

# Quel avenir pour le nucléaire au lendemain de l'accord de Paris ?

Université d'été de l'association

**« Sauvons Le Climat »**

Centre universitaire Condorcet

Le Creusot du 22 au 24 septembre 2016.

# Sauvons Le Climat : SLC

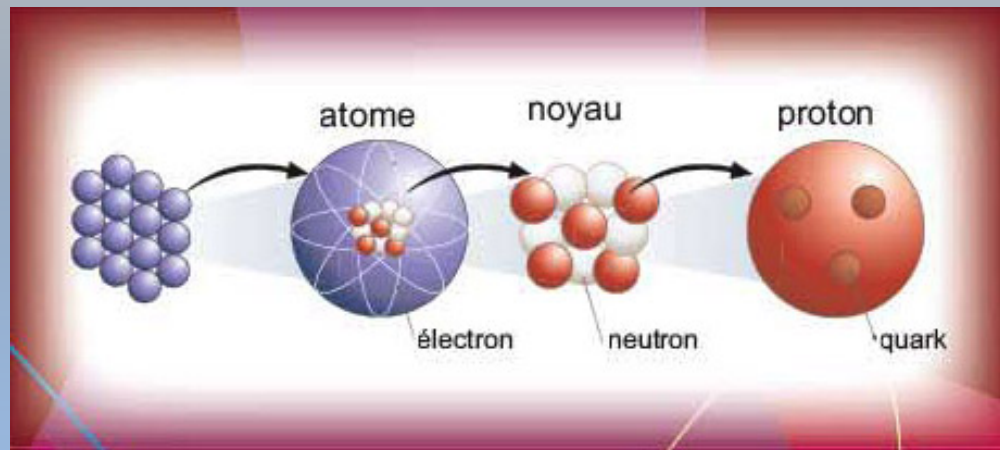
- **SLC** est une association qui s'est construite en 2005, autour de chercheurs (CNRS, CEA, Université...), ingénieurs, médecins, économistes...
- SLC s'est doté d'un Conseil Scientifique, d'un Conseil d'Administration et d'un bureau.
- Un Comité de Soutien comprenant plusieurs prix Nobel et membres de l'Institut et anciens ministres a également été créé.
- **Objectif** : promouvoir les moyens permettant la diminution des émissions de Gaz à Effet de Serre :
  - développer les énergies renouvelables particulièrement thermiques,
  - améliorer l'efficacité énergétique,
  - continuer à développer la production d'électricité décarbonnée en particulier le nucléaire.
- **Actions** : Publications de communiqués : site, média..., organisation de conférences, organisations d'université d'été.

# Universités d'été

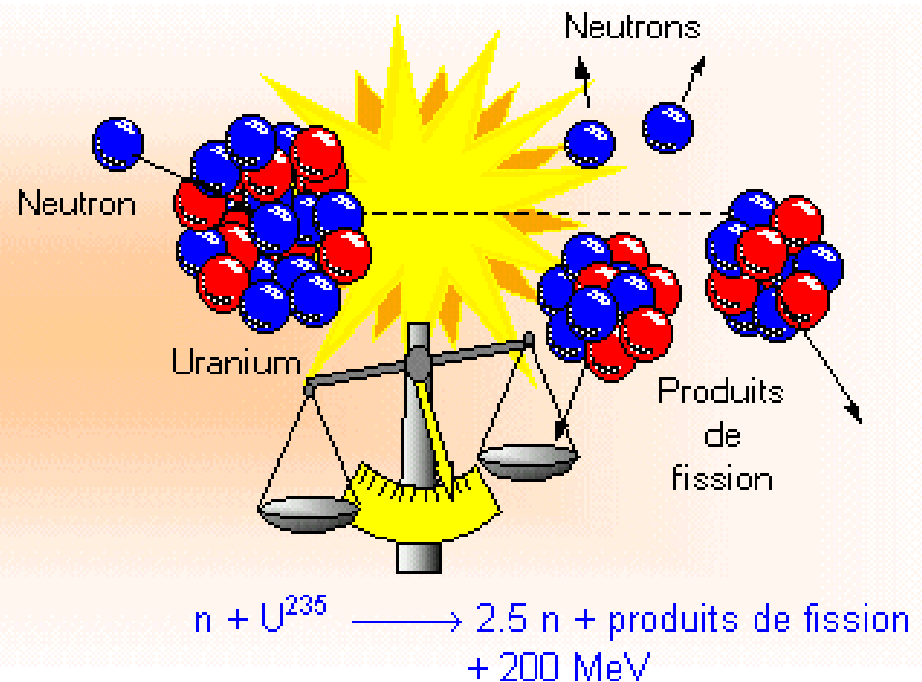
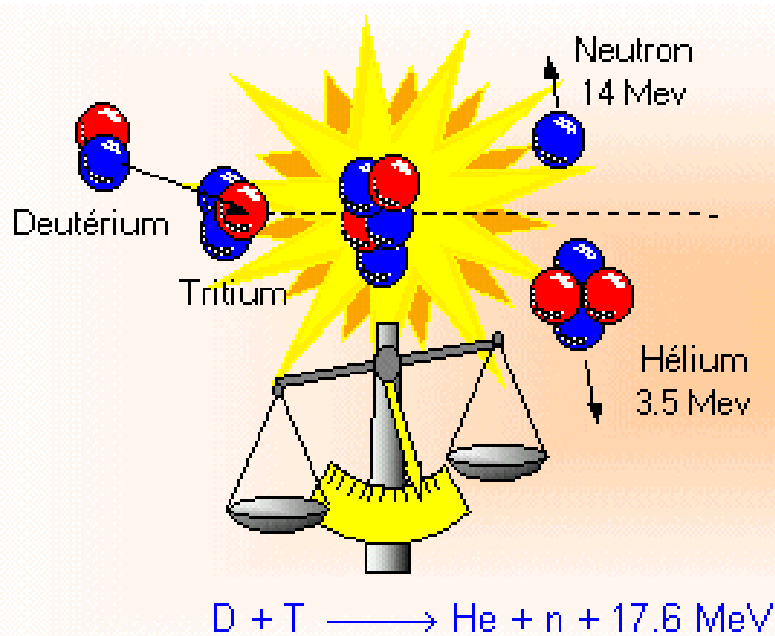
- 2008 : **Cabourg** ; Le changement climatique.
- 2009 : **Autrans** ; électricité solaire, agriculture et climat.
- 2010 : **Dijon** ; L'océan dans la problématique climat-énergie et politiques urbaines.
- 2011 : **Paris** ; Quel modèle énergétique pour l'Europe en 2030.
- 2012 : **Landéda** ; Biomasse, chauffage, stockage de l'énergie, réseaux.
- 2013 : **Aix en Provence** ; Énergie et santé
- 2014 : **Bordeaux** ; Le devenir de climat, pourquoi agir.
- 2015 : **Paris** ; Urgence climatique, quel objectif pour la COP21 ?
- 2016 : **Le Creusot** ; Quel avenir pour le nucléaire au lendemain de l'accord de Paris ?
- 2017 : Les Houches ; Adaptation aux changements climatiques.

# Interactions fondamentales

- **INTERACTION FORTE et INTERACTION FAIBLE**
- **INTERACTION ELECTROMAGNETIQUE**
- **INTERACTION GRAVITATIONELLE**



# Comparaison entre fusion et fission nucléaire



# Éléments fertiles, éléments fissiles



$^{238}\text{U}$  représente 99,3 % de l'uranium naturel. Les stocks français actuels permettraient de produire de l'électricité pendant plusieurs milliers d'années dans des réacteurs à neutrons rapides.



Le thorium est plus abondant sur terre que l'uranium.

# Exposé public par Yves Brechet.

- Haut commissaire à l'énergie atomique.
- Professeur de Physique à l'université Joseph Fourier de Grenoble.  
Spécialiste des matériaux en particulier la métallurgie.
- Membre de l'académie des sciences.

## Science et décision politique

# Yves Bréchet : quelques extraits...

- « **Blaise PASCAL** : Distinguer le croire, le savoir et l'agir »: le savoir doit éclairer l'agir mais ne saurait prétendre à être la source exclusive de légitimité de la décision.
- De nos jours, le problème n'est pas dans le trop de science, que dans l'oubli de science.
- Des décisions sont prises sans même que la communauté scientifique ne soit consultée.



# Yves Bréchet : quelques extraits, suite...

- Le prima est donné à la finance sur la technique.
- Le glissement du matériel vers l'immatériel provoque un dommage collatéral grave.
- L'indifférence au concept d'inertie temporelle s'accroît : on peut détruire en un an ce qui a mis 20 ans pour se construire.
- Plus notre industrie dépend de la technologie avancée et moins nos dirigeants en sont des acteurs directs.
- Il faut que le Politique prenne conscience de la différence entre un raisonnement scientifique et un témoignage, entre un avis et une opinion, entre une plaidoirie et une démonstration.
- Il faut une formation non pas aux sciences mais à l'esprit scientifique : à Science Po, à l'ENA, à l'Ecole de la Magistrature, dans les écoles de journalisme.

# Yves Bréchet : quelques extraits, suite et fin

- Pour perfuser dans le monde politique ce qu'est la démarche scientifique, on pense à un jumelage de l'académie des sciences avec les membres du parlement. Une initiative similaire avec les journalistes ou les magistrats serait la bienvenue mais reste à construire.
- S'il doit monter sur le ring, l'expert scientifique doit apprendre les bases qui y ont cours.
- Il n'est pas évident que nous puissions compter uniquement sur la solidité des argumentaires scientifiques pour contrebalancer le retour des sophistes.
- Il nous faudra former des lutteurs !

# L'énergie nucléaire peut-elle limiter le réchauffement climatique ?

Par Hervé Nifenecker

Le scénario Négatep de SLC a été développé pour la France par Pierre Bacher et Claude Acket. Même si ce scénario était appliqué en France, il ne modifierait que très peu les émissions de CO<sub>2</sub> mondiaux.

Aussi Hervé Nifenecker réuni une équipe internationale, il a dirigé une étude d'un scénario mondial. Un article scientifique a été publié :

**« *How much can nuclear energy do about global warming ?* »**

Int. J. Global Energy Issue. Vol. 40. N ½. 2017

par André Berger, Tom Blees, Francois-Marie Breon, Barry Brook, Philippe Hansen, Ravi Grover, Claude Guet, Weiping Liu, Frederic Livet, Herve Nifenecker, Michel Petit, Gérard Pierre, Henri Prévot, Sébastien Richet , Henri , Michel Petit, Gérard Pierre, Henri Prévot, Sébastien Richet , Henri Safa, Massimo Salvatores, Michael Schneeberger, Suyan Zhou.

*Une communication sera présentée à Pékin en décembre.*

# Que peut faire l'énergie nucléaire pour limiter le réchauffement climatique ?

Par Hervé Nifenecker

**Les 3 scénarios les plus crédibles ont été développés : Message de l'IIASA<sup>1</sup> :**

- **Supply** : développement de 7000 GWe entre 2060 et 2100.
- **Efficiency** : sortie du nucléaire et réduction de 40 % de la consommation énergétique plus CSC.
- **MIX** : scénario intermédiaire.

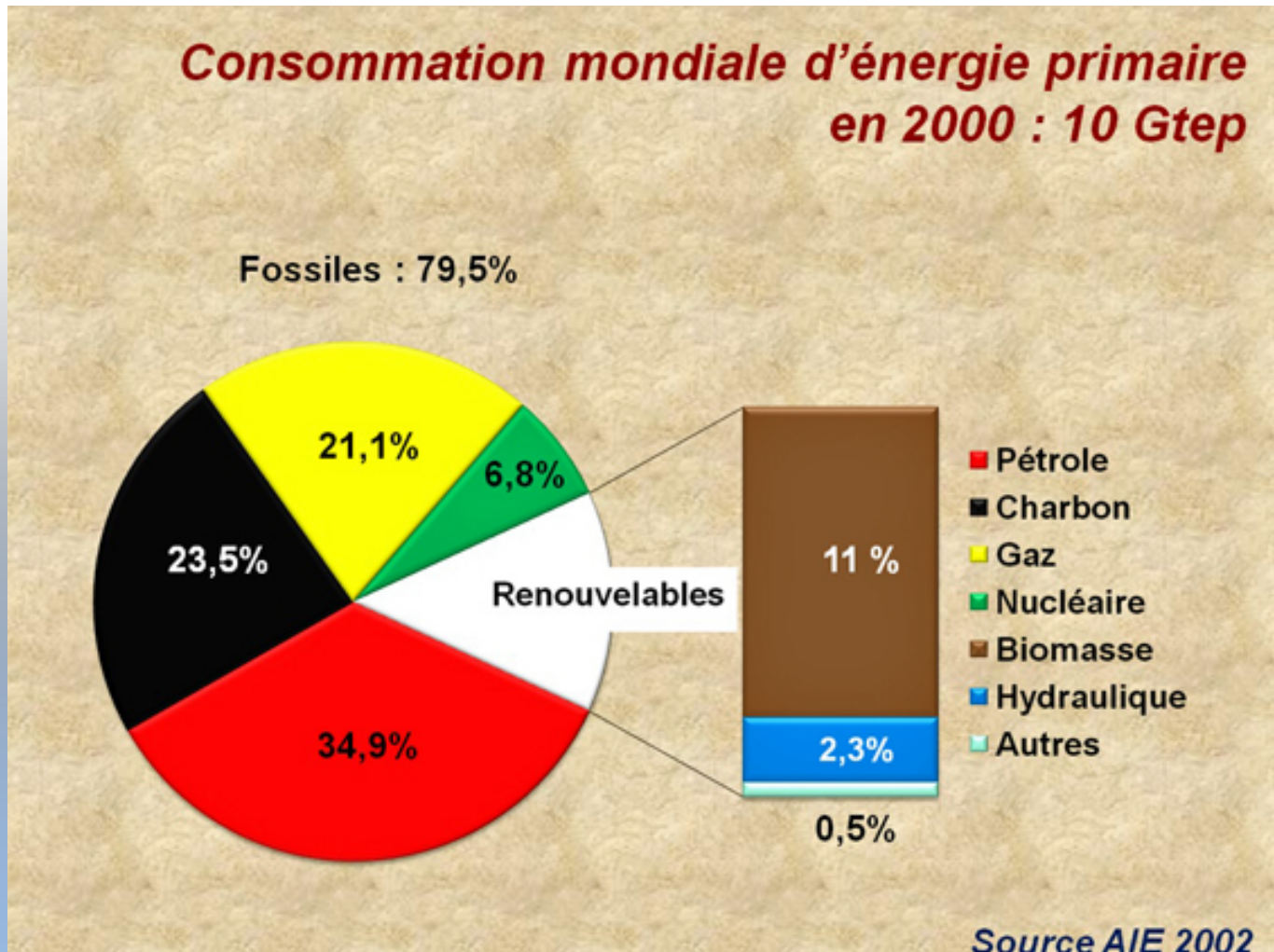
Proposition développer Supply dès 2020 pour atteindre 20 000 GWe en 2100.

Conséquences : développer des réacteurs surgénérateurs, diminuer la durée de retraitement des combustibles et augmenter le nombre de réacteurs CANDI dans le parc mondial.

Effort considérable mais possible.

<sup>1</sup> International Institute for Applied Systems Analysis (Austria)

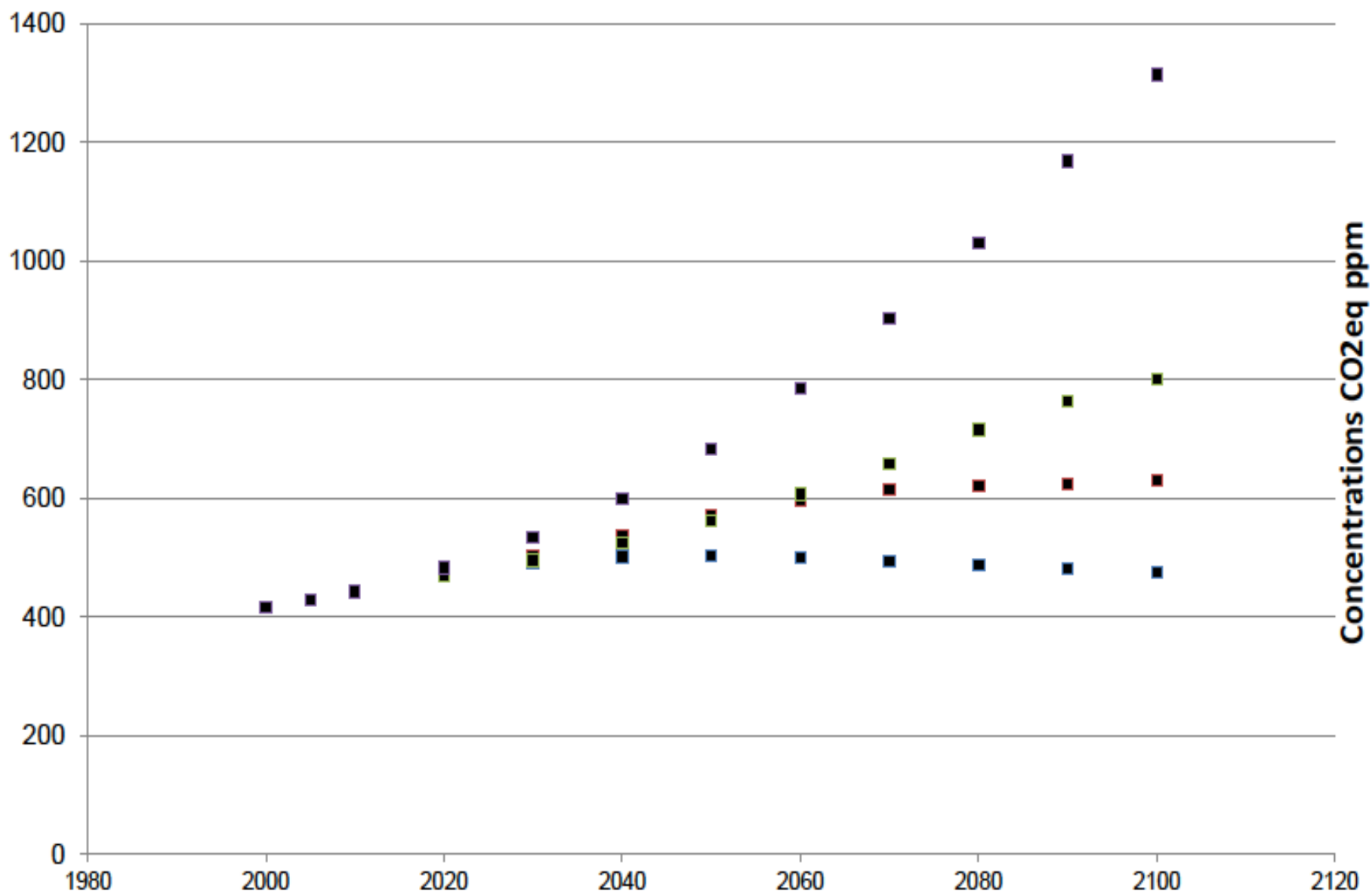
# Émissions de CO<sub>2</sub> mondiales .



# Problématique.

- **Les données: démographie :**
- **Valeurs initiales: PIB, Mix électrique par pays**
- **Objectifs:**
  - o Climatiques.
  - o Energétiques.
  - o Economiques : croissance ?
  - o Sociaux : réduction des inégalités ?
- **A quoi ça sert?**
- **Eventail des possibles**

■ RCP 2,6 ■ RCP 4,5 ■ RCP 6 ■ RCP 8,5



| Forcing | conc CO2 | conc CO2eq | temp inc | cumulative |
|---------|----------|------------|----------|------------|
| W/m2    | ppm      | ppm        | °C       | Gt CO2     |
| 2,5-3   | 350-400  | 445-490    | 2-2,4    | 350-950    |
| 3-3,5   | 400-440  | 490-535    | 2,4-2,8  | 950-1500   |
| 3,5-4   | 440-485  | 535-590    | 2,8-3,2  | 1500-1950  |
| 4-5     | 485-570  | 590-710    | 3,2-4    | 1950-2600  |
| 5-6     | 570-660  | 710-855    | 4-4,9    | 2600-3250  |
| 6-7,5   | 670-790  | 855-1130   | 4,9-6,1  | 3250-5250  |

| RCP  | conc    |
|------|---------|
| W/m2 | CO2 equ |
| 2.6  | 475     |
| 4.5  | 630     |
| 6    | 800     |
| 8.5  | 1313    |



# Scénarios.

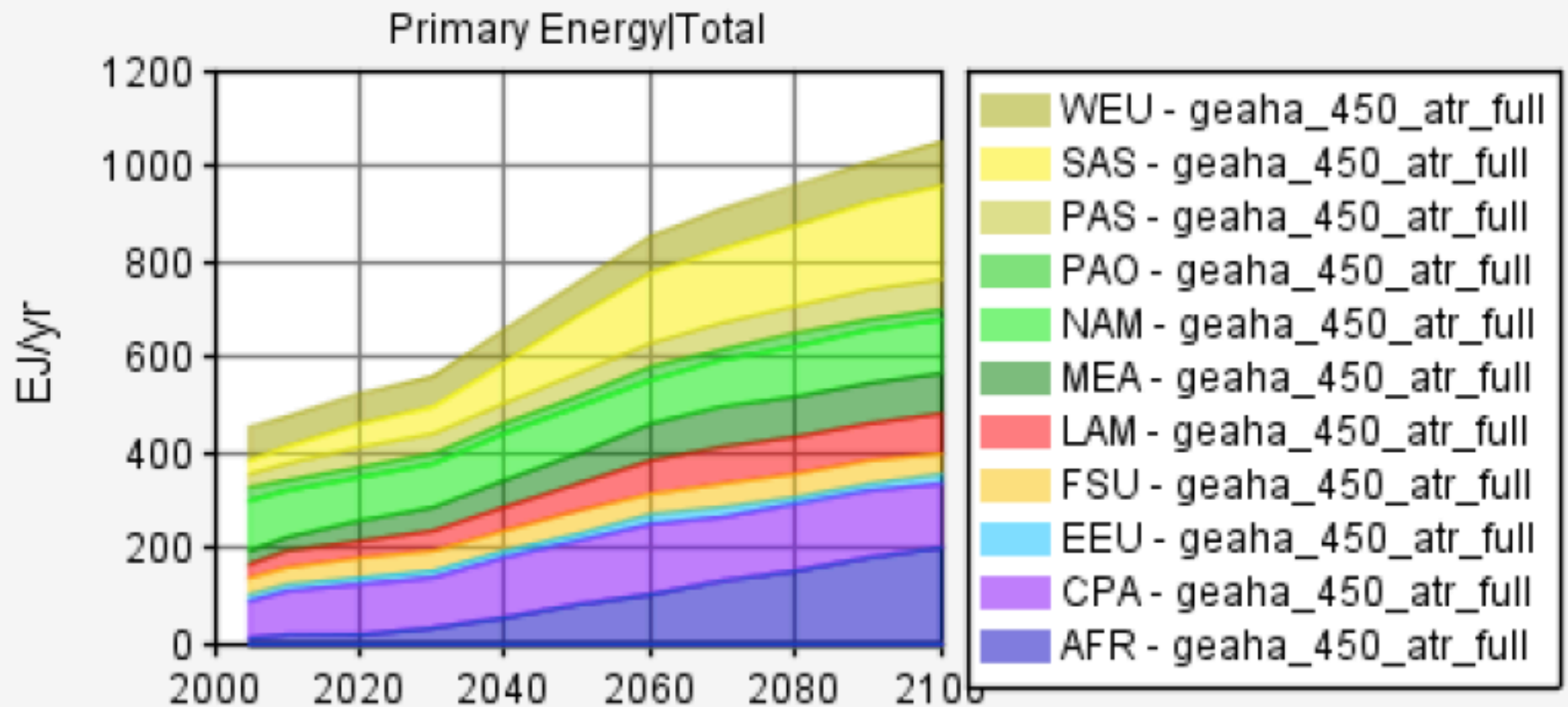
**Les scénarios les plus efficaces proposent soit :**

- De très fortes diminutions de consommations énergétiques.
- De très grandes quantités captées du CO<sub>2</sub> émis.
- Un développement important des énergies renouvelables.
- Un développement du nucléaire à partir de 2060.

**Le scénario exposé par Hervé Nifenecker propose principalement de développer le nucléaire le plus rapidement possible.**

1eJ =  $10^{18}$  Joules=277 TWh= 24 Mtep

## MESSAGE Supply



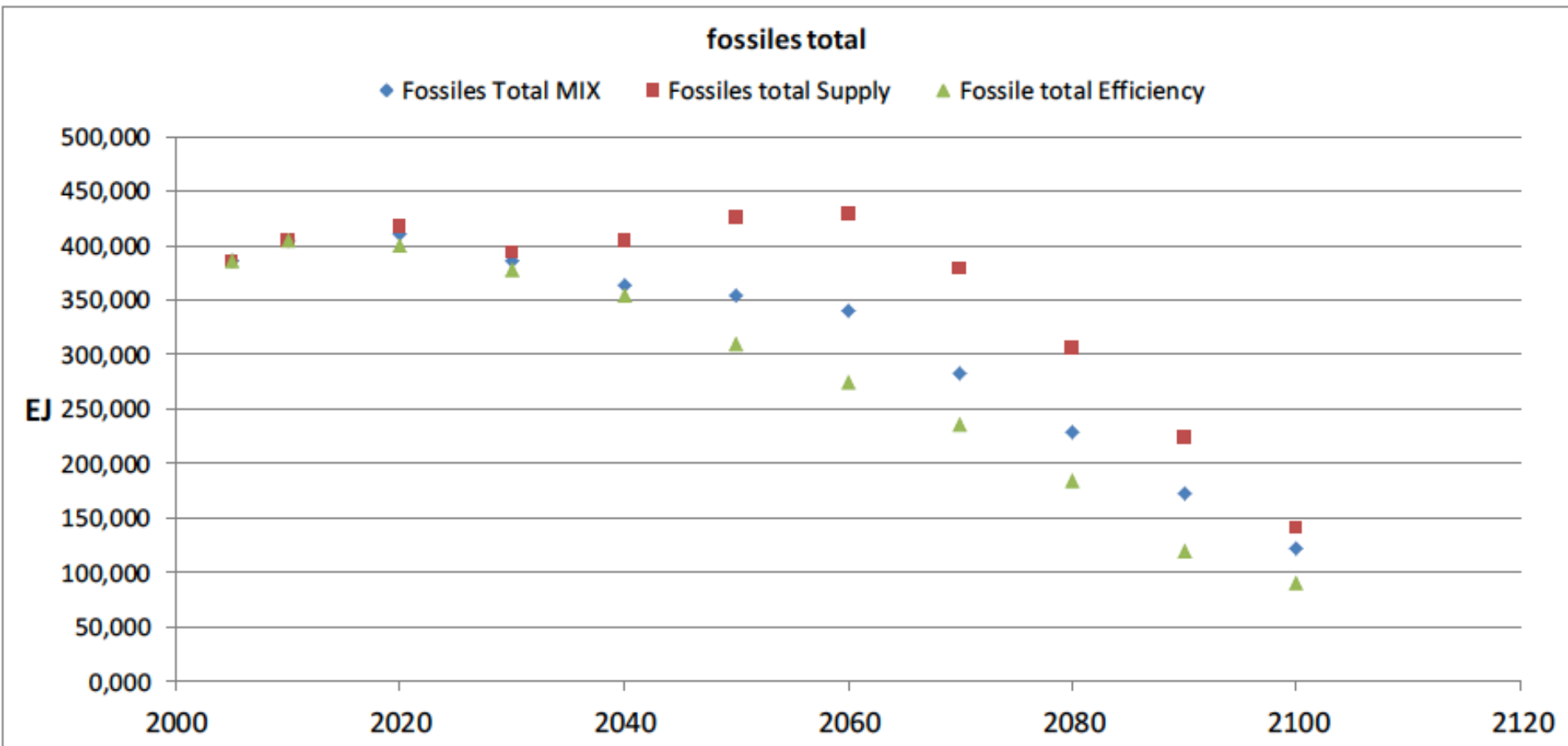
# Faut-il oser le nucléaire pour « Sauver Le Climat » ?

- Partir du scénario « Message Supply. » qui contient une rapide accélération du nucléaire à partir de 2060.
- Décaler ce démarrage en 2020.
- Commencer avec des réacteurs REP (REB) et CANDU pour fournir de l'énergie et le plutonium nécessaire à la construction des surgénérateurs.
- Utiliser le nucléaire pour remplacer les fossiles pour la production d'électricité, puis de chaleur, enfin dans les transports (véhicules électriques et hydrogène).

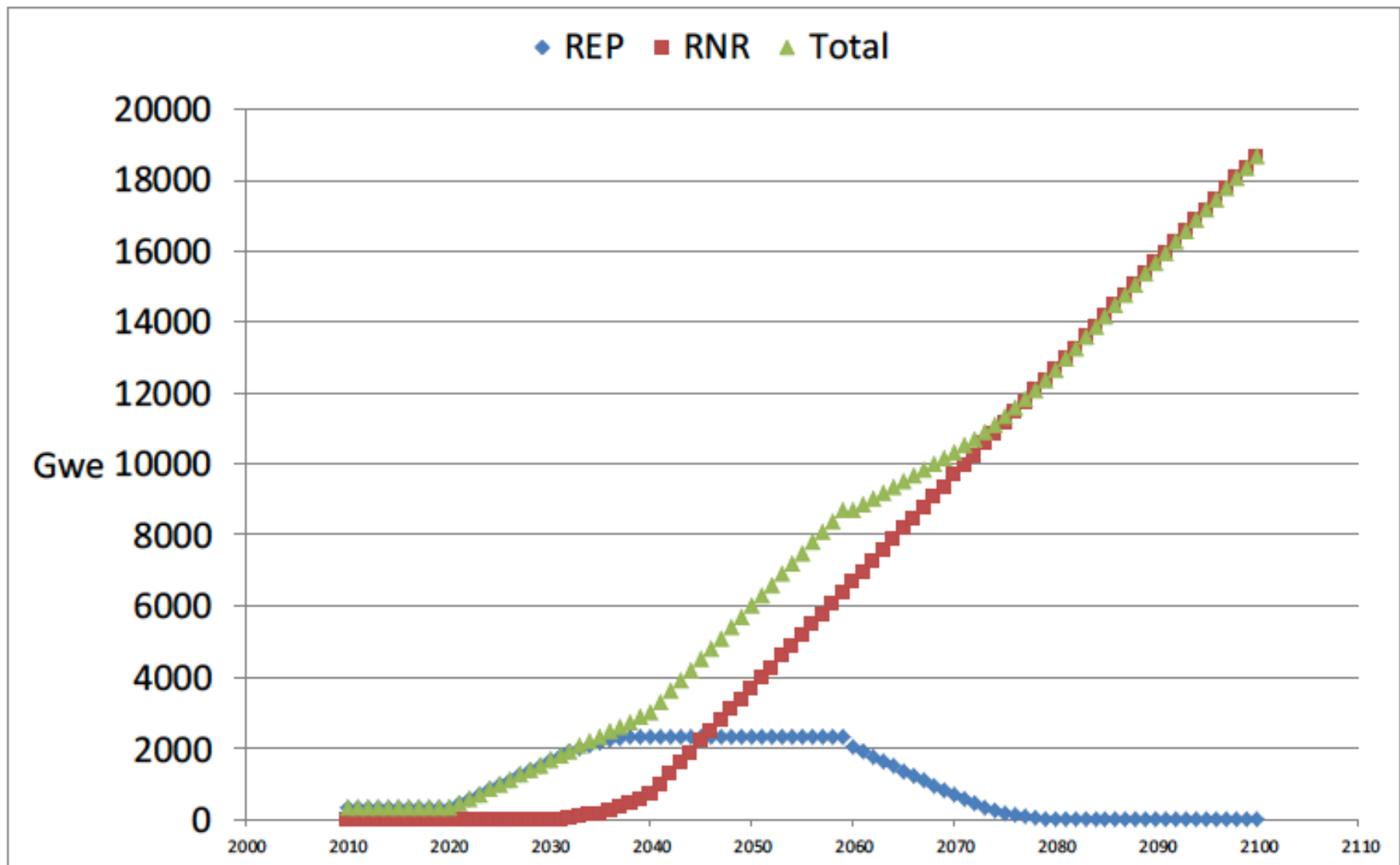
# Oser le nucléaire :

- Au plan économique, il suffirait que tous les pays de l'OCDE ainsi que la Chine, la Russie et l'Inde conduisent pendant 30 ans un effort économique similaire à celui réalisé par la France entre 1975 et 2000 pour que l'humanité puisse répondre à tous ses besoins en énergies décarbonées.
- Le nucléaire impliquant, bien plus que les énergies renouvelables, le tissu industriel et scientifique des pays concernés, il deviendra un facteur majeur de développement pour les décennies à venir.
- Dans une seconde phase, c'est-à-dire dès que le stock de plutonium l'autorisera, l'étude prévoit que l'on construira des réacteurs de types « surgénérateurs » ce qui permettra de disposer de plusieurs millénaires d'approvisionnement en matières fissiles.
- L'utilisation de ces surgénérateurs permettra de réduire le volume de déchets à stocker par un facteur 100.
- Si le programme proposé débutait dès 2020, les actions prévues à terme pour réduire la quantité excessive de gaz carbonique qui restera contenue dans l'atmosphère pourraient ne pas être nécessaires.

# Diminution des fossiles.



# Scénario tout nucléaire.



# Le projet « ASTRID »

**ADVANCED SODIUM TECHNOLOGICAL REACTOR FOR INDUSTRIAL  
DEMONSTRATION**

**Par Nicolas DEVICTOR**

Motivations :

- Économiser les ressources.
- Indépendance énergétique.
- Stabilité économique.
- Réduction de la quantité de déchets.
- Optimisation des stockages.
- Acceptabilité du public.

# Le projet « ASTRID »

Le système choisi est le SFR : « Sodium-cooled fast reactor », car de l'avis de Devictor, c'est :

- Le seul système présentant une maturité suffisante pour la réalisation d'un prototype dans la première moitié du XXI<sup>ème</sup> siècle.
- Au vu des éléments présentés, ce réacteur pourrait présenter un niveau de sûreté au moins équivalent à celui des systèmes à eau sous pression de type EPR

Cependant, le CEA mène une veille sur l'ensemble des RNR au travers des travaux du forum Gen IV.



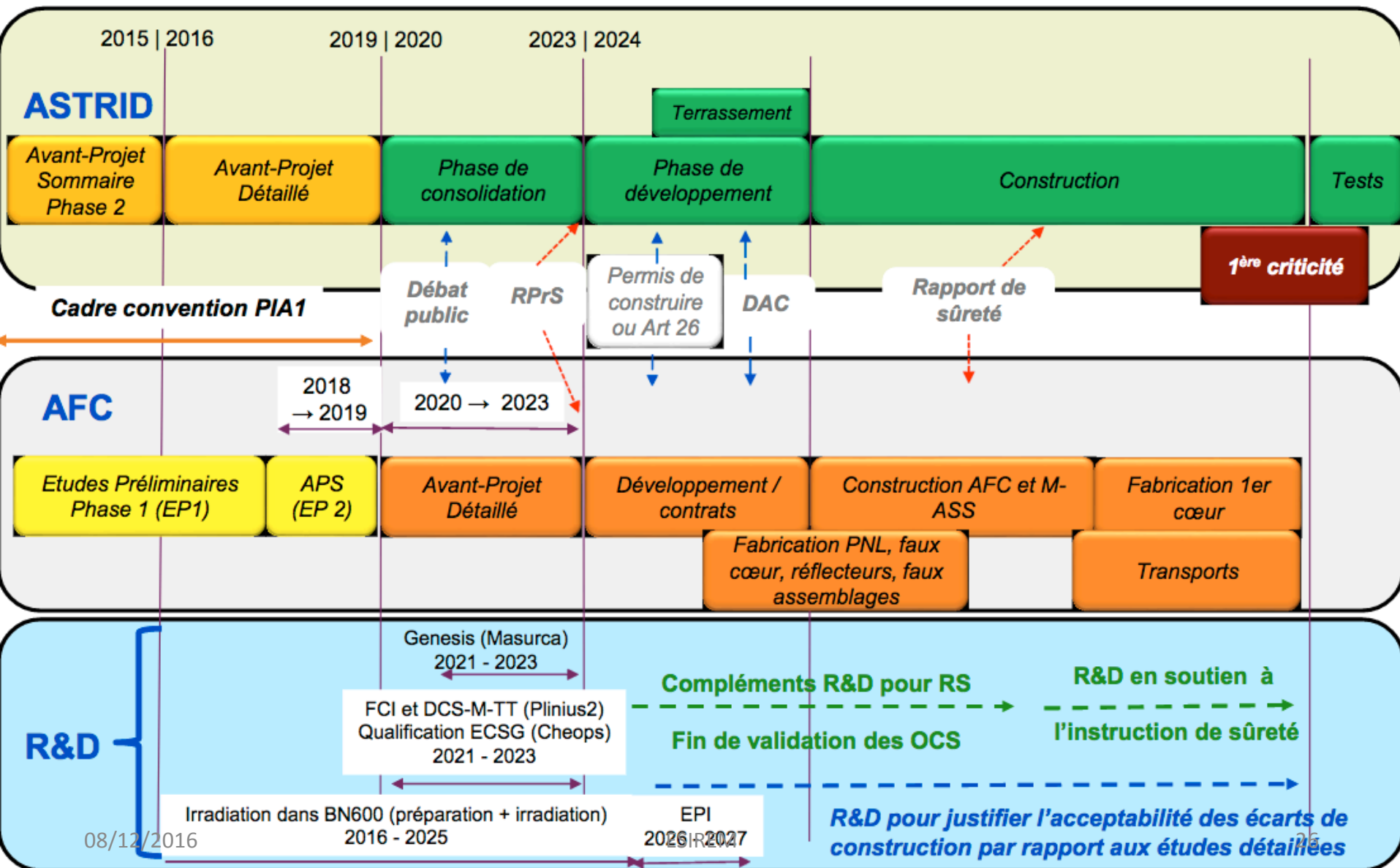
# Le projet « ASTRID »

## 1500GWth, 600GWe

Astrid n'est pas une tête de série mais un démonstrateur technologique. Il devra :

- Tester et qualifier les options de sécurité.
- Qualifier différents combustibles.
- Permettre un fonctionnement à 60 ans.
- Confirmer la performance des composants en vue de permettre une étude technico économique.
- Constituer une référence pour l'évaluation des coûts de la filière.

# PLANNING DU PROJET ASTRID

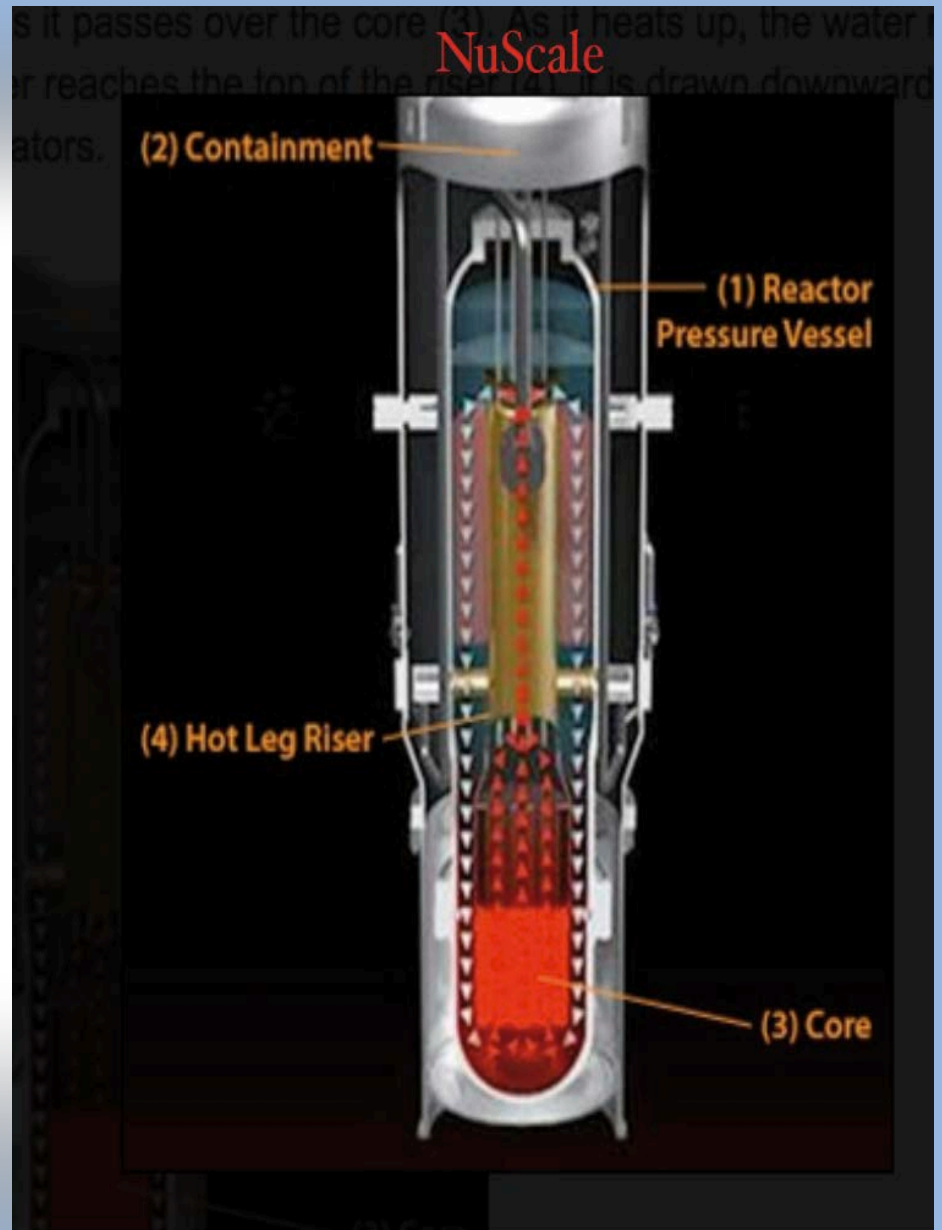


# Petits réacteurs

Small (25 MWe up) reactors for near-term deployment – development well advanced

| Name                    | Capacity | Type | Developer                        |
|-------------------------|----------|------|----------------------------------|
| <b>VBER-300</b>         | 300 MWe  | PWR  | OKBM, Russia                     |
| <b>NuScale</b>          | 50 MWe   | PWR  | NuScale Power + Fluor, USA       |
| <b>Westinghouse SMR</b> | 225 MWe  | PWR  | Westinghouse, USA*               |
| <b>mPower</b>           | 180 MWe  | PWR  | Babcock & Wilcox + Bechtel, USA* |
| <b>SMR-160</b>          | 160 MWe  | PWR  | Holtec, USA                      |
| <b>ACP100</b>           | 100 MWe  | PWR  | CNNC & Guodian, China            |
| <b>SMART</b>            | 100 MWe  | PWR  | KAERI, South Korea               |
| <b>PBMR</b>             | 165 MWe  | HTR  | PBMR, South Africa; NPMC, USA*   |
| <b>Prism</b>            | 311 MWe  | FNR  | GE-Hitachi, USA                  |
| <b>BREST</b>            | 300 MWe  | FNR  | RDIPE, Russia                    |
| <b>SVBR-100</b>         | 100 MWe  | FNR  | AKME-engineering, Russia         |

# Nu Scale 50 Mwe Fluor USA





**Factory  
Manufacturing**



**NuScale Power Module  
includes Containment and  
Reactor Vessel**



**Shipped by Truck,  
Rail, or Barge**



**Skid-Mounted Steam  
Turbine/Generator**

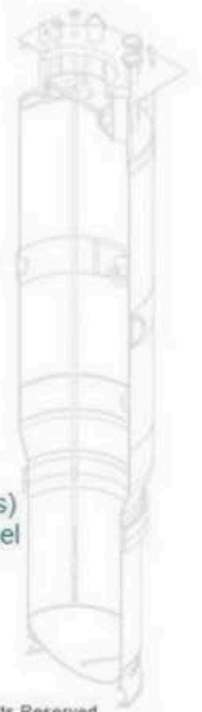


**Control Room provides enhanced  
security and state-of-the-art controls**

**12 Module  
Reactor Building**

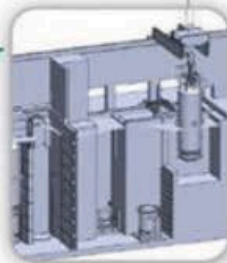


**Containment  
Reactor Vessel**  
**Steam Generator**  
**Fuel**



**Each Module is refueled underwater  
while the remainder of the plant  
produces power**

- Refueled once every 24 months
- Capable of 48-month fuel cycle
- 10 day refueling target



**Each Module Installed in its own Isolated Bay**

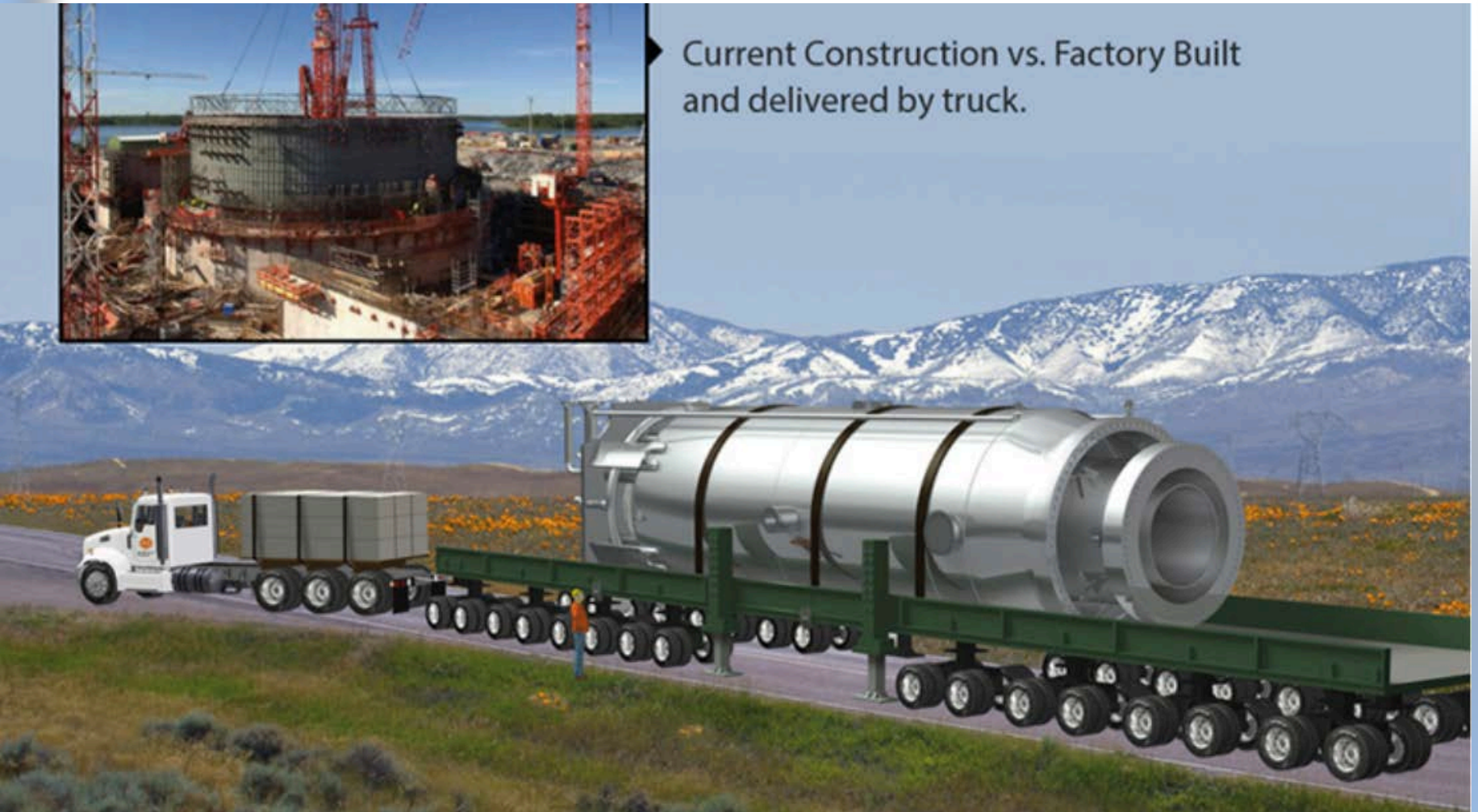
- Natural Circulation (No Reactor Coolant Pumps)
- 37 Standard 17X17 PWR Fuel (Half-Height) Fuel Assemblies
- Standard Magnetic Jack Control Rod Drives
- Internal Helical Coil Steam Generators and Pressurizer
- 50 MWe Gross Power

© NuScale Power, LLC. All Rights Reserved.

# Module construit en usine et transporté sur le site par camion.

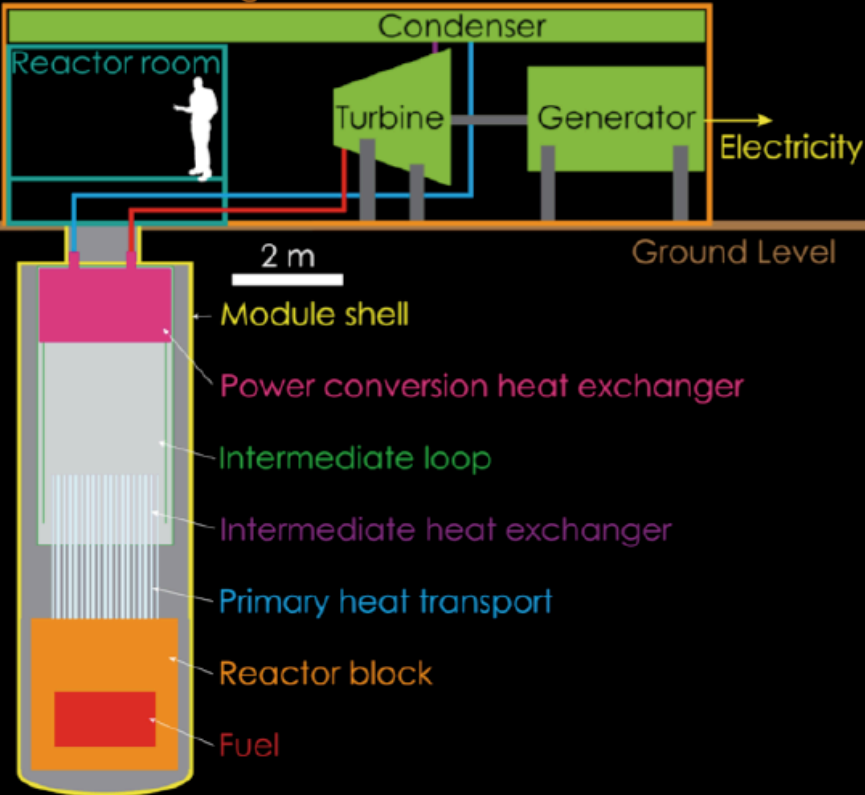


Current Construction vs. Factory Built and delivered by truck.



# A Nuclear Battery

Reactor building



- 2-3 MW output
- Completely passive
- No moving parts in reactor
- Sub-atmospheric pressure
- 12 year fuel lifetime
- Behaves like a thermal battery



# Transporté par un camion « normal »





# Le réseau électrique.

- En 1879 Création d'un réseau électrique continu pour la ville de New York.
- Bataille pour le choix des courants continu ou alternatif.
- L'alternatif triphasé gagne la partie car
  - les transformateurs permettent de changer la tension facilement en fonction des usages.
  - Il permet de transporter sous haute tension (400 000 Volts) avec de faibles pertes sur de grandes distances.

La généralisation des réseaux triphasés est devenue la technologie de base dans le monde.

Actuellement grâce au développement de l'électronique de puissance on observe un retour du courant continu.

# 1 – Un peu d'histoire, en quelques dates... (Suite)

° En 2009 : création de l'ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) représentant 41 gestionnaires de réseau de transport d'électricité de 34 pays à travers l'Europe, dépassant les frontières de l'Union européenne afin de promouvoir à la fois : **coordination et optimisation technique des réseaux et ouverture des marchés de l'électricité**

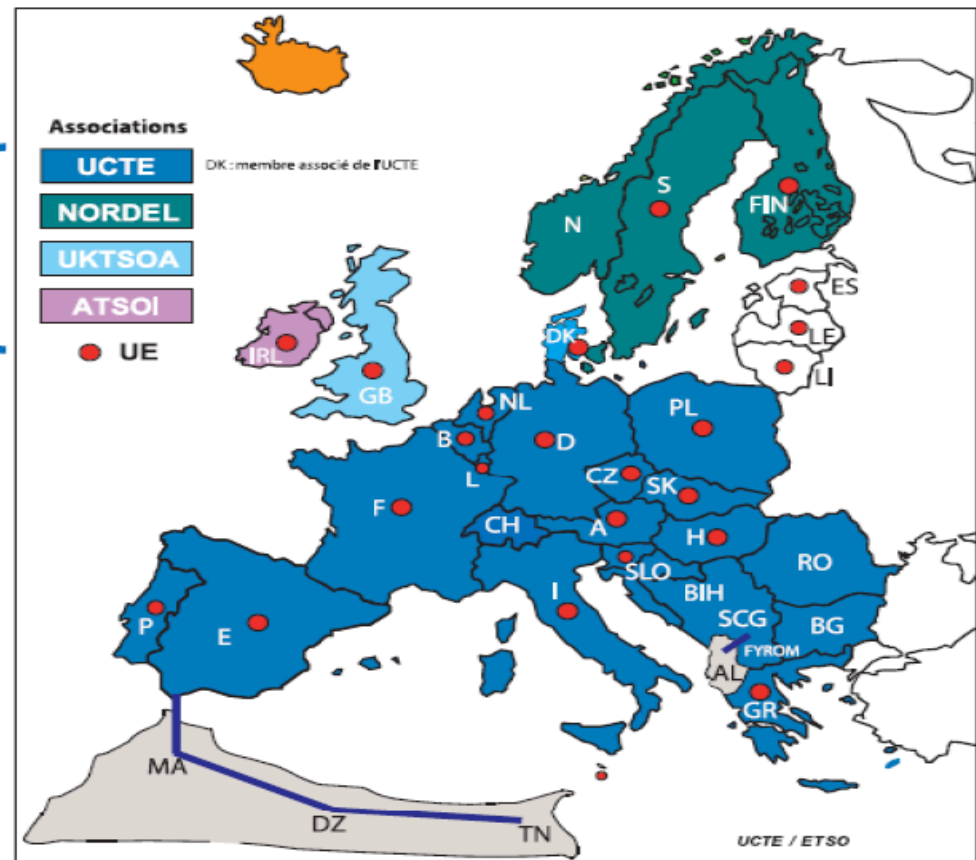
L'interconnexion du système électrique français avec les pays d'Europe de l'Ouest

ENTSO-E

L'ENTSO-E regroupe

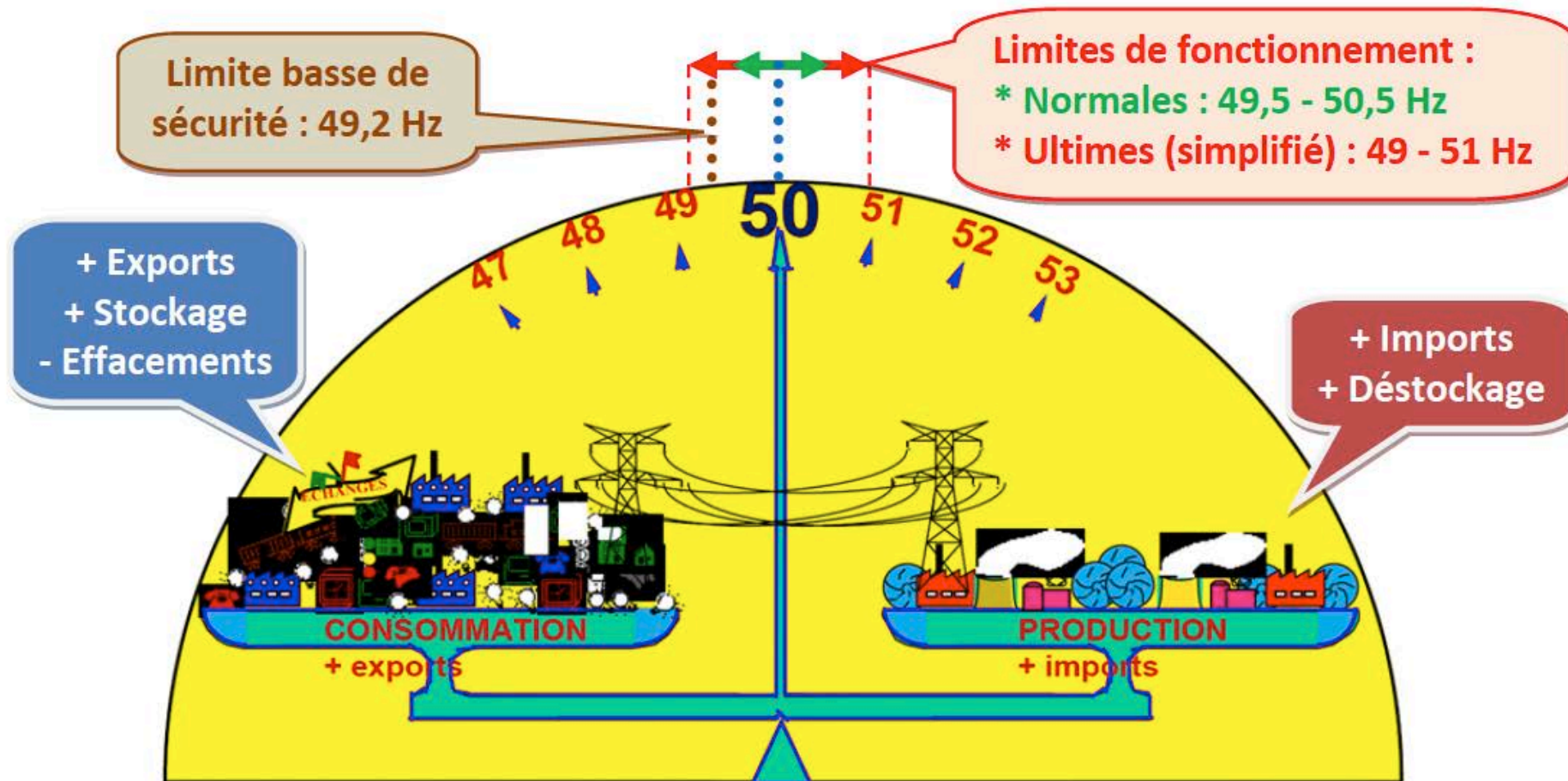
**5 zones synchrones différentes :**

- \* La zone Europe continentale (Ex-UCTE, de loin la plus importante)
- \* 4 zones périphériques connectées à la zone Europe continentale via des liaisons en courant continu



## 4 – Le réglage fréquence-puissance du réseau

Fréquence = INDICATEUR COMMUN de l'équilibre instantané production-consommation  
(La même pour tout ensemble de réseaux interconnectés en courant alternatif)



Source RTE

**Production = Consommation**

# Les contraintes du réglage puissance-fréquence sur un réseau.

- À chaque instant la production doit être égale à la consommation.
- Les contraintes de fréquences sont très strictes au maximum entre 49,5 et 50,5 Hz sur l'ensemble du réseau.
- La tension est un autre critère de stabilité et de qualité du réseau, mais plus lâche : 5% en THT, 8 % en HT, 10 % en MT pour assurer une tension la plus proche possible de la tension nominale en BT.

# Assurer l'équilibre production-consommation

- Avant l'introduction des EnRi c'est la demande qui est responsable de la variabilité des transits de puissance du réseau. Maintenant celle-ci est amplifiée avec l'introduction des EnRi.
- Assurer l'équilibre par :
  - L'inertie des machines tournantes : quelques secondes.
  - L'utilisation du stockage de l'énergie (STEP...) : quelques heures.
  - Mise en fonctionnement de moyens de production : hydrauliques(seconde), gaz(minute), charbon, nucléaire(heure)...
  - Délestage, Smart Grids...

**EnRi** : **É**nergies **R**enouvelables **i**ntermittentes.

# Conséquences du développement des EnRi.

- Stabilité du réseau.
- Cout lié au développement d'un réseau réalisé à partir de sources décentralisées.
- Difficultés financières des opérateurs historiques liés à l'obligation d'achat de la production intermittente. Problème lié à l'éviction des centrales à gaz et nucléaires.
- ...



# Coût du kWh.

- 36 % production à la sortie de la centrale.
- 30% réseau de transport et distribution.
- 34% CSPE.

Pour les EnR, il faut ajouter les coûts du back up, ceux-ci ont été calculés par l'AIE. Ils s'élèvent de 5 à 25 €/MWh.

- 3 à 5 €/MWh, capacités de secours
- 1 à 7 €/MWh, compensation de la fluctuation du réseau
- 2 à 13 €/MWh, raccordement et renforcement du réseau.

AIE Agence Internationale de l'Énergie



# Subventions aux EnR dans différents pays européens.

Council of European energy regulators

| <i>Année 2011</i> | <i>Éolien</i> | <i>Photovoltaïque</i> | <i>Hydroélectricité</i> | <i>Biomasse</i> | <i>Déchets</i> |
|-------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|----------------|
| Allemagne         | 87            | 402                   | 48                      | 160             | 20             |
| Autriche          | 22            | 264                   | 1                       | 81              | 98             |
| Belgique          | 95            | 407                   | 45                      | 97              | -              |
| Finlande          | 12            | -                     | 4                       | 7               | 4              |
| France            | 33            | 477                   | 13                      | 55              | 41             |
| Hongrie           | 111           | -                     | 72                      | 113             | 109            |
| Italie            | 69            | 367                   | 70                      | 120             |                |
| Pays-Bas          | 68            | 386                   | 104                     | 75              | 41             |
| Rep. Tchèque      | 107           | 484                   | 57                      | 56              | 113            |
| Roumanie          | 65            | 79                    | 60                      | 64              |                |
| Espagne           | 41            | 357                   | 39                      | 75              | 31             |
| Royaume Uni       | 72            | 290                   | 65                      | 58              | 63             |

# Réacteurs en construction dans le monde.

| Region            | Under Construction | Planned |
|-------------------|--------------------|---------|
| Europe            | 4                  | 19      |
| Russia and FSU    | 11                 | 30      |
| China             | 27                 | 56      |
| Rest of East Asia | 10                 | 10      |
| West Asia         | 2                  | 8       |
| South Asia        | 7                  | 24      |
| South East Asia   | --                 | 4       |
| Africa            | --                 | 1       |
| North America     | 5                  | 7       |
| South America     | 2                  | --      |
| SUM               | 68                 | 227     |

# Conclusion : Au moins trois scénarios sont possibles :

- Continuer à utiliser les énergies fossiles, c'est un scénario de développement mais pas durable...
- Utiliser uniquement les renouvelables et les économies d'énergie, c'est un scénario de non développement durable...
- **Utiliser les renouvelables, développer le nucléaire, et faire des économies d'énergie restent la seule solution pour avoir un peu de développement sur le moyen et long terme...**