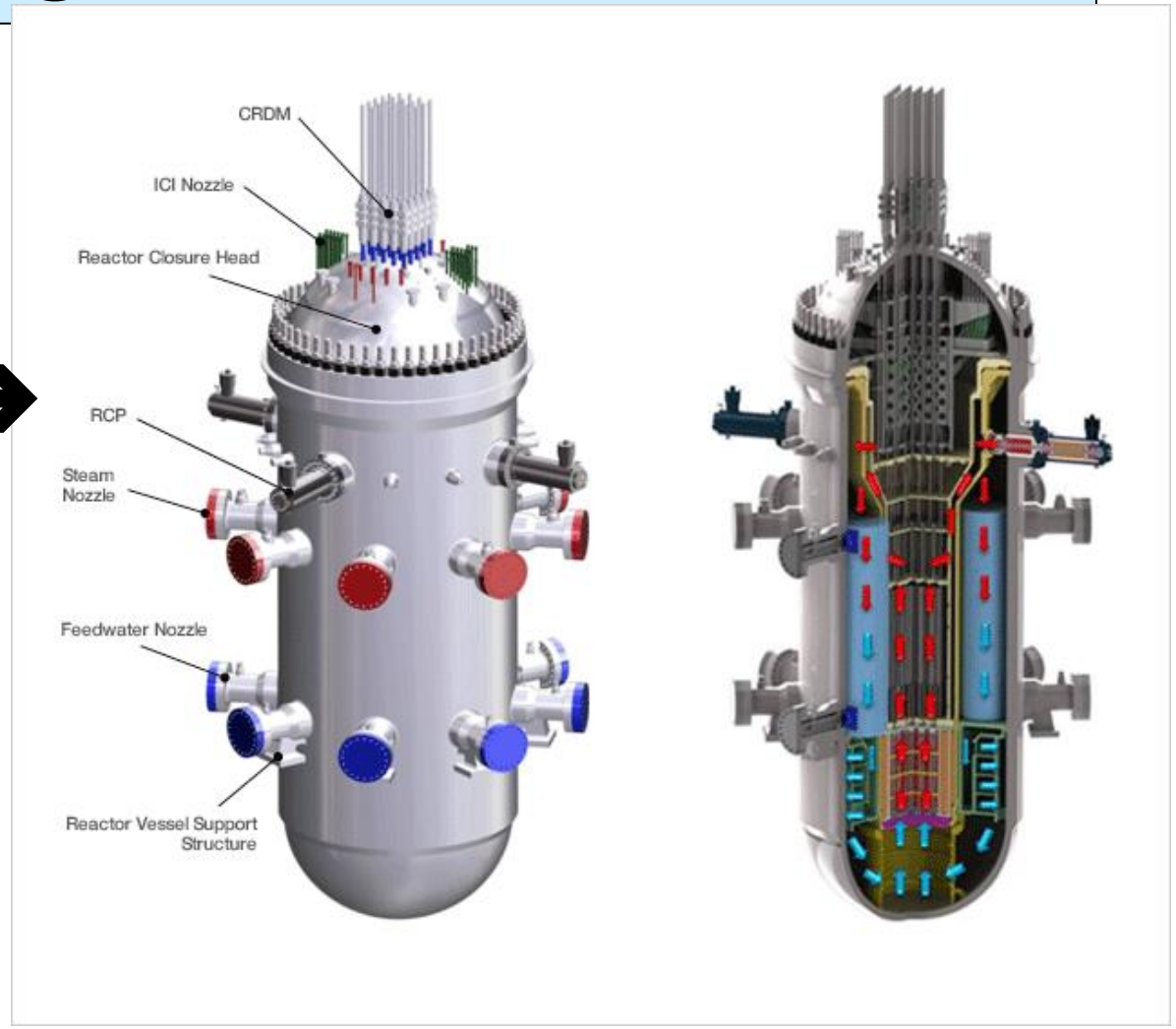
Flamanville (FR) / Olkiluoto (FI) / **Taishan 1** & 2 (China) / Hinkley Point C (UK)

⬇ 2022 12/2018 03/2019



SMRS = réacteurs modulaires
Tout le système est intégré



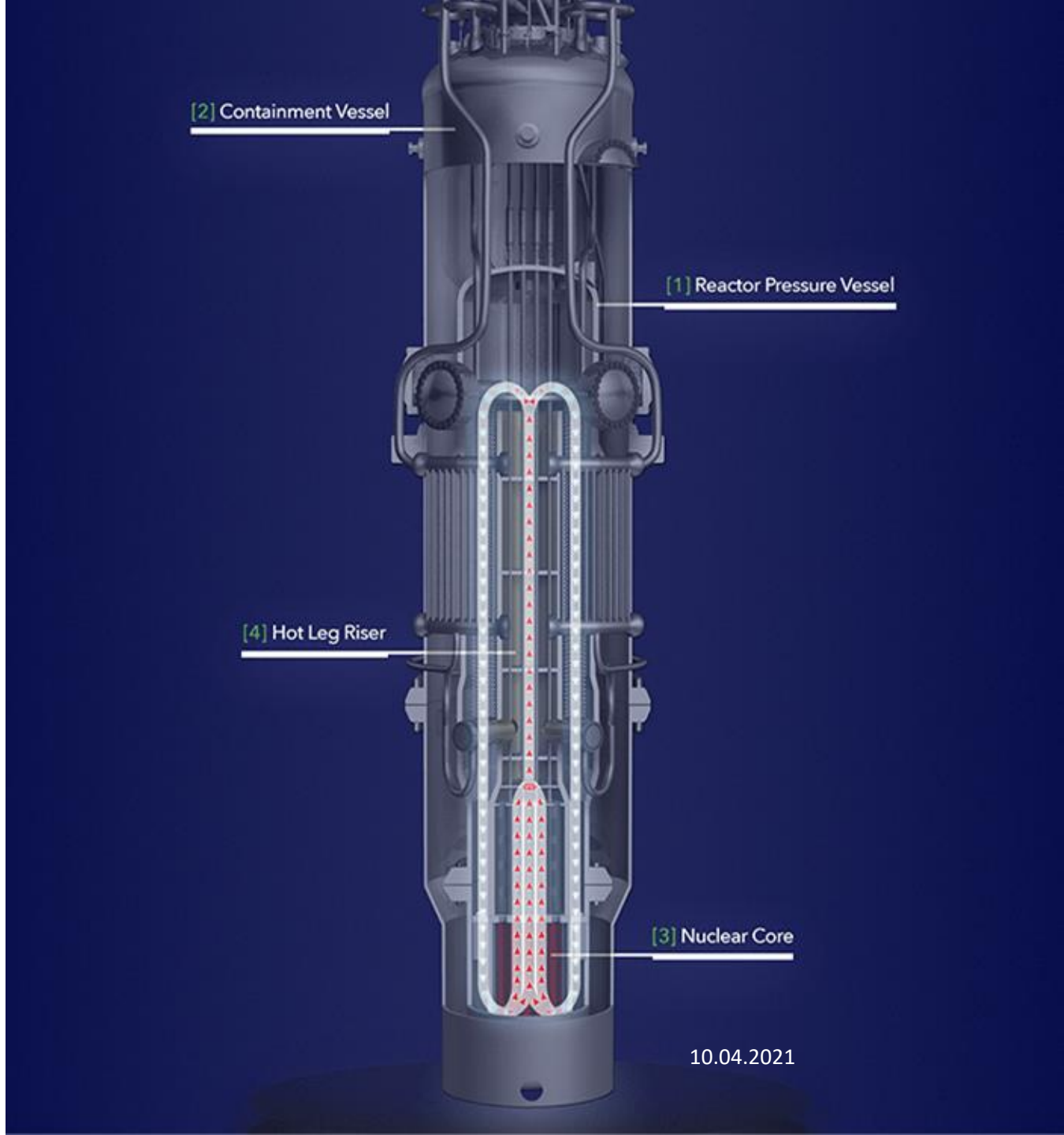


NUSCALE for 2025 ?

- Les SMR, (small modular reactor) sont des **‘mini-réacteurs’** qui se présentent sous forme de modules.

- De construction plus économique, ils offrent également **un maximum de flexibilité** pour s’adapter à la demande en électricité, par exemple sur **des sites industriels** ou dans des zones reculées.

- Licence NRC en 2020



Centrales nucléaires flottantes

10.04.2021

Positions prises par certains pays: nucléaire de 4ème génération

- Argentina*
- Australia*
- Brazil*
- Canada
- People's Republic of China
- Euratom
- France
- Japan
- Republic of Korea
- Russian Federation
- Republic of South Africa
- Switzerland
- United Kingdom*
- United States

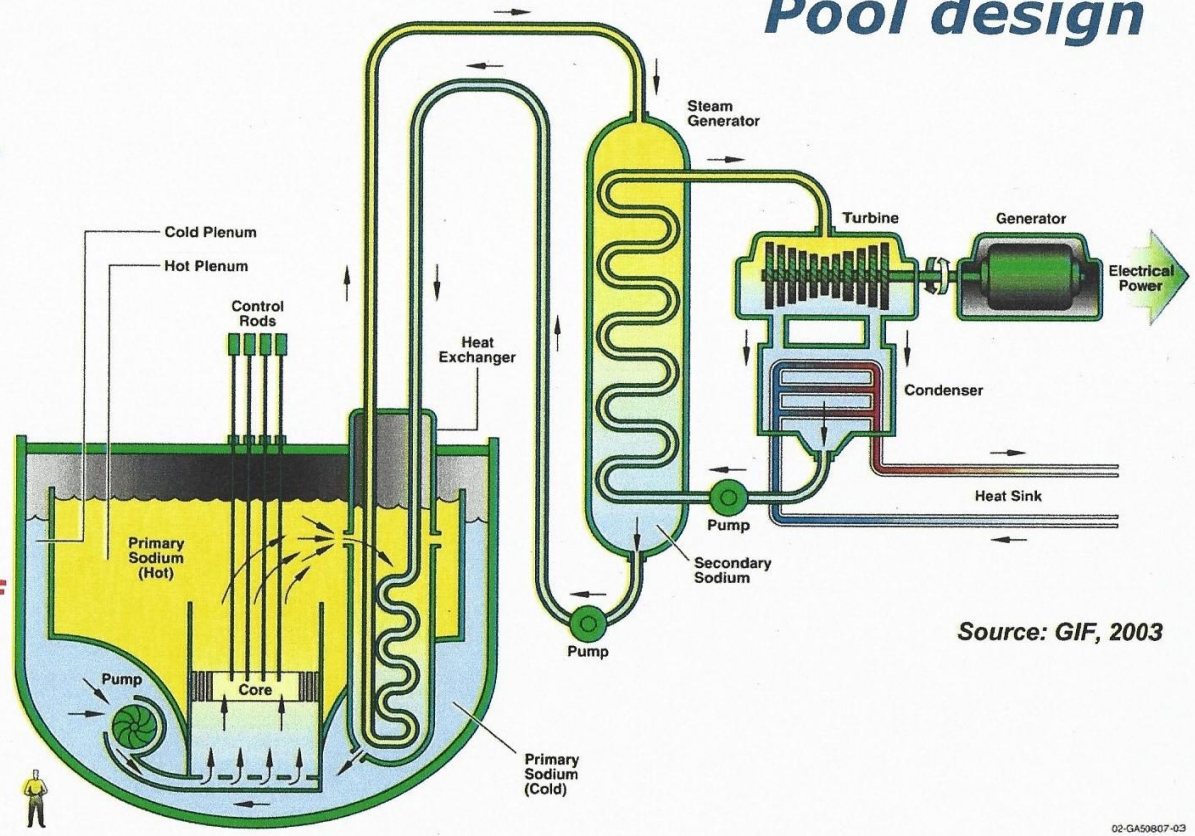
1/ *respect de l'environnement*
2/ *sûreté et fiabilité*
3/ *résistance à la prolifération et protection physique*
4/ *économie*

SFR (Sodium-cooled fast reactor)

- Coolant Na
- T_{out}: 550°C
- P: 50 – 1500 MWe
- Metallic fuel with pyro-processing or
- MOX fuel with advanced aqueous reprocessing

Advantages

- Waste minimisation and efficient use of the uranium resources



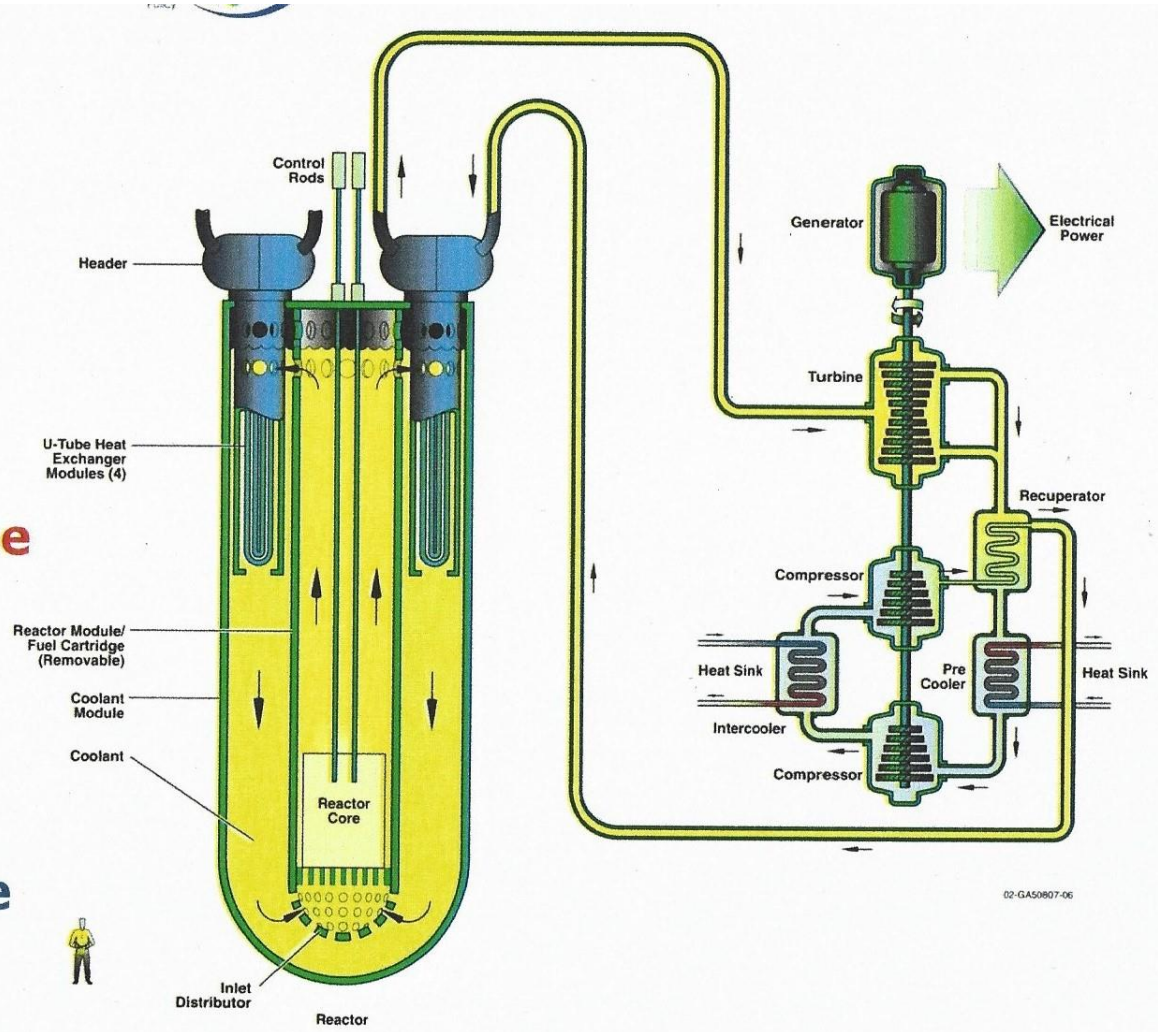
LFR (Lead –cooled fast reactor)

Characteristics

- Coolant Pb or Pb/Bi
- T_{out}: 550 - 800°C
- P: 50 - 1200 MWe
- Lifetime 15–30 years
- Cartridge core for regional reprocessing

Advantages

- Proliferation resistance of the long-living core
- Distributed electricity generation
- Hydrogen production
- High degree of passive safety



Source: GIF, 2003

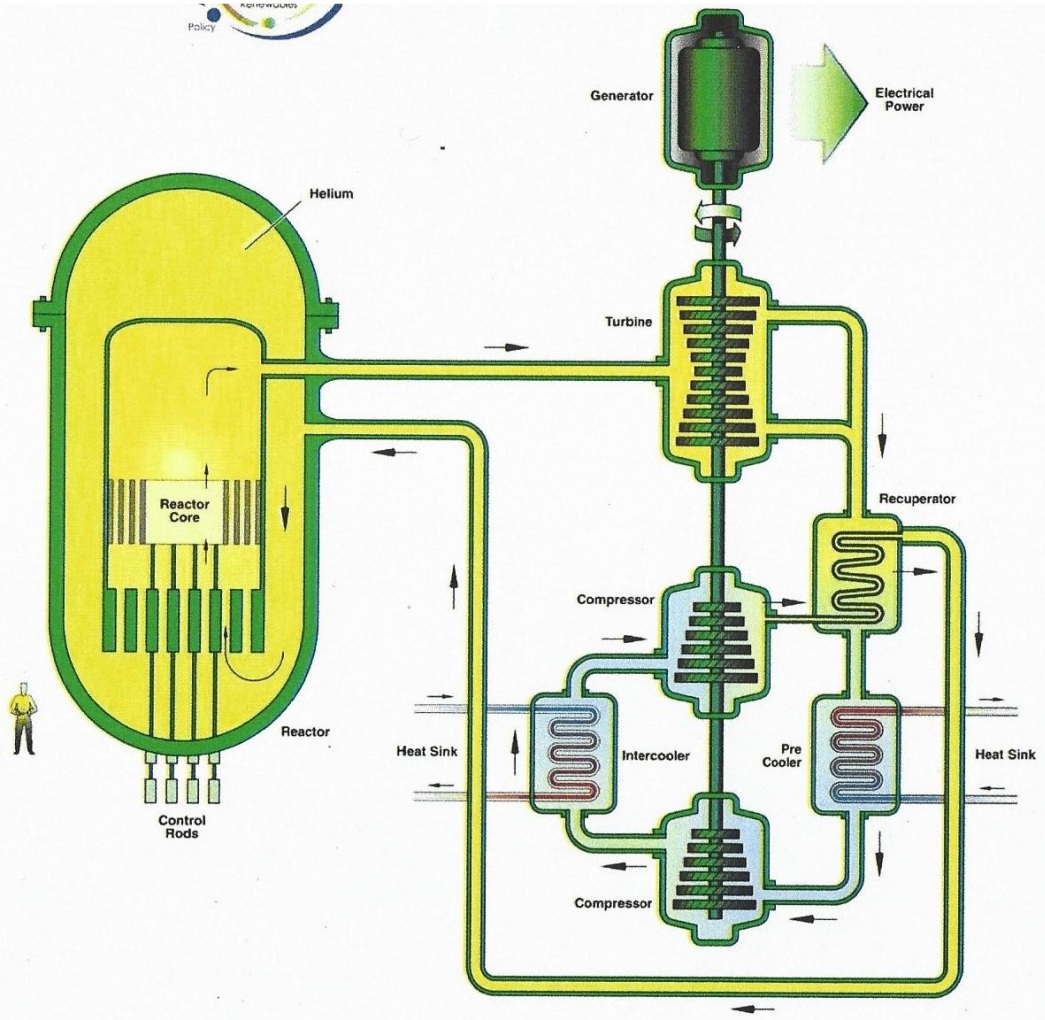
GFR Gas-cooled fast reactor

Characteristics

- Coolant He
- T_{out}: 850°C
- P: 300 - 600 MWe
- Direct gas turbine cycle

Advantages

- Waste minimisation and efficient use of the uranium resources



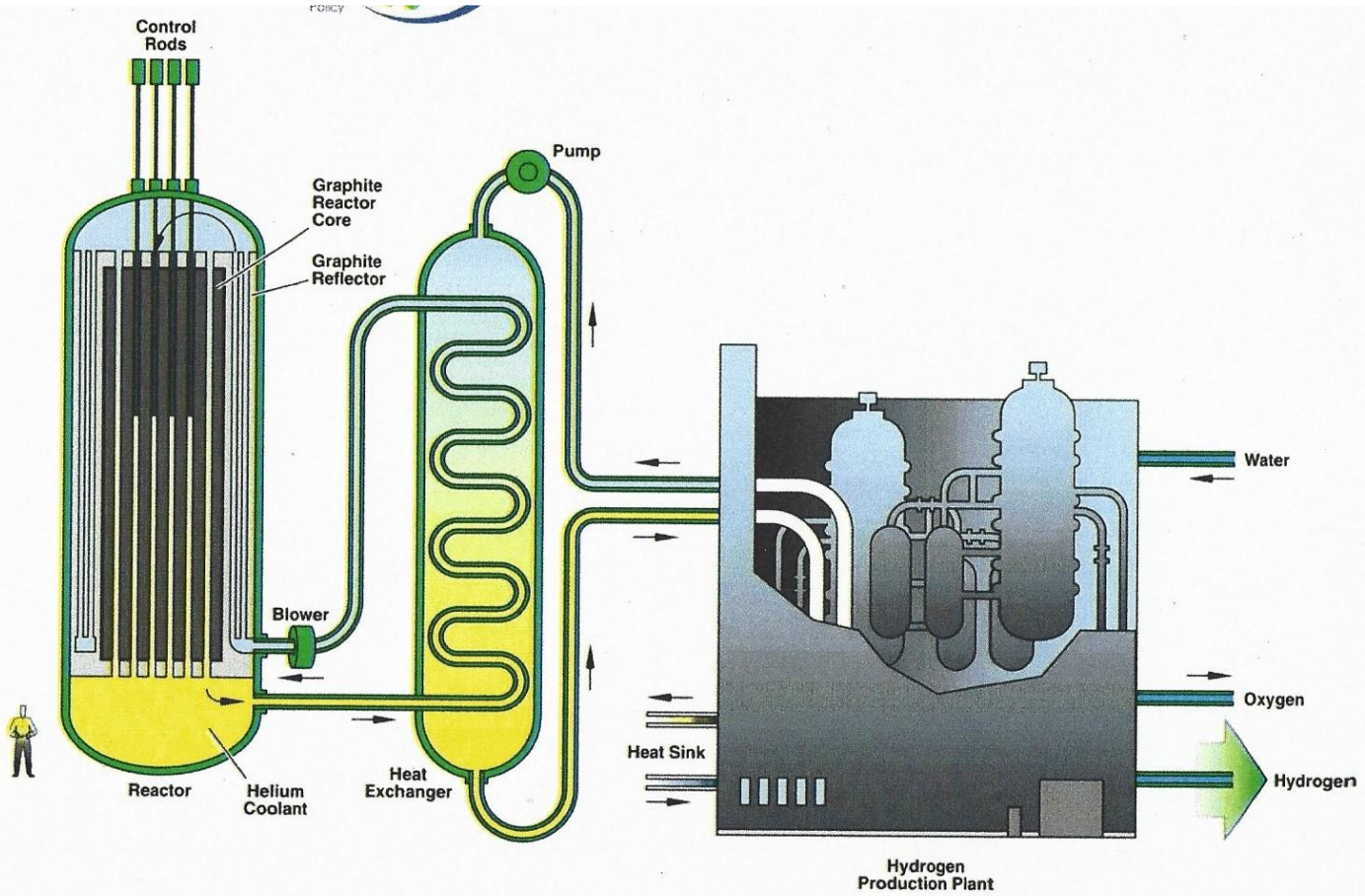
Source: GIF, 2003

VHTR Very high temperature reactor

- Coolant He
- T_{out} ≥1000°C
- P: 600 MWth

Advantages

- **Hydrogen production**
- High degree of passive safety
- High thermal efficiency
- Process heat applications



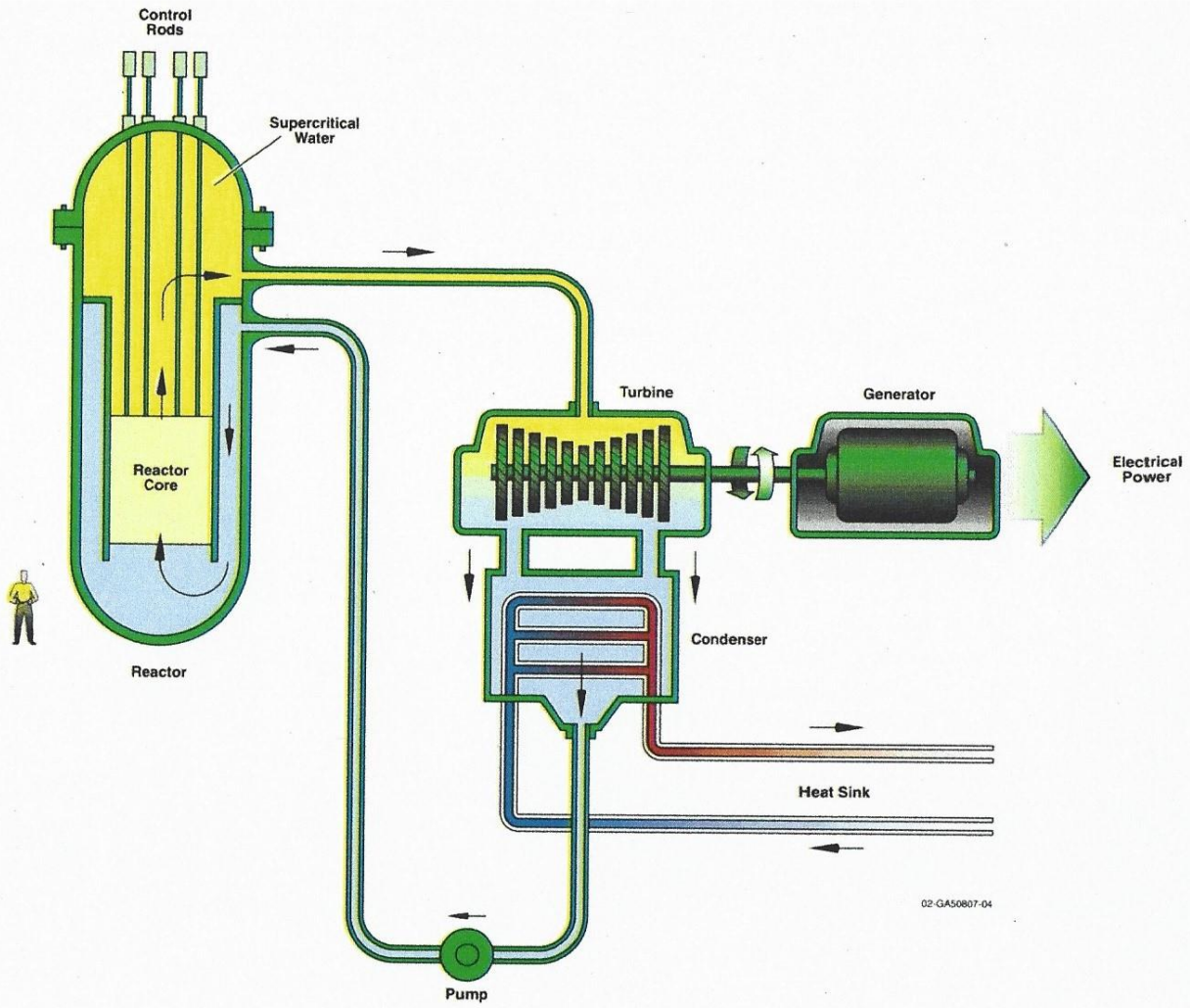
Source: GIF, 2003

SCWR Super-critical water reactor

- Coolant H_2O at super-critical condition
- T_{out}: 550°C
- P: 1700 MWe
- Simplified Balance-of-Plant

Advantages

- Efficiency almost 45% with excellent economics



Source: GIF, 2003

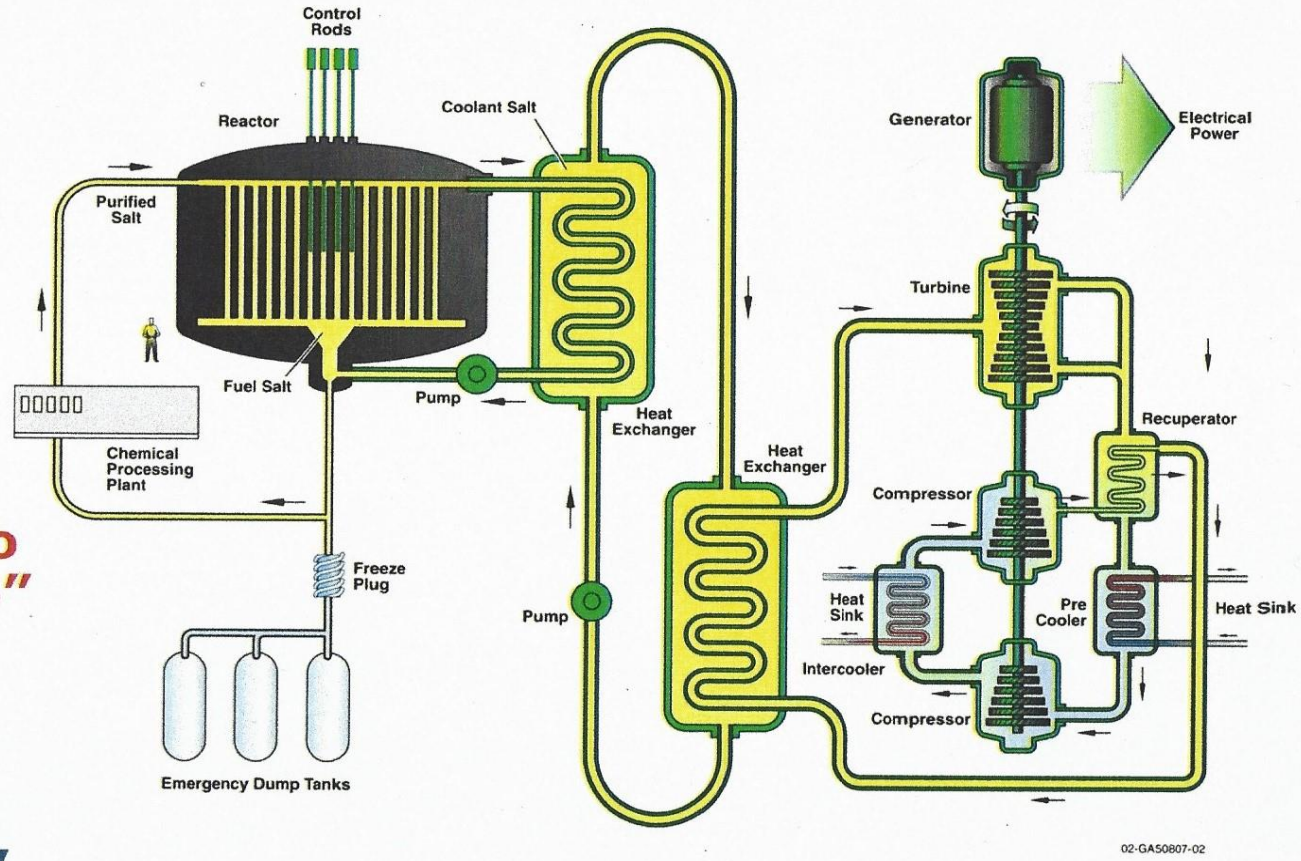
MSR Molten salt reactor

Characteristics

- Fuel / coolant: liquid fluoride salts
- T_{out}: 700 – 800°C
- P: 1000 MWe
- Low pressure (<0.5 MPa)

Advantages

- Transmutation up to a "ultimate burn-up"
- Avoidance of fuel development
- Proliferation resistance through low fissile inventory



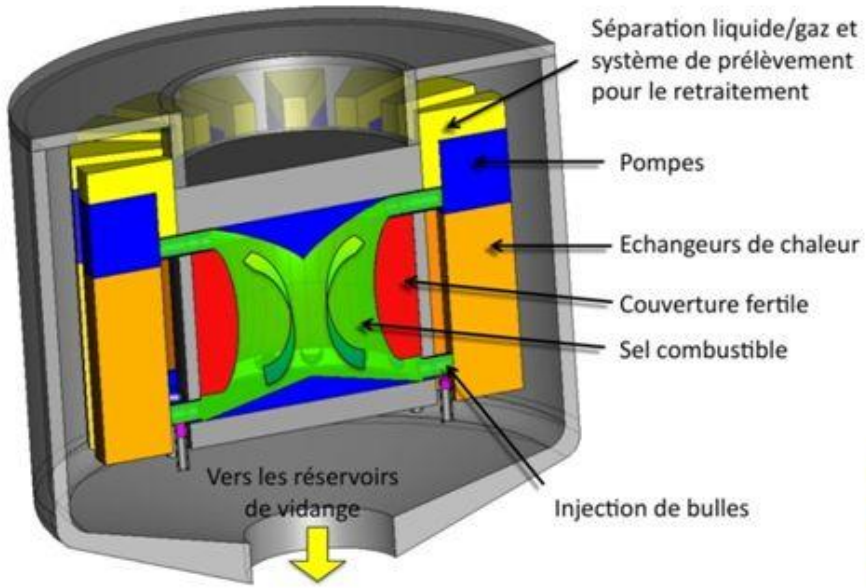
Source: GIF, 2003

Réacteurs à sels fondus et thorium

Le Thorium 232 présente de multiples avantages

- Plus abondant que l'Uranium,
- Pas besoin de l'enrichir.
- Ne peut pas produire de réaction en chaîne.
- Une centrale « sels fondus – Thorium » ne peut pas s'emballer, elle peut s'arrêter d'elle-même en cas de défaut de refroidissement.
- Les déchets sont radio toxiques seulement quelques siècles.
- Ces centrales « sels fondus – Thorium » peuvent "incinérer les déchets des centrales à Uranium, et le Plutonium militaire" !

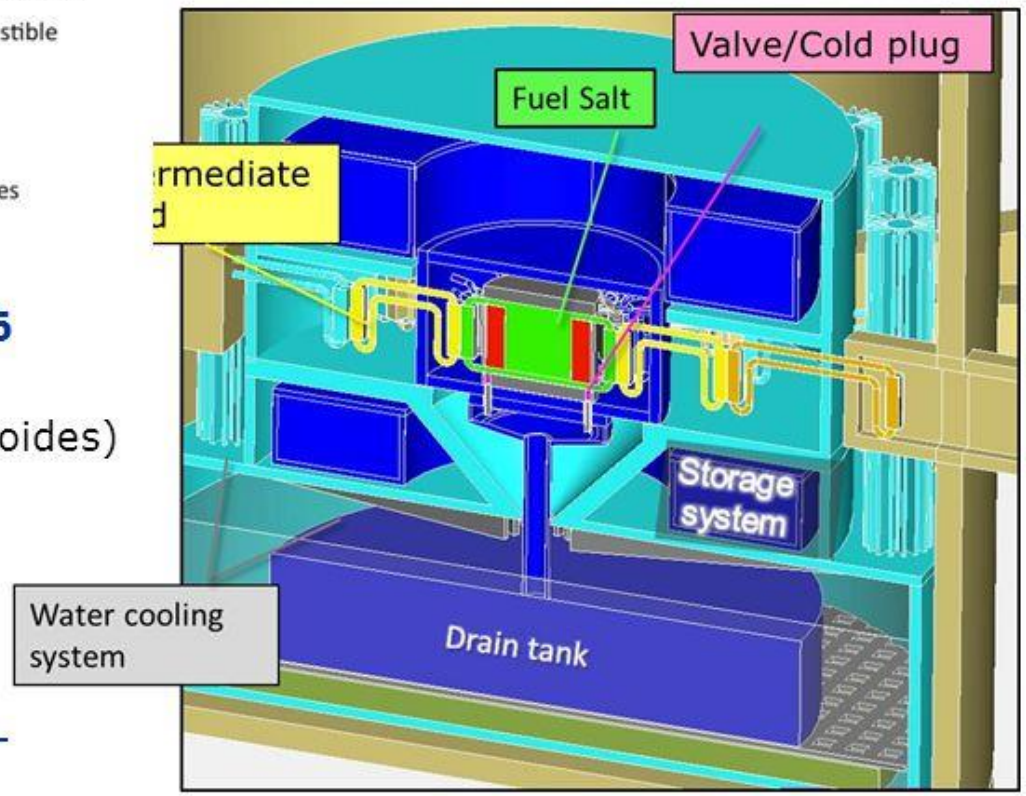
Concept de Molten Salt Fast Reactor (MSFR)



3 circuits :

- Circuit combustible
- Circuit intermédiaire
- Système de conversion

+ Réservoir de vidange



Circuit combustible = cœur + 16 boucles externes

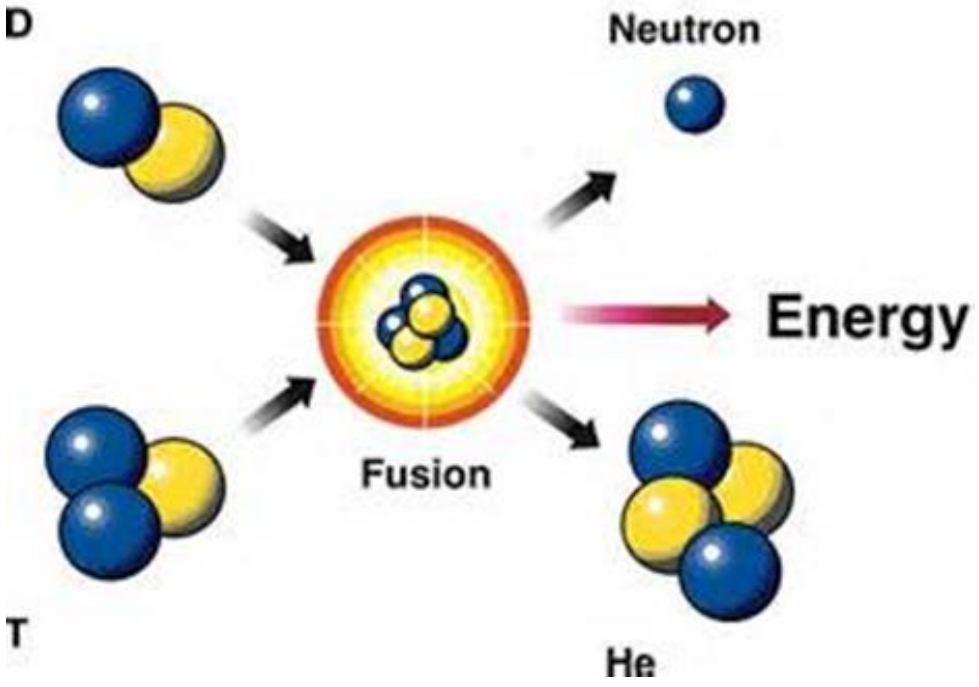
- Tuyaux (zones chaudes et froides)
- Séparateur bulles/sel
- Pompe
- Echangeur de chaleur
- Injecteur de bulles

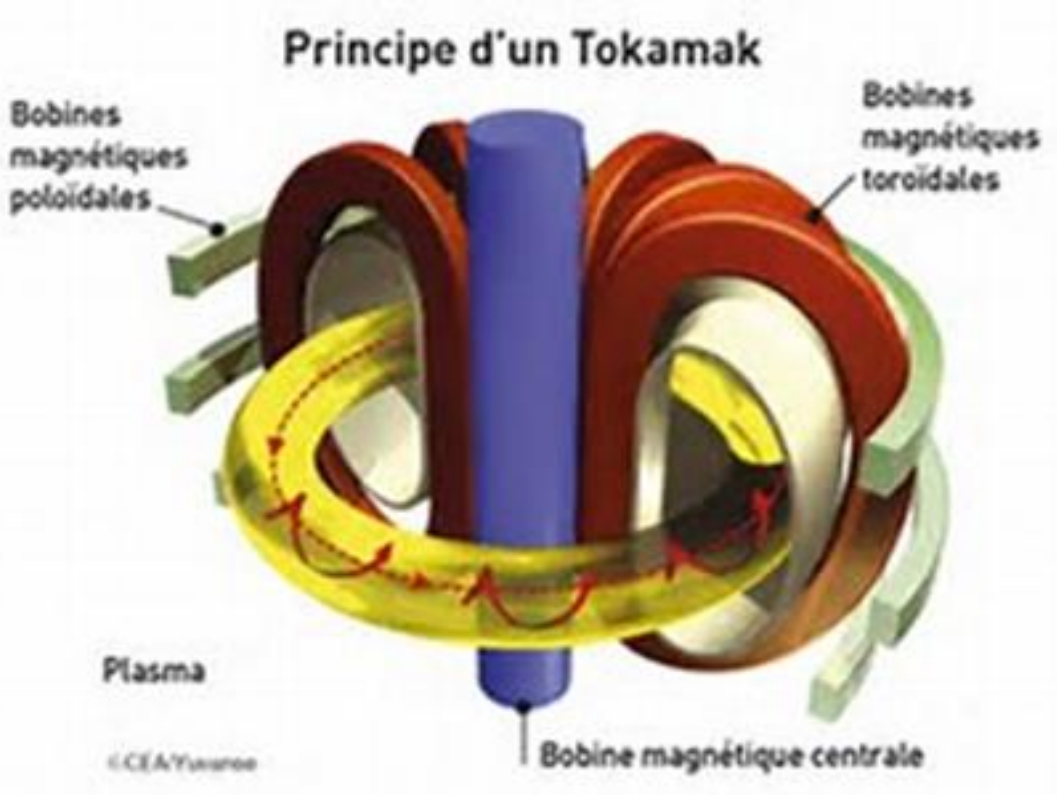
MYRRHA - SCK / CEN Mol (2023 ?)

ADS Accelerator Driven System

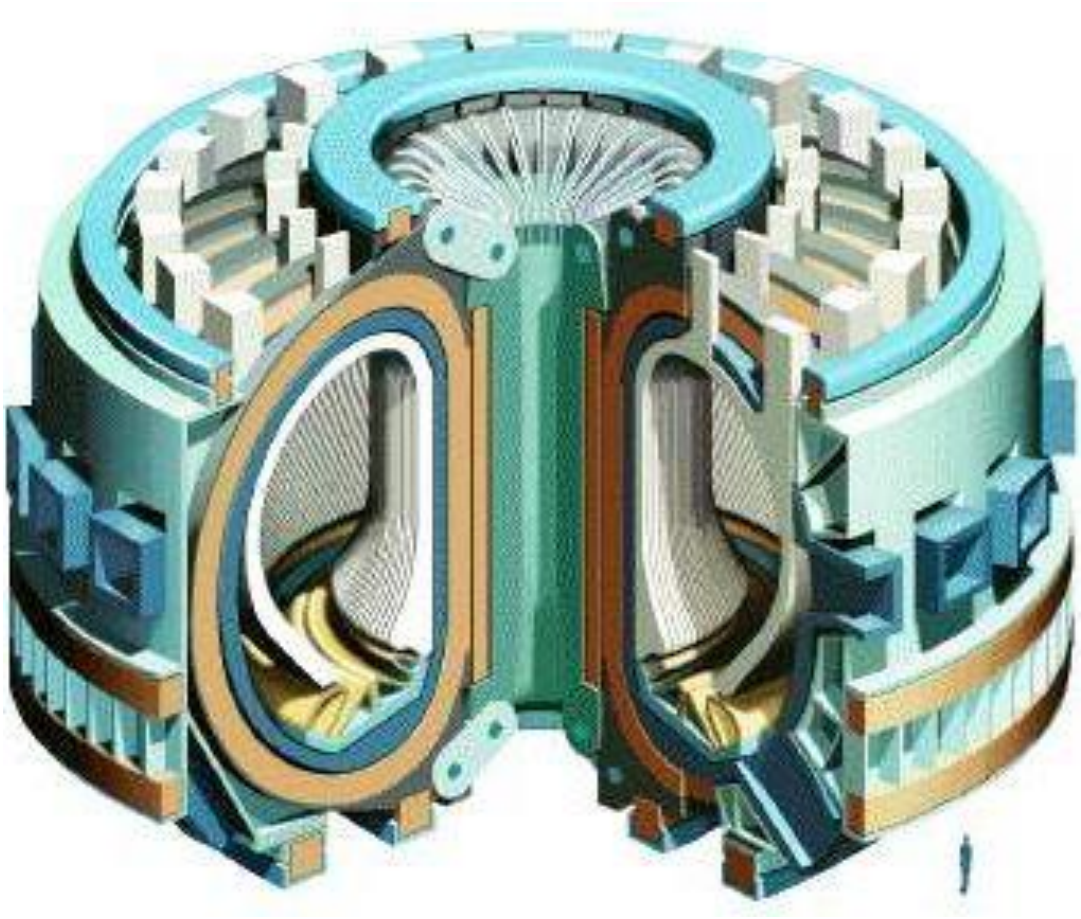
La fusion nucléaire est une réaction où deux noyaux atomiques légers s'assemblent pour former un noyau plus lourd Par exemple un noyau de deutérium et un noyau de tritium s'unissent pour former un noyau d'hélium, plus un neutron.

H (1 proton) D (1 proton; 1 neutron) T (1 proton; 2 neutron)





ITER (Cadarache)
International Thermonuclear Experimental Reactor



V. Pour terminer

Avantage du nucléaire : la densité d'énergie

Energie electrique pour une vie de consommation 280.000 kWh (80 ans)

1,22	kg Uranium (enrichit 2,5%)
100.000	kg Charbon
50.000	kg Gaz
70.000	kg Pétrole

15 minutes	de Tihange 3
15 jours	d'une éolienne terrestre (2,5 MW)
1 an	de 1.000 m² de PV

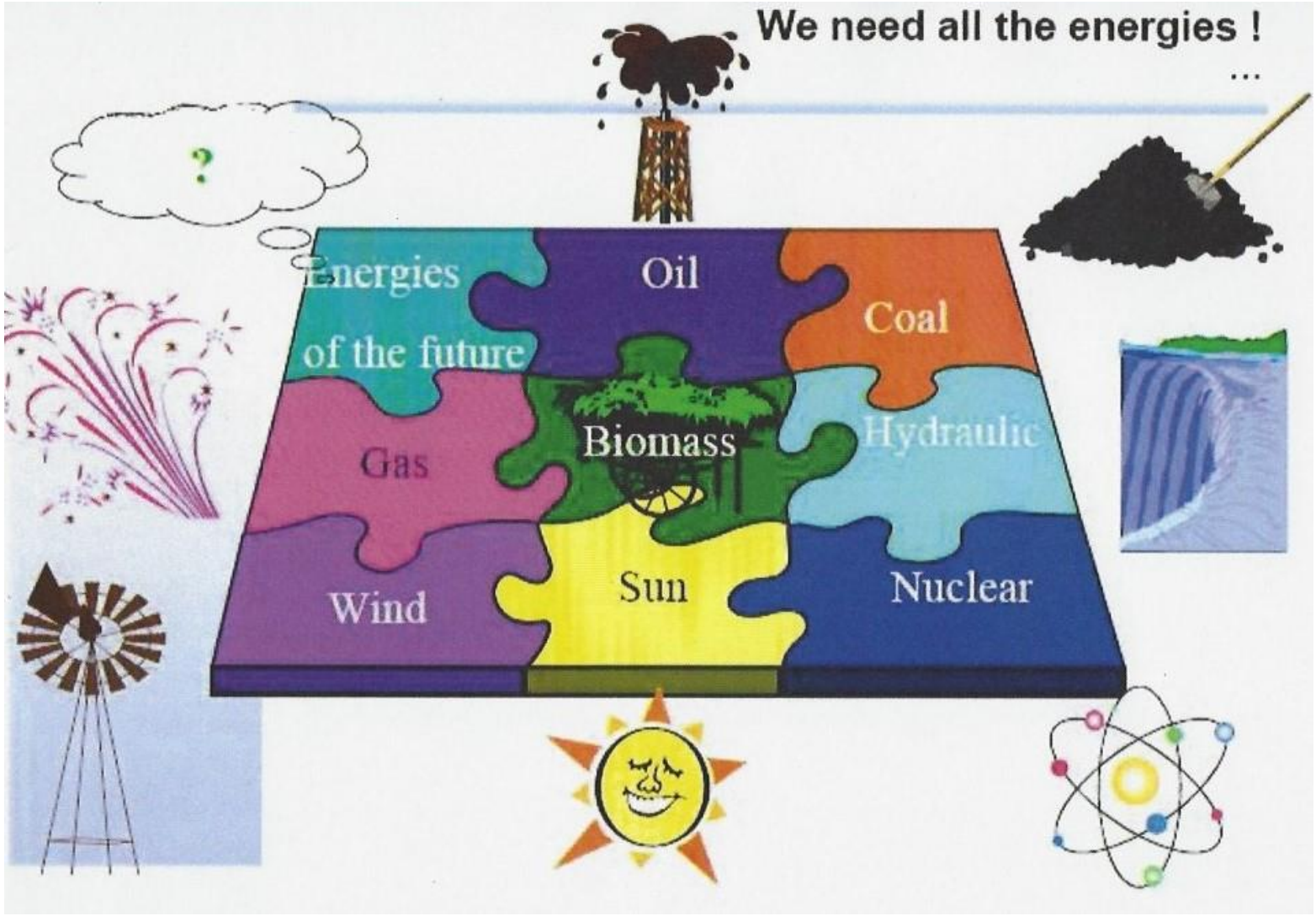
Conclusions 1

- **La Belgique a décidé de fermer des centrales nucléaires pour cause de méfiance à l'égard de cette technologie considérée comme « vieillissante ». On en garde cependant 2 ?**
- **Faut-il rejeter totalement une technologie d'avenir en pleine mutation capable de fournir de l'électricité à basse émission de gaz à effet de serre ; compétitive ; favorable à l'emploi ; … ?**
- **Pour les écologistes, le NUC n'est pas une « solution » mais un frein à la «transition » énergétique (danger 'du nuage', déchets, coût élevé (*faux*), CO2 (*faux*),)**
- **Peut-on abandonner la recherche nucléaire ? Notre société en a besoin pour l'énergie, la médecine, la transmutation des déchets radioactifs**

Conclusions 2

- **Les technologies de production d'électricité vert doivent se développer et se diversifier (rapidement) pour atteindre les 50 % voir 100 % de la production selon les écologistes ! Peu réaliste selon de nombreux experts vu les limitations intrinsèques. Des investissements importants (et subsides) sont nécessaires (10 à 30 B€).**
- **Les ENRi ont des limites et ne pourront pas satisfaire à tous nos besoins énergétiques.**
- **Il faut bien apprécier le caractère intermittent des ENRi et donc considérer le développement du stockage et les centrales au gaz**
- **Le gaz ne garantit pas notre indépendance énergétique et ne satisfait pas aux propositions du GIEC (CO_2). Il faudra l'abandonner rapidement,**

Conclusions 3

- **Les interconnexions entre pays voisins ne garantissent pas notre approvisionnement ni notre indépendance (Il faudrait une politique énergétique au niveau européen cfr. COVID-19)**
- **Beaucoup de scénarios du futur considèrent une augmentation de la consommation d'électricité !**
- **Plusieurs scénarios considèrent les délestages (dangers de black-out)**
- **L'augmentation de l'efficience énergétique remplacera-telle 30% de notre consommation (vœux pieux ?)**
- **Il est évident que l'électricité coûtera plus cher !**

Dans le monde, pour produire assez d'électricité: il faudra tout utiliser pendant longtemps! ➔ # à la réduction de CO2