

Société française d'énergie nucléaire

www.sfen.org

Groupe Régional Provence

<https://provence.sfen-regions.org/>



<https://us02web.zoom.us/j/87069717041>



Association des Retraités du groupe CEA

Groupe Argumentaire sur les Énergies - Nucléaire et Alternatives

www.energethique.com

Climat & nucléaire : parlons-en !

Patrick MICHAILLE

Président Sfen-Provence ; membre GAENA (ARCEA), Sauvons-le-Climat, PNC-France
Co-rédacteur du livre « **Transition énergétique – la France en échec** » éd . edp-sciences

Co-production Sfen/GR21 et ARCEA/GAENA

Coauteur de : « **Réchauffement climatique – Bonnes questions & vraies réponses** »
sous l'égide de « Sauvons-le-Climat » éd. St Léger-les un-pertinents

Antimythes : <https://www.linkedin.com/in/patrick-michaille-9596802b/>

19 jun 2023



- Ingénieur diplômé de l'Ecole Centrale des Arts & Manufactures, Maître ès Sciences Economiques, Docteur ès Sciences Physiques
- Radio-contamination des réacteurs à sodium ; fabrication et suivi du combustible ; décontamination et démantèlement ; gestion des déchets et effluent liquides
- Sûreté, sécurité, facteur humain (chef d'INB)
- Formateur : ingénieurs français et étrangers : Japonais, Russes, Chinois, Indiens (Ecole du sodium, contrats TACIS)
- Direction de projets internationaux (Tchernobyl : sûreté du sarcophage; décontamination des sites ; protection de l'homme et de l'environnement)

« On ne fait pas du nucléaire pour le plaisir ! »

Hommage à

Bernard BIGOT,

Haut commissaire à l'Energie Atomique

Administrateur du CEA, Commissariat à l'Energie
Atomique et aux Energies Alternatives

Directeur général de ITER Organization,
décédé le 14 mai 2022



1^{ère} séquence :

quel mix énergétique à l'horizon 2050

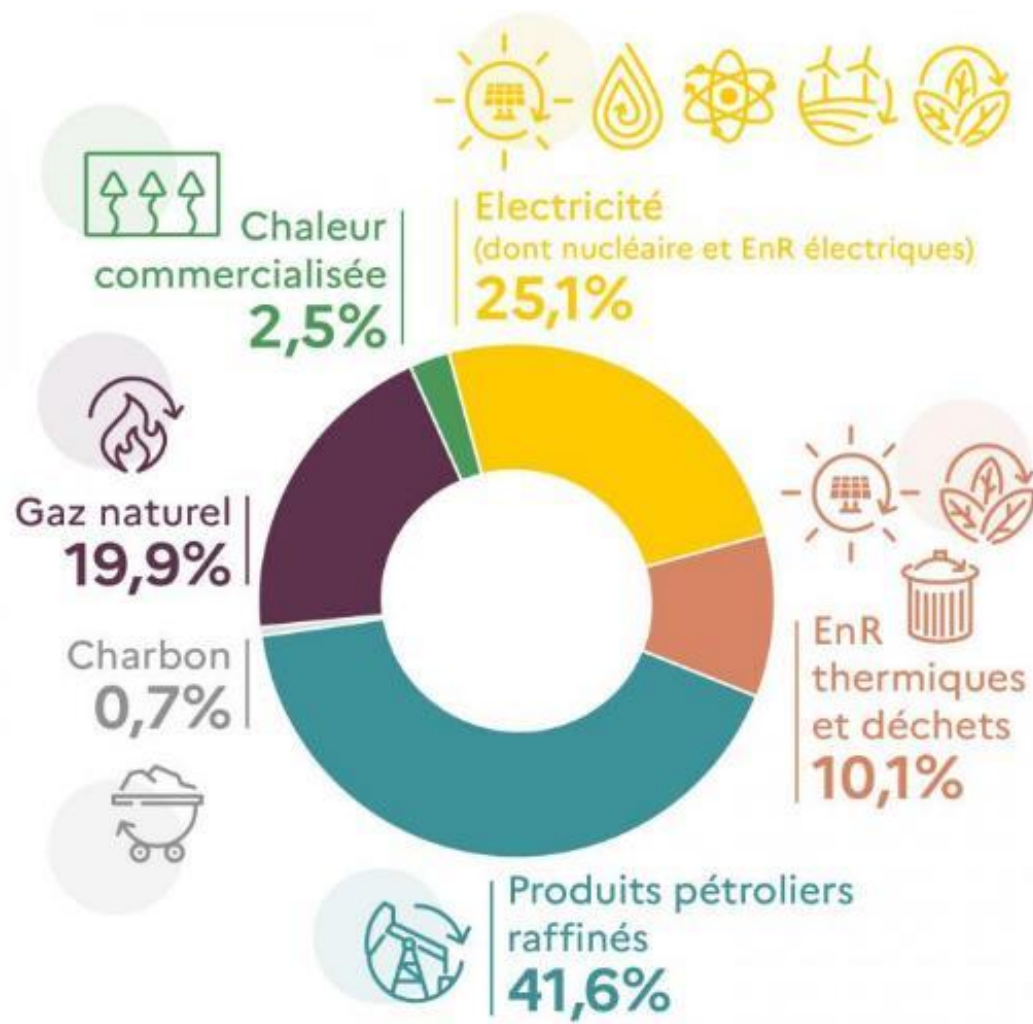
pour tenter de parvenir

à la neutralité carbone ?

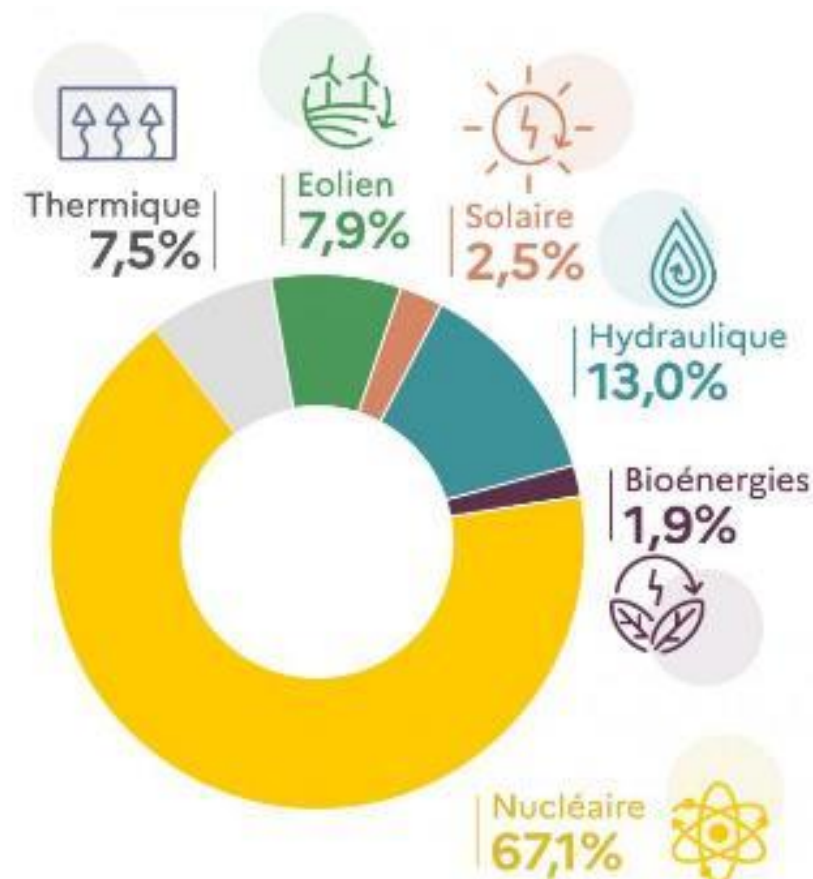
Situation actuelle :

Un mix énergétique très pétrolier et gazier

(source : ecologie.gouv.fr)

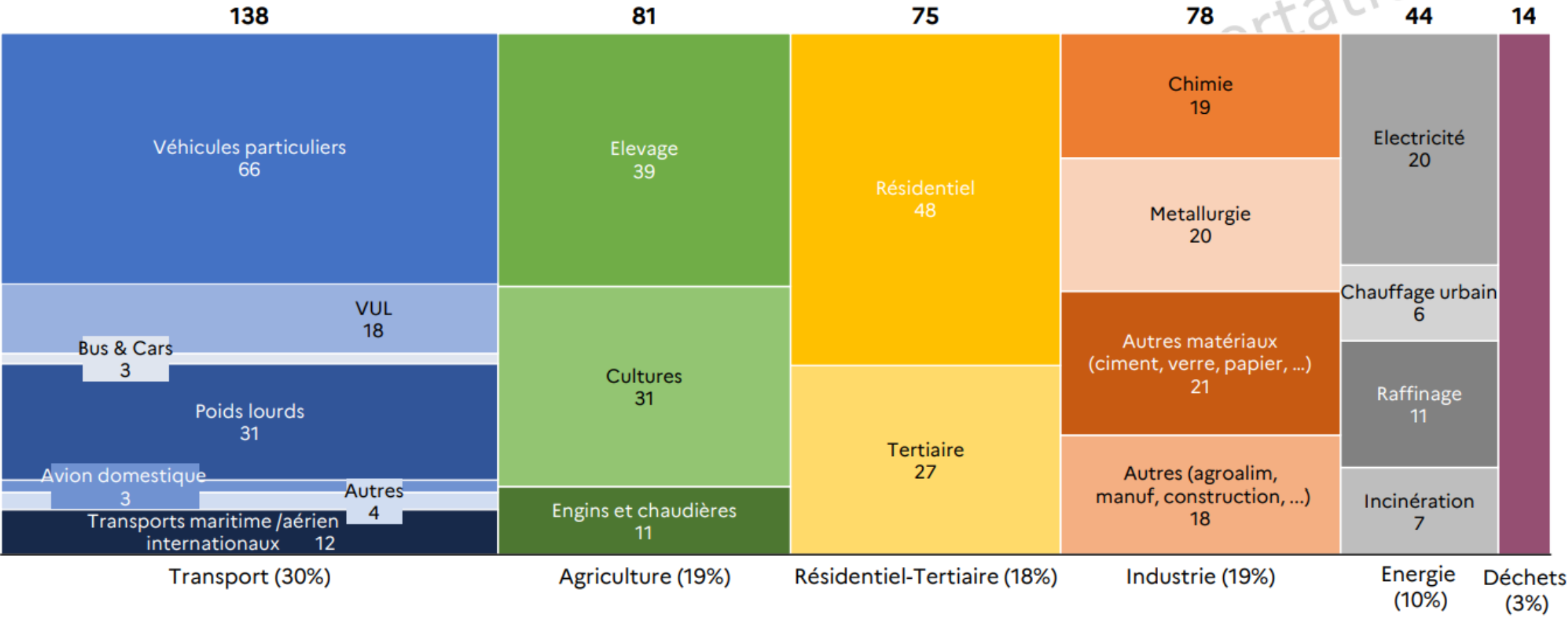


Le mix électrique



Nos émissions nationales de gaz à effet de serre (2021)

Emissions annuelles de gaz à effet de serre (GES) en France en 2021 (MtCO₂e)



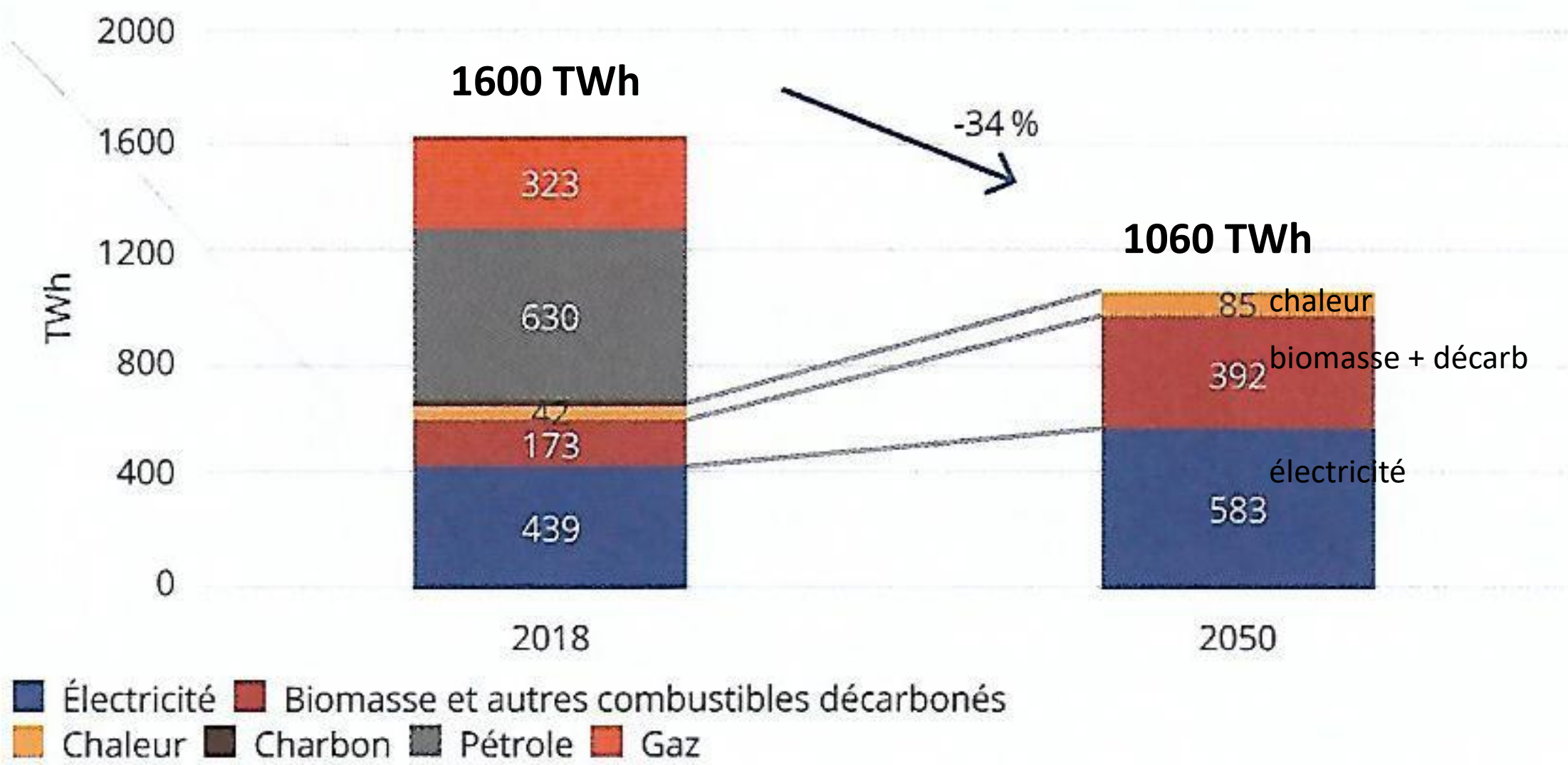
1^{ère} séquence : Quel mix énergétique en 2050 pour assurer la neutralité carbone

1) évaluer les **besoins** (en TWh d'énergie finale annuelle) :

- population : 70 Mhab (65,6 Mhab en 2022) : + 6 %
- rapatrier l'industrie (pollution en Asie) => (10% => 20% du besoin)
- efficacité + sobriété (chauffage, transports)

=> De 1650 TWh en 2023 à 1400 TWh en 2050 ? (**SLC/Négatep**)

Graphique 6 : Consommation finale d'énergie en France par combustible en 2018 (source : Eurostat) et vision SNBC à l'horizon 2050 (Source : MTES/SNBC)



1- Quel mix énergétique en 2050

Sous quelle forme bas-carbone l'énergie pourra-t-elle être fournie en France en 2050 ?

chaleur (résidentiel et tertiaire, industrie et agriculture) =>

solaire thermique et géothermie => 140 TWh, soit 10 % des besoins.

biomasse (émet du CO₂) : chauffage (122 TWh) ; agrocarburants (116 TWh) ; biogaz
< déchets ménagers (47 TWh) : total 285 TWh (**20 % des besoins**)

reste # **70 % des besoins** (950-1000 TWh) qu'il faut couvrir avec

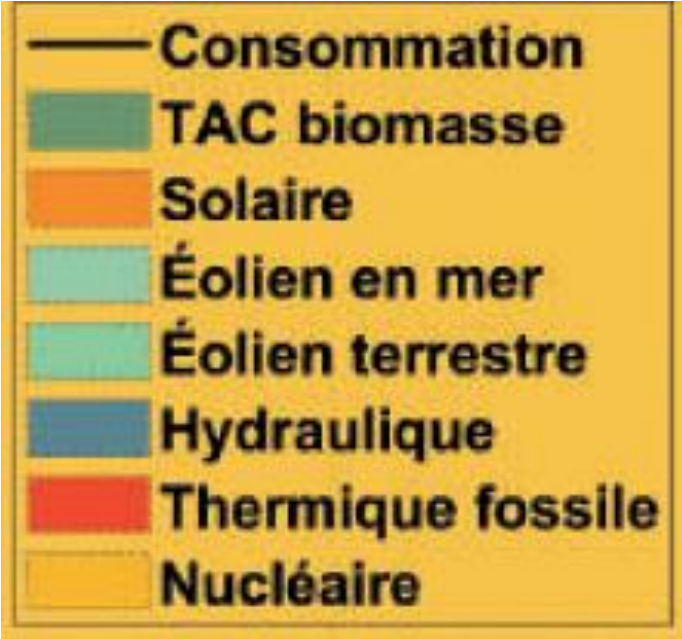
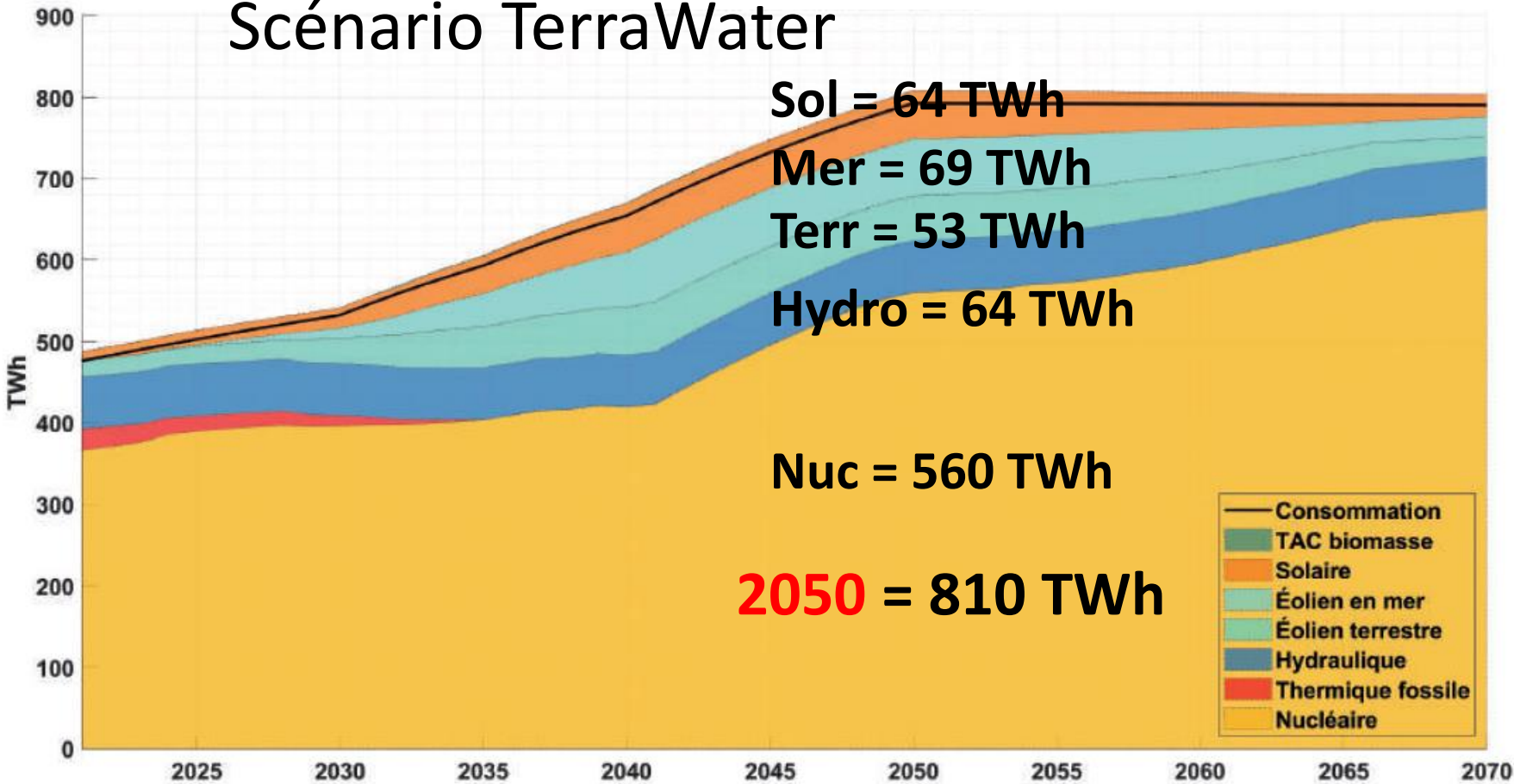
l'électricité bas-carbone, et l'hydrogène produit par électrolyse, pour l'industrie et pour les transports.

C'est ce que chiffre l'Académie des sciences, tandis que RTE se limite à **645 TWh**.

1- Quel mix électrique en 2050

Évolution de la production électrique par source

Scénario TerraWater



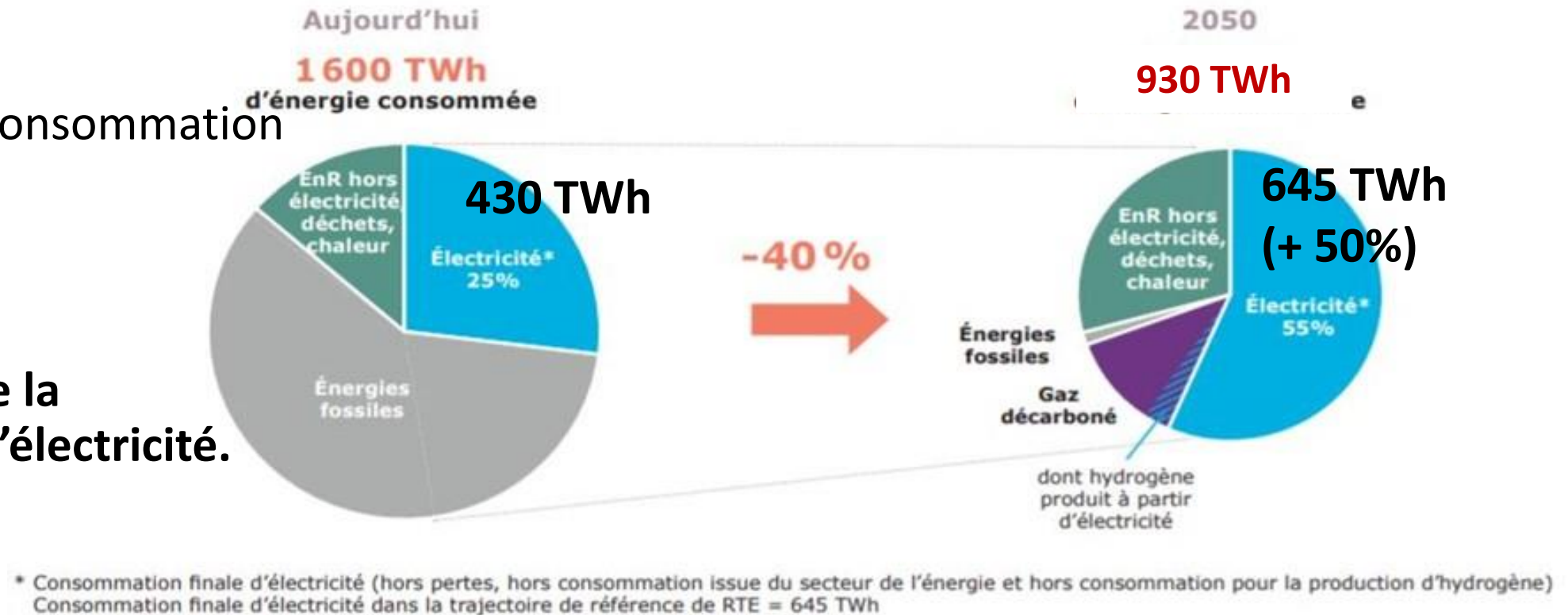
RTE : baisser la consommation d'énergie

Consommation d'énergie finale en France (Stratégie Nationale Bas-Carbone)

Réduction de la consommation finale d'énergie

Mais :

Augmentation de la consommation d'électricité.



Source : Rapport RTE « Futurs énergétiques 2050 »

Transfert des usages vers l'électricité

→ **meilleurs rendements** (exemple voiture électrique vs voiture thermique)

Discours de Belfort

- Solaire : 100 GW ; rdt : 15% => 130 TWh (2022 : 16,7)
- Eolien maritime : 40 GW ; rdt : 35% => 120 TWh
- Eolien terrestre : 37 GW ; rdt = 25% => 80 TWh (2022 : 38 TWh)
- Total => 330 – 55 = 275 TWh en plus de la production actuelle

- EPR2 : 6x1,650 GW = 10 GW ; rdt 80% => 70 TWh

- Total = 345 TWh en + des 550 de 2005 à 2015) # **900 TWh**

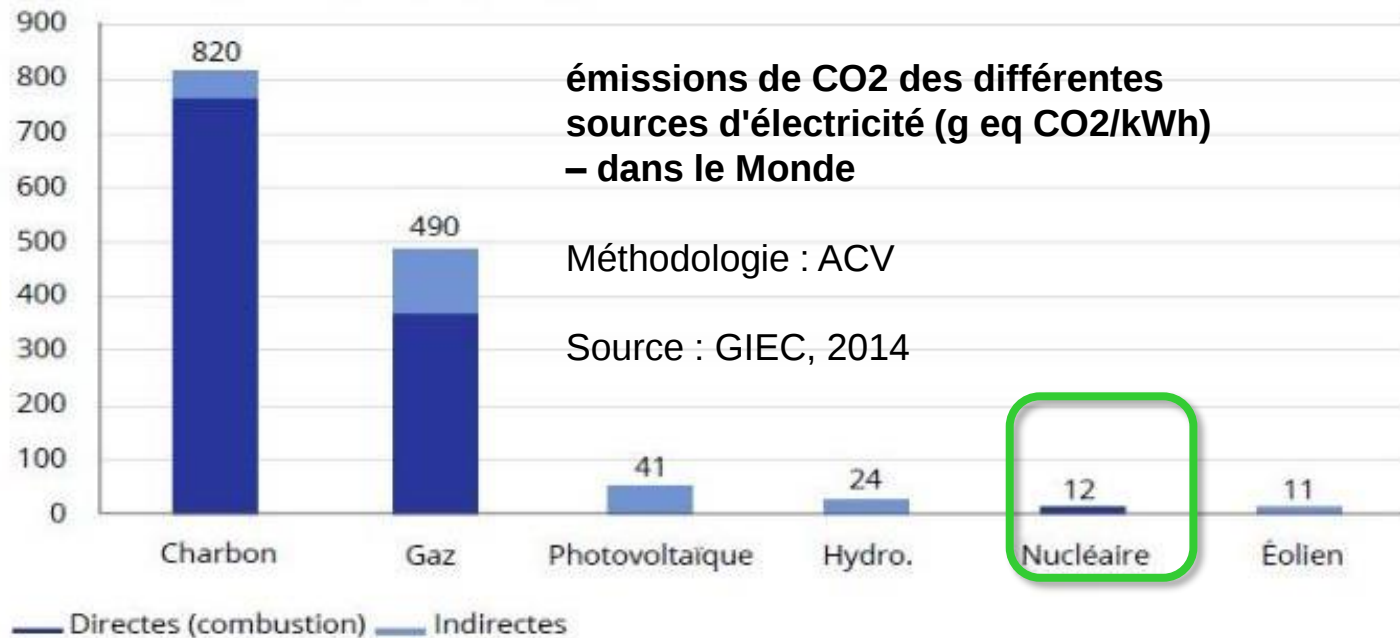
1- Impact carbone des systèmes de production d'électricité

Mode de production d'électricité	nucléaire	hydraulique	Eolien terrestre	Solaire photo-voltaïque	Turbine à biomasse	Turbine à gaz
Impact carbone g (CO2eq) / kWh	6	11	13	30	230	625

Les chiffres dépendent du mix énergétique de chaque pays.

En France, l'enrichissement de l'uranium par ultracentrifugation consomme très peu d'énergie ; le nucléaire a un plus faible impact (3,7 g (CO2eq) / kWh) que la moyenne mondiale (12 g (CO2eq) / kWh)

1- Impact carbone des systèmes de production d'électricité



En France, compte tenu de la faible empreinte carbone de l'électricité utilisée pour l'étape de l'enrichissement de l'uranium, le niveau d'émissions est beaucoup plus faible :

- 6 g CO2/kWh selon L'ADEME (2015), 5,29 g CO2/kWh selon le CEA (2014),
- 3,7 g CO2/kWh selon une étude d'EDF (2022), revue par des experts indépendants, et basée sur la réalité du parc nucléaire français de 2019

1- Quel mix énergétique en 2050

comment produire de l'électricité bas-carbone ?

l'hydraulique : stable (70 MWh, record de 2018) ;

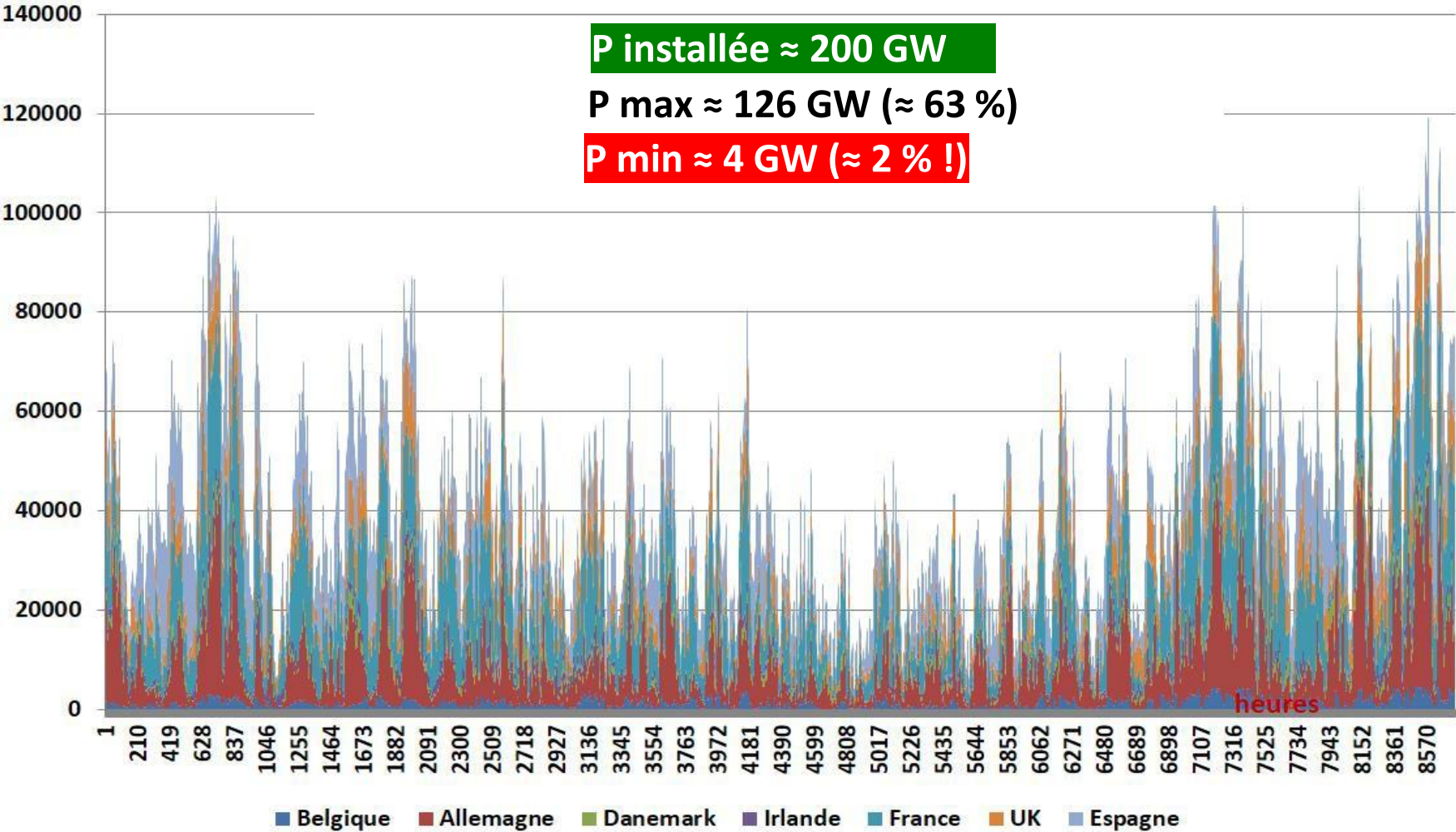
indispensable pour remettre en service un réseau après une disjonction (*black-out*)
pour remettre en service les groupes turboalternateurs et assurer la fréquence # 50 Hz.

éolien et solaire PV : les plus rapides à construire.

Le solaire PV peut satisfaire les besoins énergétiques d'une maison d'habitation ou d'une exploitation agricole, moyennant des batteries de **stockage**

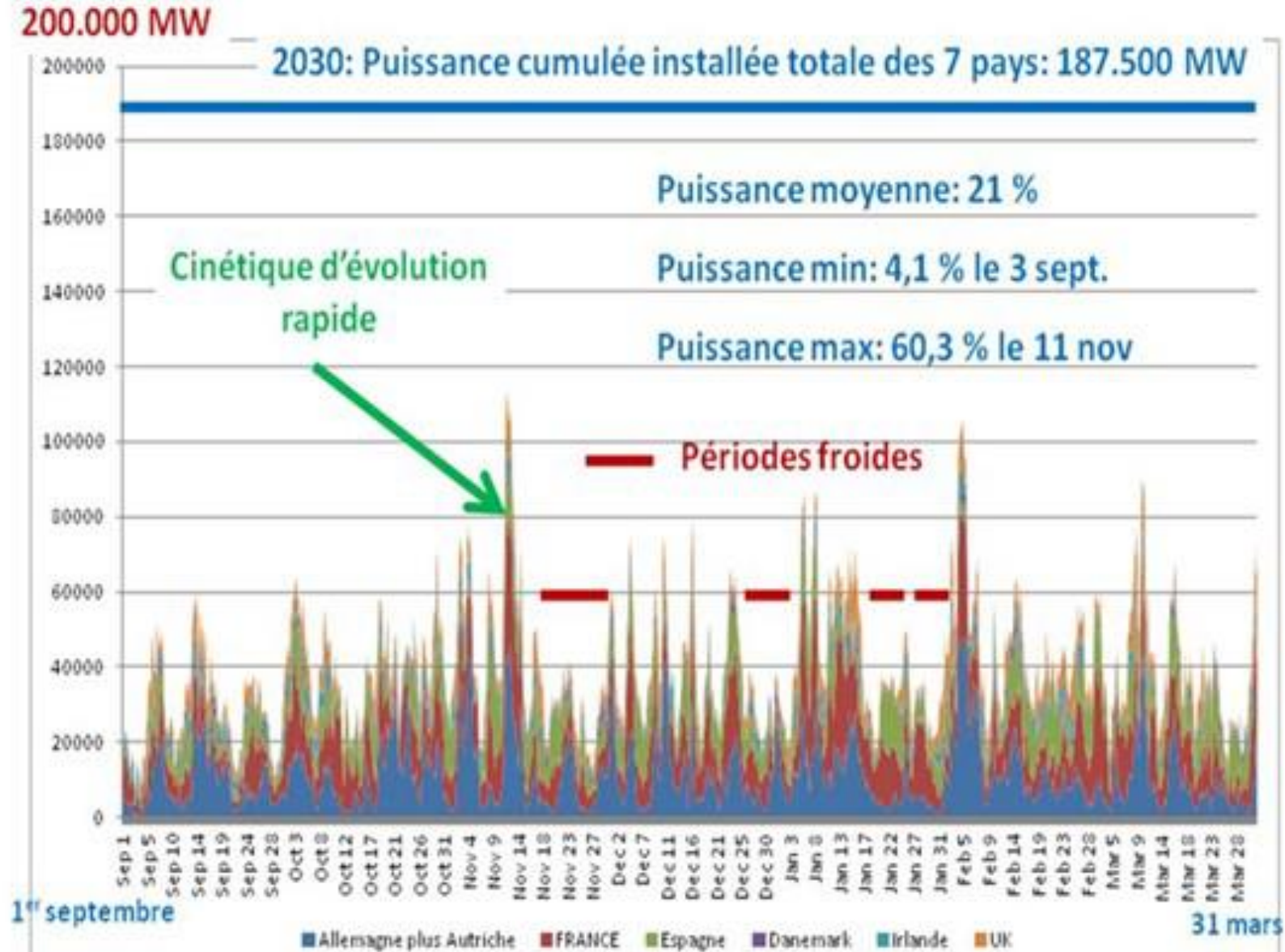
Mais : **sources intermittentes !**

Diagramme
heure par
heure sur
une année



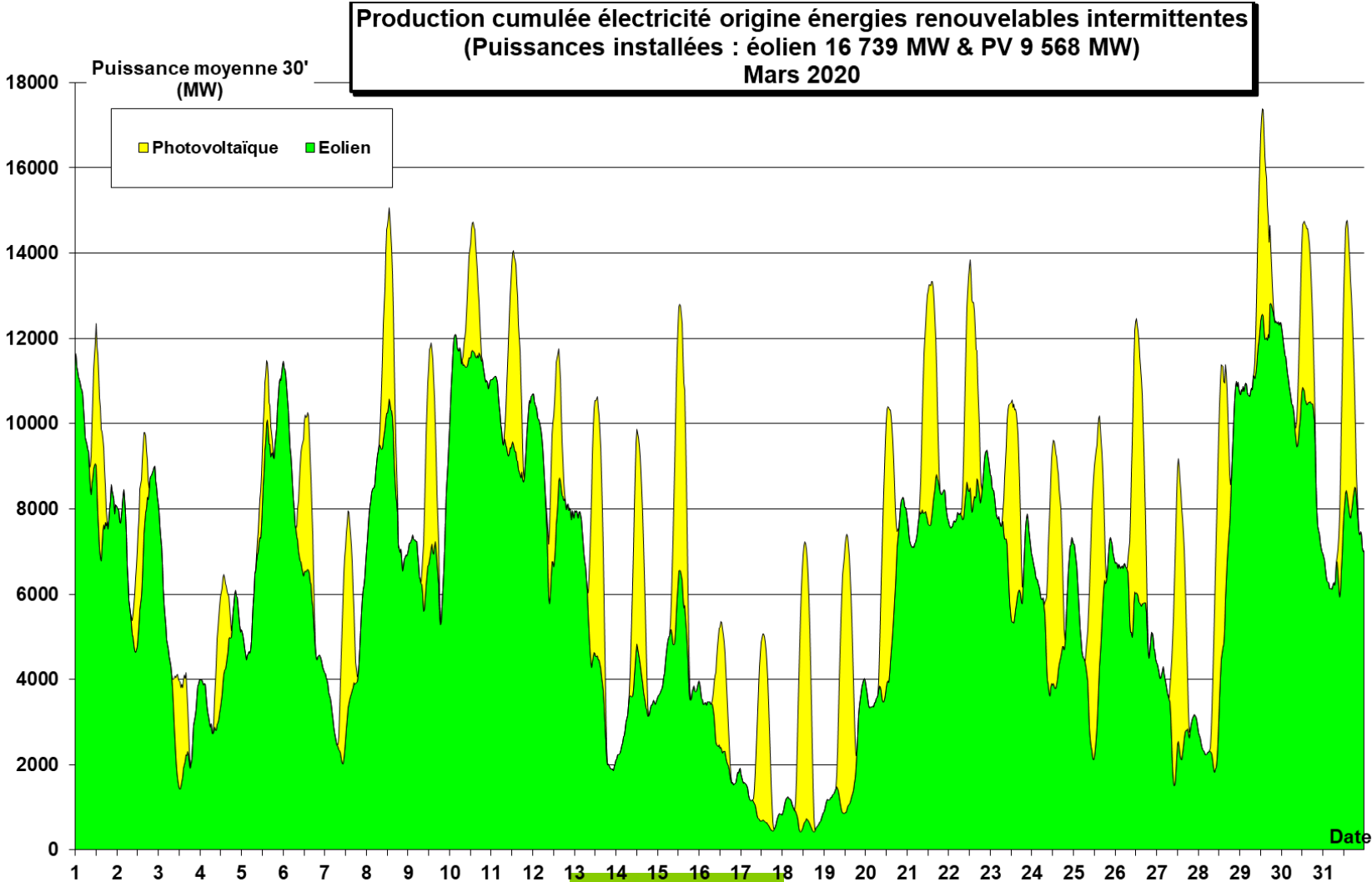
Puissance éolienne cumulée des 7 pays européens les plus équipés (extrapolation vers 2030)

L'éolien ne peut seul satisfaire les besoins



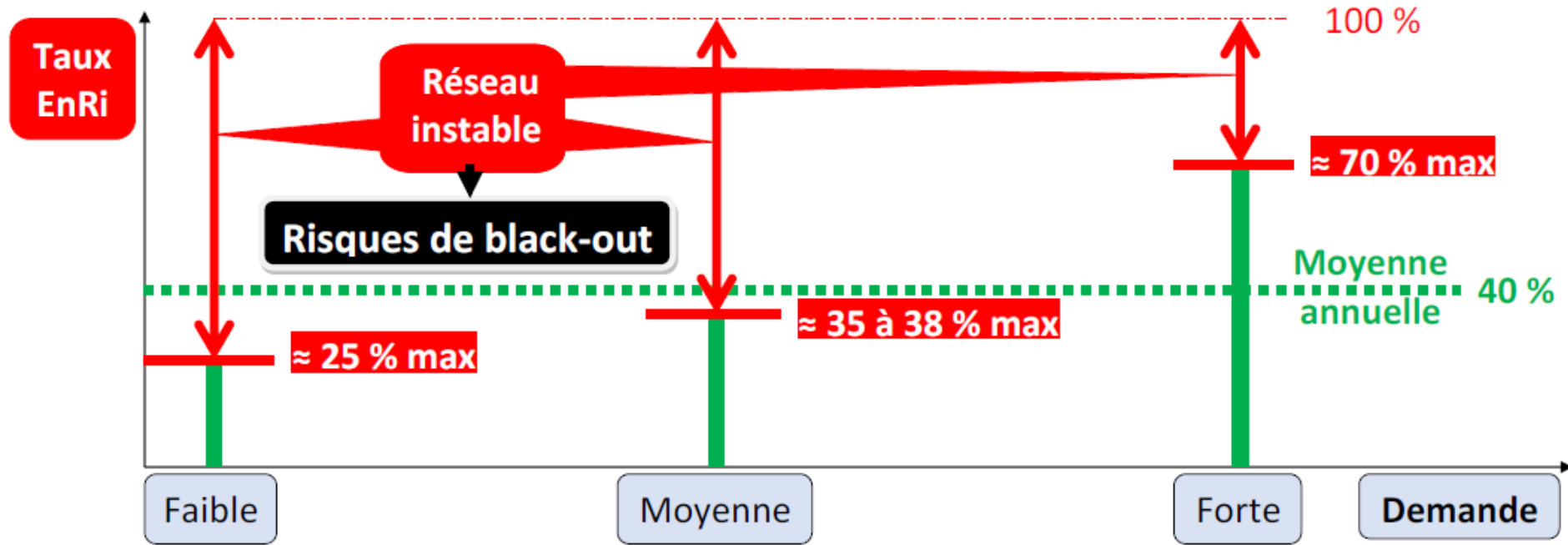
Production éolien + photovoltaïque

Mars 2020



Etude EDF incorporation des EnRi

G. Sapy - <https://www.arcea-cad.fr/uploaded/jusqu-oa-insa-rer-enri-pm-v3gs.pdf>



- ➔ Démarrage PRÉVENTIF de moyens pilotables pour stabiliser le réseau en « ZONE ROUGE »
- ➔ STOCKAGE et/ou ÉCRÊTAGE des EnRi en surplus

Les contraintes d'équilibre des réseaux LIMITENT le taux d'insertion instantané des EnRi
➔ Moyenne de 80 % nécessaire pour atteindre 100 % de renouvelables : hors de portée...

1- Gérer l'intermittence

le réseau de transport d'électricité limite les sources intermittentes à **30 %** de la puissance totale installée

⇒ excédent stocké sous forme d'hydrogène ?

⇒ déficit suppléé par les turbines hydrauliques des STEP, ou les turbines thermiques alimentées en agrocarburants (quelques heures seulement)

ENR = # 40 % de l'électricité du réseau => nucléaire # 60 %, soit 560 TWh

un tiers de plus que le maximum produit avec le parc nucléaire historique.

NB : pays européens : doublement de la production électrique

(et même un triplement au Royaume Uni et un quadruplement aux Pays-Bas si l'hydrogène est produit par électrolyse !)

1-Coefficient de production (électricité produite / puissance installée)

Besoin : 583 TWh en 2050 soit # 45 EPR

EPR 90% pilotable - 1650 MW

Éolien 23 % à terre - 3 MW
35 % en mer – 6 MW

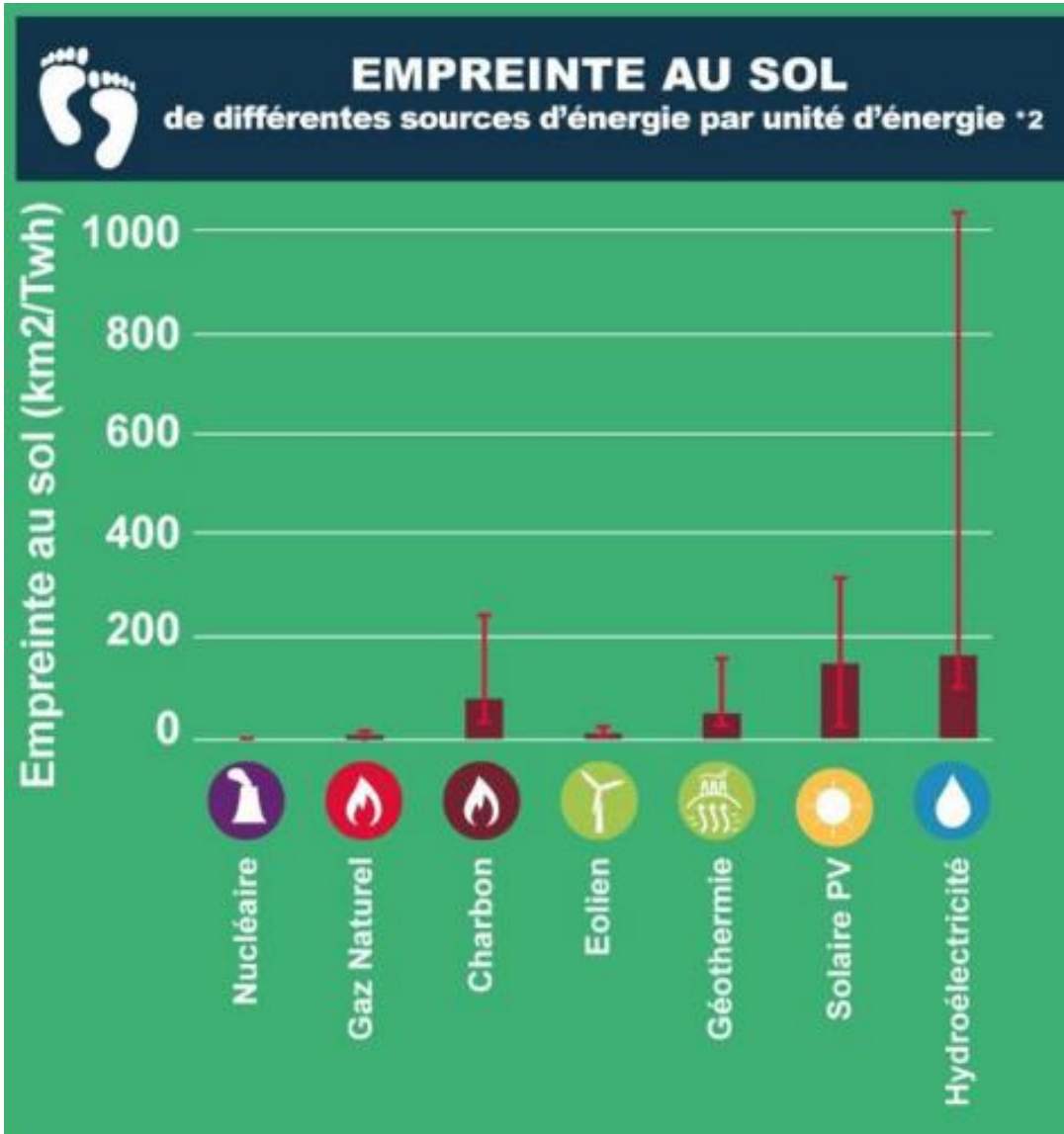
Solaire : 12% au nord ; 17% au sud

**production
annuelle**
13 TWh

= 2000 éol
= 700 éol

= 40 à 60 km² PV

1- Empreinte au sol



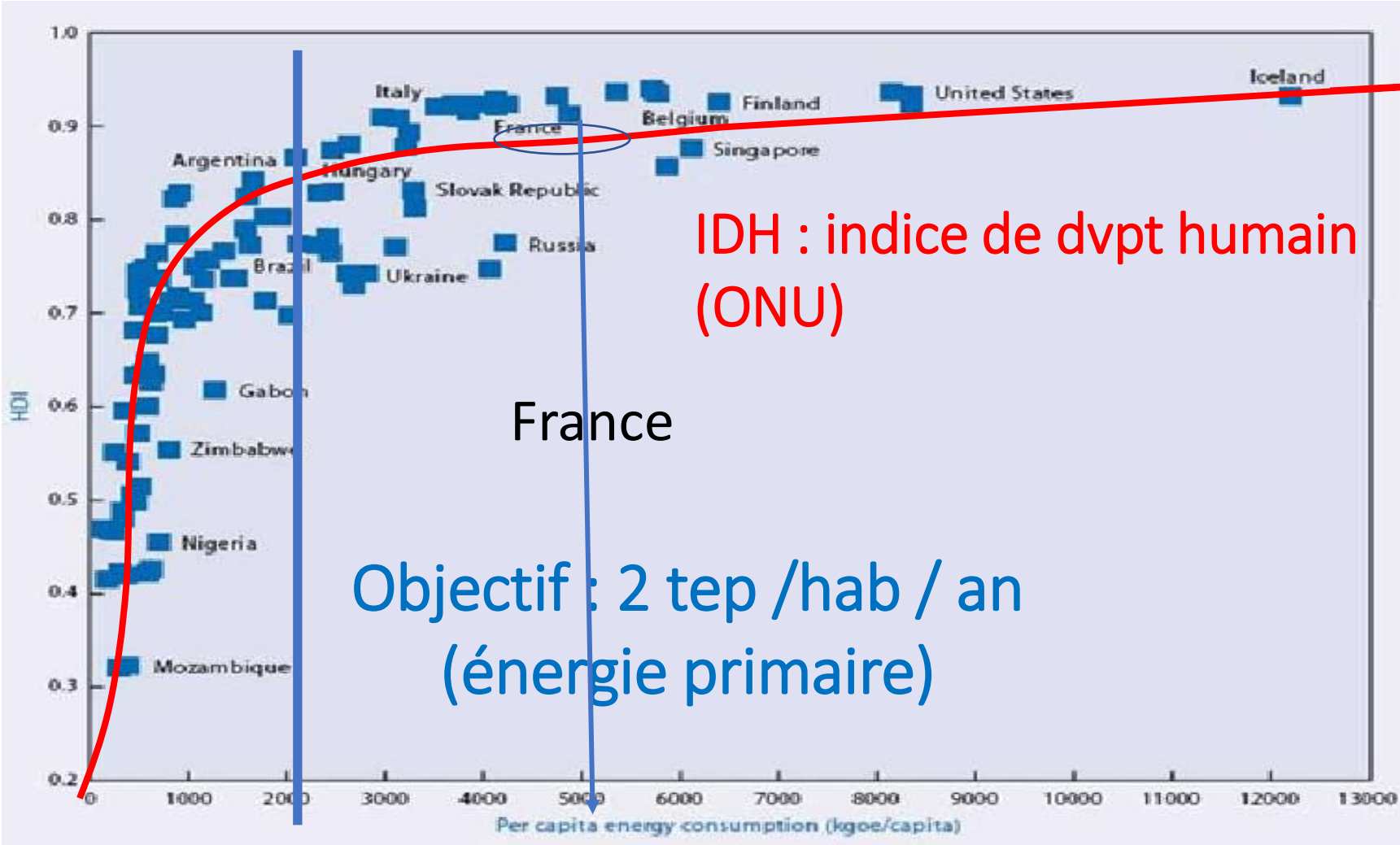
Du fait de sa densité de puissance, le nucléaire offre l'empreinte au sol la plus faible par unité d'énergie utile produite.

Débat

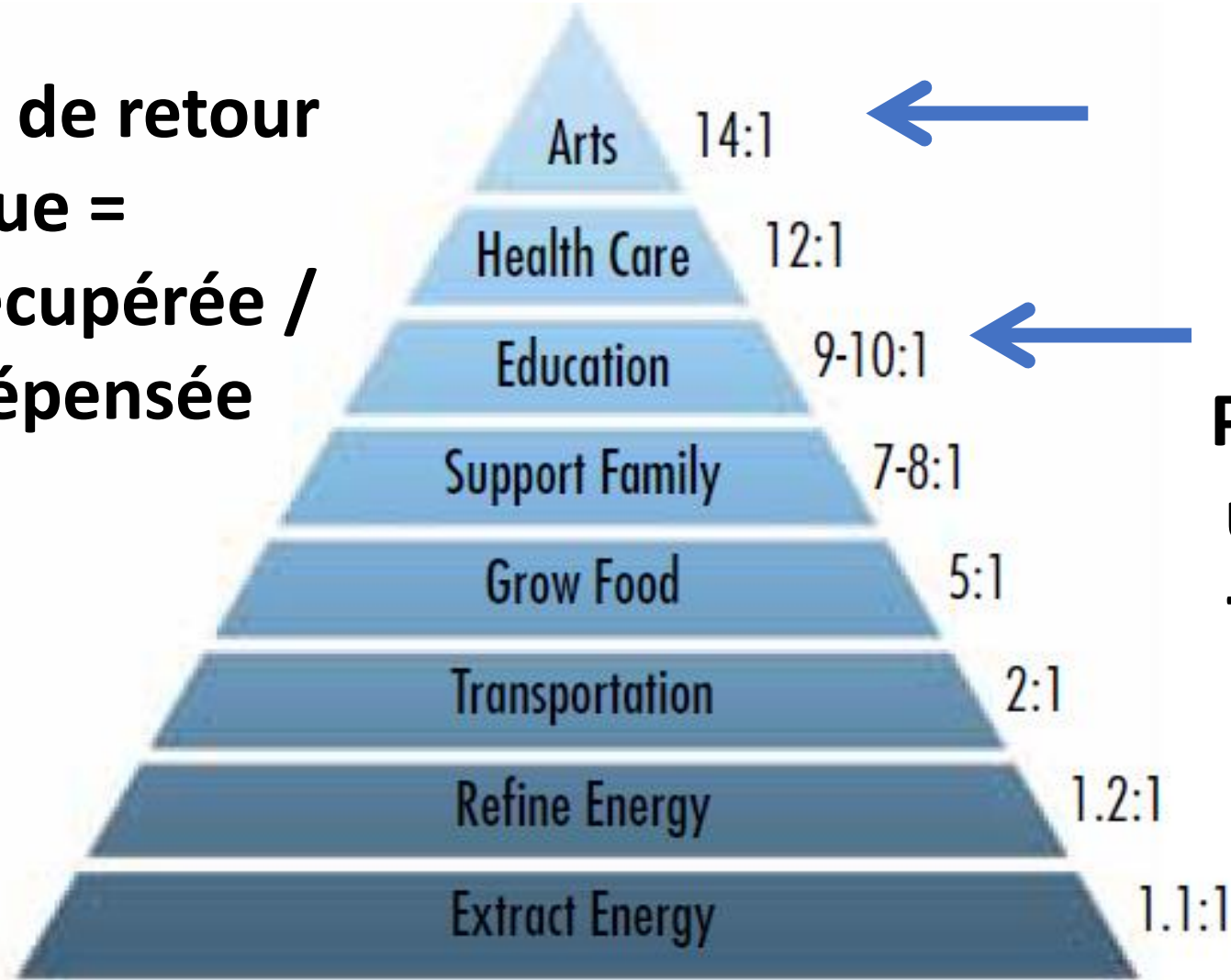
1- La décroissance est-elle souhaitable ?



L'énergie est nécessaire au dvpt humain

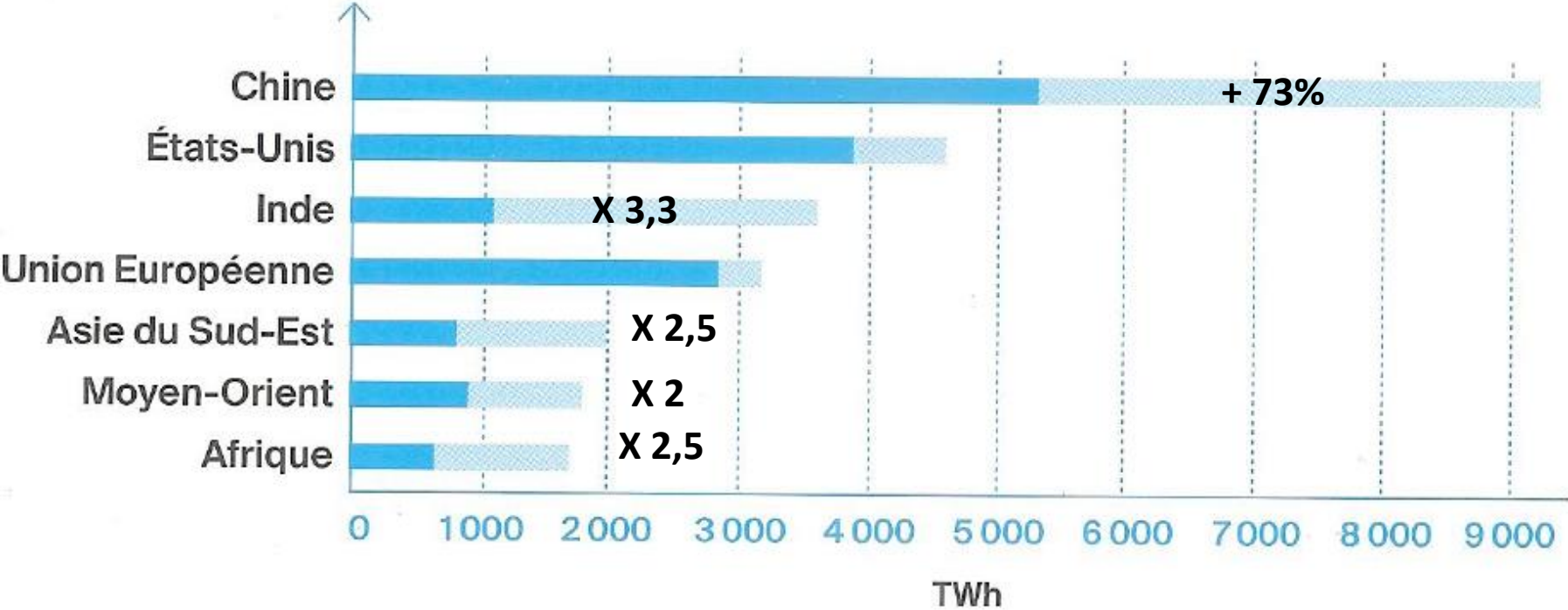


**TRE : taux de retour
énergétique =
Énergie récupérée /
énergie dépensée**



**Pour satisfaire
un échelon, il
faut que tous
les échelons
inférieurs
soient
satisfaits.**

Augmentation de la demande d'électricité (de 2015 à 2040)

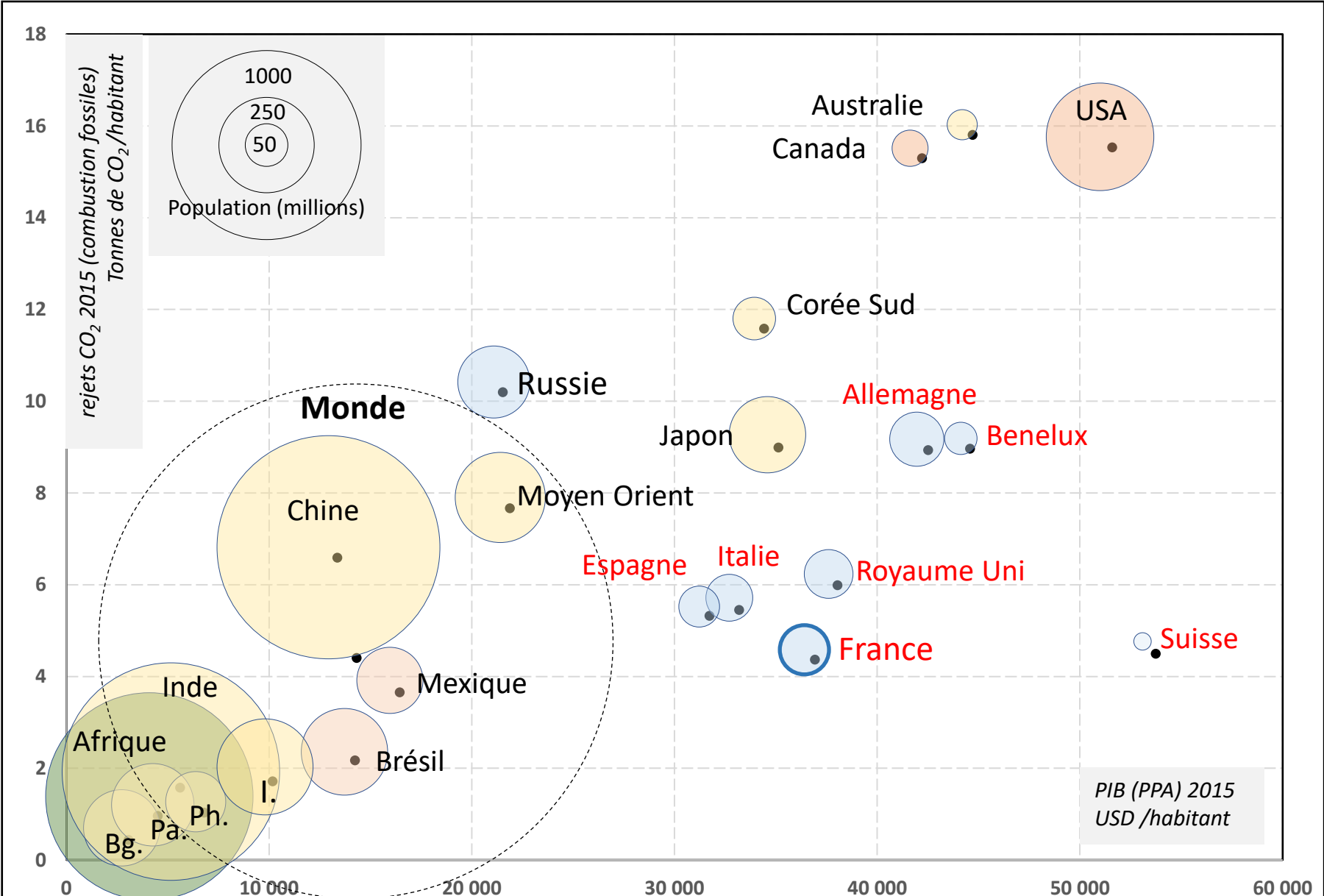


Total : 15.500 TWh => 26.000 TWh (+ 67%)
 soit l'équivalent de 1000 EPR

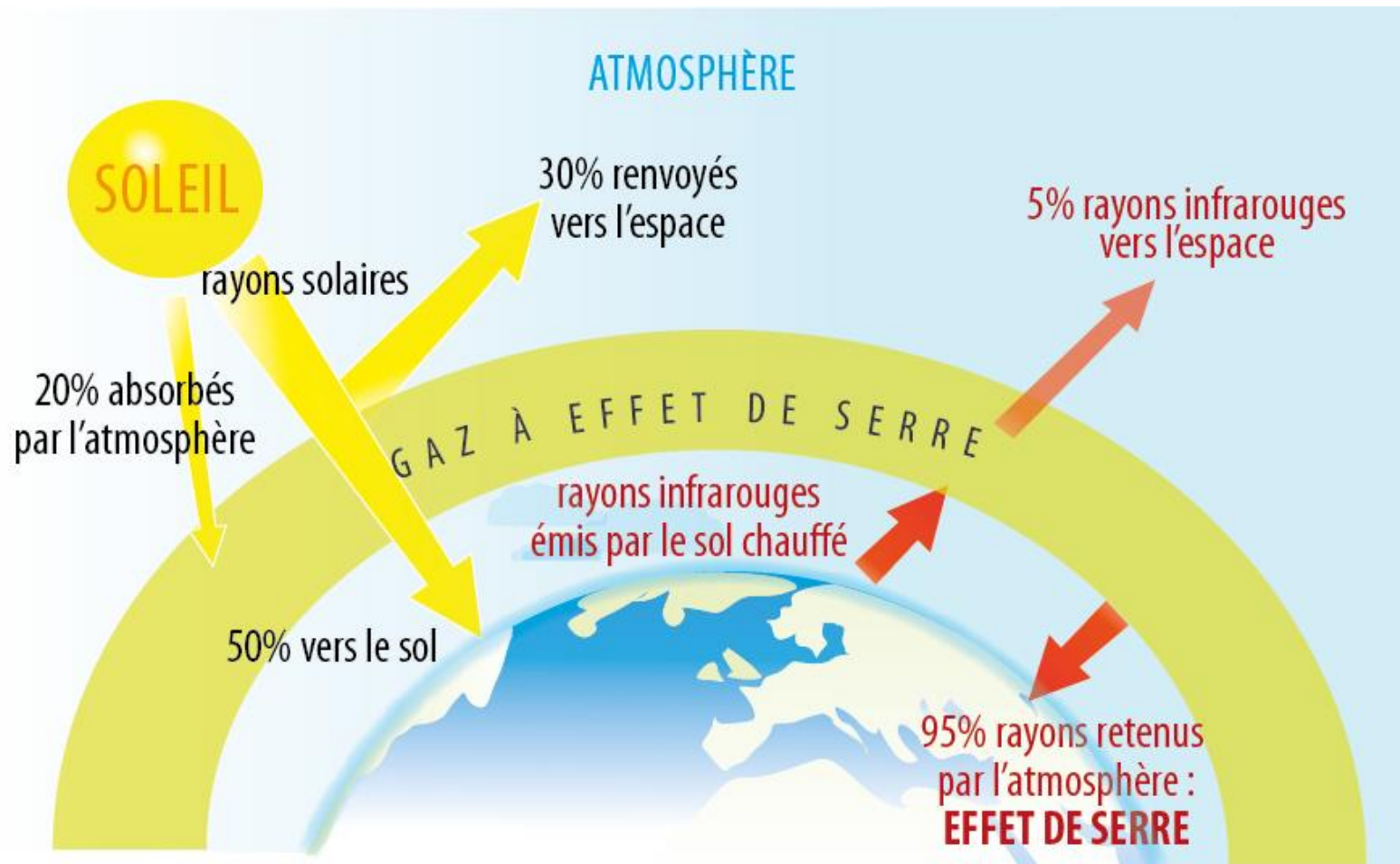
Demande en électricité par région
 Source : World Energy Outlook 2017, AIE

• 2015
 • Augmentation d'ici 2040

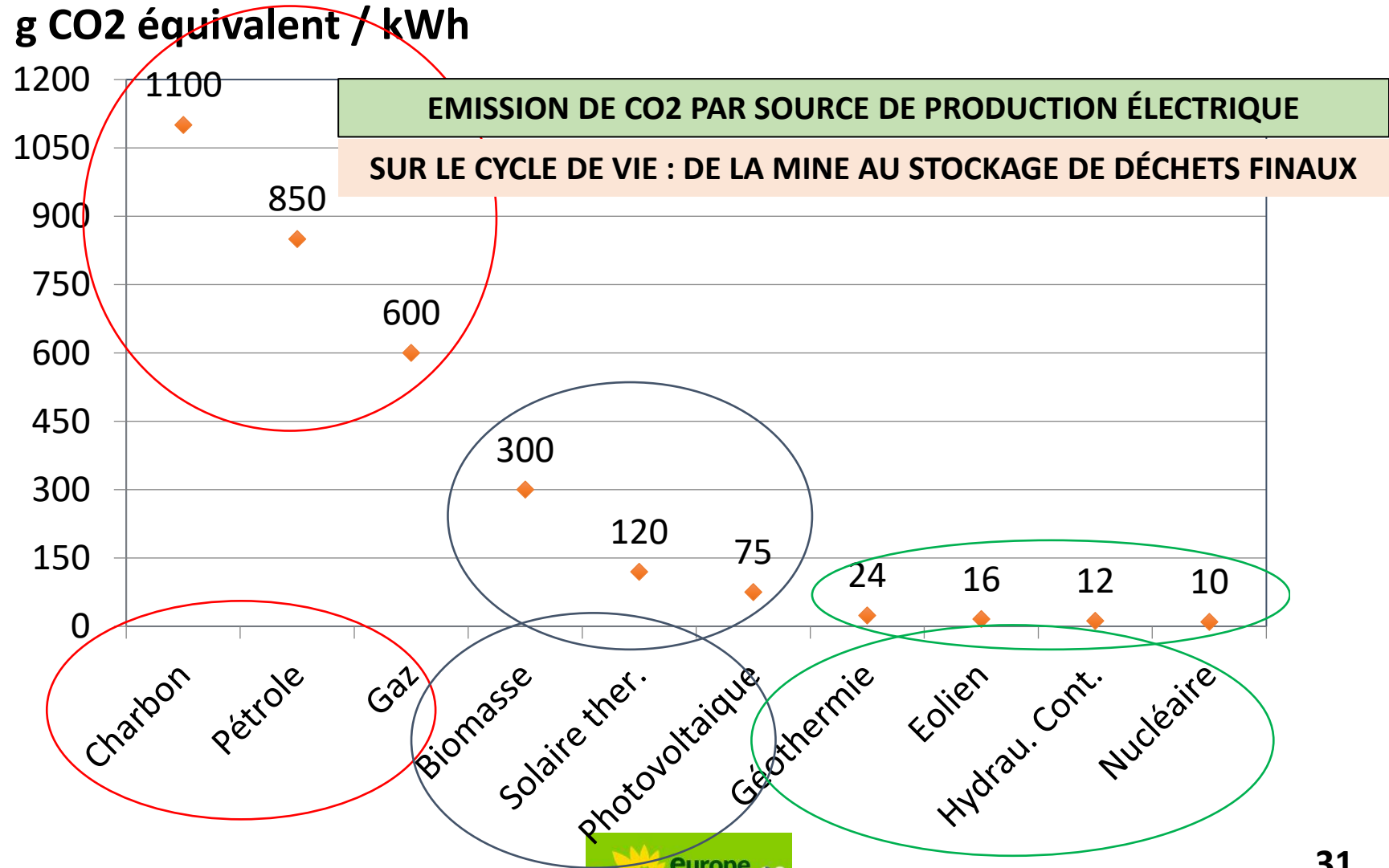
Rejets C02* vs PIB (PPA)** par habitant (2015)



*La combustion de charbon, de pétrole et de gaz
augmente la concentration de CO₂ dans l'atmosphère
ce qui provoque un réchauffement climatique*

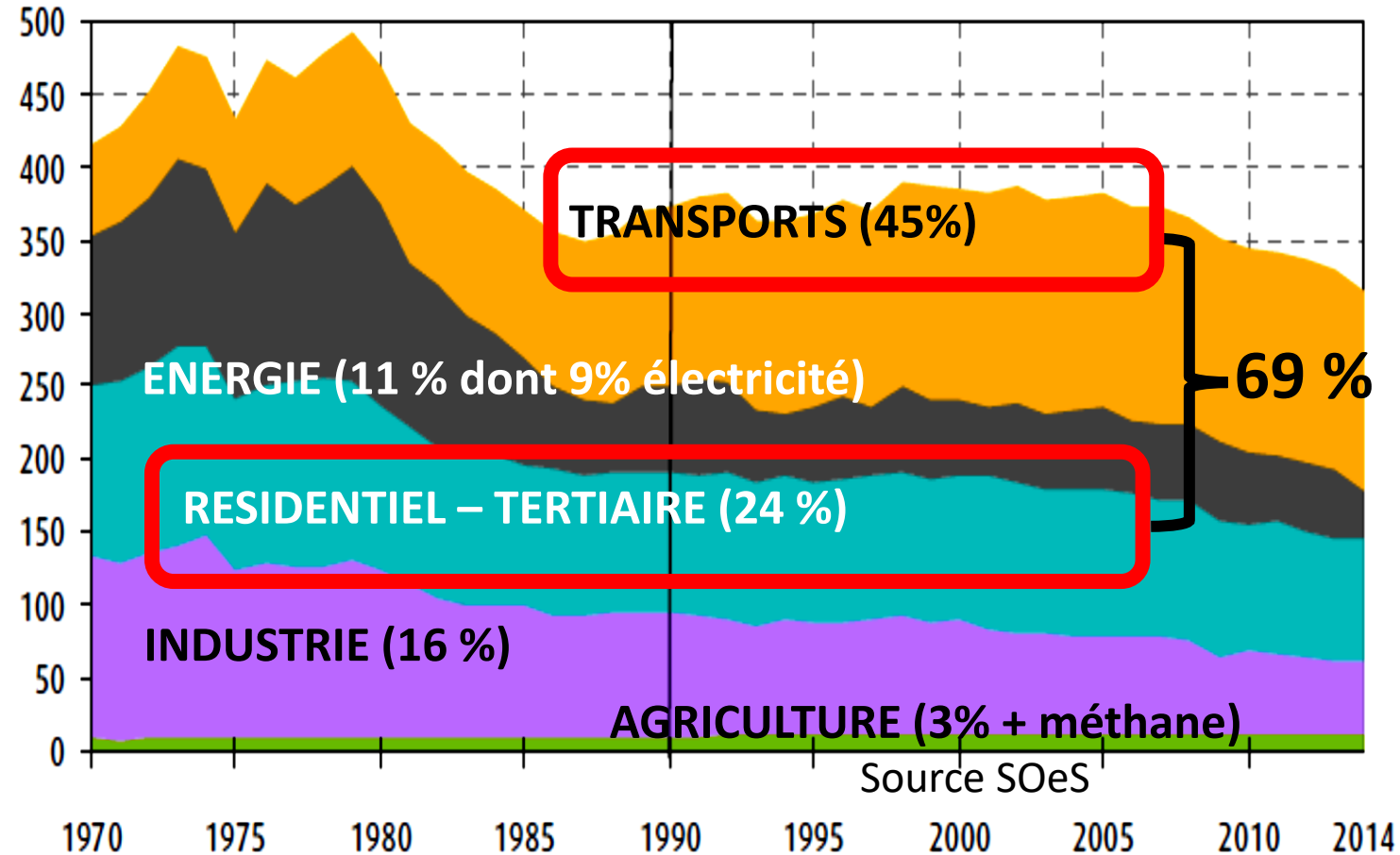


Quelles solutions ?



France, priorités par rapport aux émissions de CO₂

(303 Mt CO₂ en 2014, env. 1% des émissions mondiales)



Pertes de rendement de l'utilisation de

l'hydrogène pour le transport

(PAC = piles à combustible)

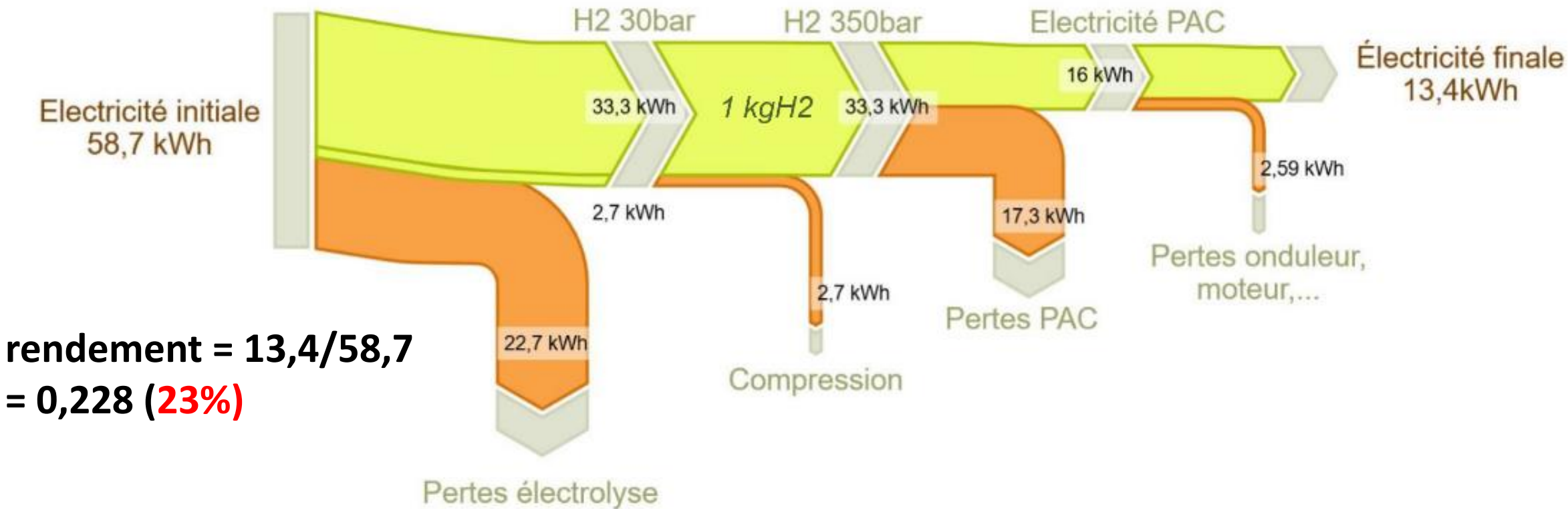


Figure 2 : Diagramme de Sankey, exprimant l'énergie nécessaire pour produire un kg d'hydrogène, ainsi que l'énergie électrique résultante.

Si tous les transports (530 TWh) étaient réalisés en France avec de l'hydrogène et des piles à combustible ?

L'énergie actuellement nécessaire est 553 TWh, ce qui correspond (avec une efficacité supposée de 40%) : 221 TWh à la roue

Ce sont donc $221/0,228 = \mathbf{1000\ TWh}$ dont il faudrait disposer pour produire l'hydrogène par électrolyse !

Utilisation des batteries de voitures pour stocker l'électricité

- Batteries : 40 à 100 kWh ; conso : 20 kWh/100 km (14 en ville, 24 à la campagne)
- Au 1er janvier 2021, le parc automobile se compose de 38,3 millions de voitures particulières, 5,9 millions de véhicules utilitaires légers (VUL), 600 000 poids lourds et 94 000 autobus et autocars en circulation.
- Supposons que le parc va diminuer à 30 M VP + VUL ; batteries de 60 kWh => $30M * 60k = 2000 \text{ GWh} = \mathbf{2 \text{ TWh de stockage} = \text{moins de 2 jours de consommation actuelle en hiver !}}$
- Annonce récente : TotalEnergies a déjà 130 MWh de stockage et va ouvrir son plus grand parc de **75 MWh (25 MW) seulement !**

1- Quel mix énergétique en 2050

Quelques références pour mieux comprendre les enjeux

Les métaux stratégiques pour la transition énergétique, par Christophe POINSSOT (Dir. BRGM)

<https://provence.sfen-regions.org/wp-content/uploads/sites/3/2022/05/lien-et-minutage-conf.-Poinssot.pdf>

TerraWater : Scénario énergétique pour la neutralité carbone de la France en 2050 et au-delà

<https://www.voix-du-nucleaire.org/terrawater-telechargement/>

RTE : Futurs énergétiques 2050 : les scénarios de mix de production à l'étude permettant d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050

<https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques/>

Négatep, pour réduire les émissions CO2 de la France d'ici 2050-2060 ; Sauvons le Climat ; Les Unpertinents

2^{ème} séquence :

**Quelle faisabilité technique
d'un scénario basé sur une part importante
de nucléaire dans notre mix énergétique ?**

Nucléaire : 4 chantiers majeurs pour maintenir une base nucléaire décarbonée

Restaurer le productible malgré les enjeux de CSC

- Tenir le calendrier des réparations exigées par l'autorité de sûreté

Tirer les leçons de l'évènement CSC et éviter une nouvelle crise de ce type

 - Développer de meilleures gammes de contrôles et de caractérisation
 - Renforcer la robustesse de l'instruction des décisions de sûreté

Réussir le prolongement à 60 ans et au-delà

- Anticiper et préparer l'instruction des points techniques sensibles: cuve, câbles, étanchéité enceinte, révision des spectres sismiques, adaptation

Bénéficier de l'expérience américaine et des instructions VD4

Mobiliser toutes les ressources de R&D disponibles (notamment du CEA)

Démarrer la première tranche EPR2 en 2035 puis industrialiser le déploiement

- Démontrer (via les revues de jalons) la robustesse, la constructibilité et le caractère industriel du design EPR2

Déterminer la stratégie d'exécution et contractuelle adaptée

Assurer le renouvellement des générations et la disponibilité des ressources humaines, techniques et industrielles

Développer des filières alternatives dans le nouveau nucléaire

- Appliquer à NUWARD une méthodologie et gouvernance similaire à EPR2 pour garantir la compétitivité du design

Bénéficier de l'expertise du de l'agence de programme pour l'innovation nucléaire du CEA pour instruire les différentes technologies disponibles et appuyer les start-ups françaises

Mobiliser les financements de France 2030

4 grands programmes en cours



Grand carénage

La nécessité d’anticiper l’effet falaise sur la décennie 2030-2040 implique de lancer le **renouvellement du parc** dès 2030-35

Figure 3 : Distribution des mises en service du parc nucléaire existant en 2019.
(Source : SFEN)

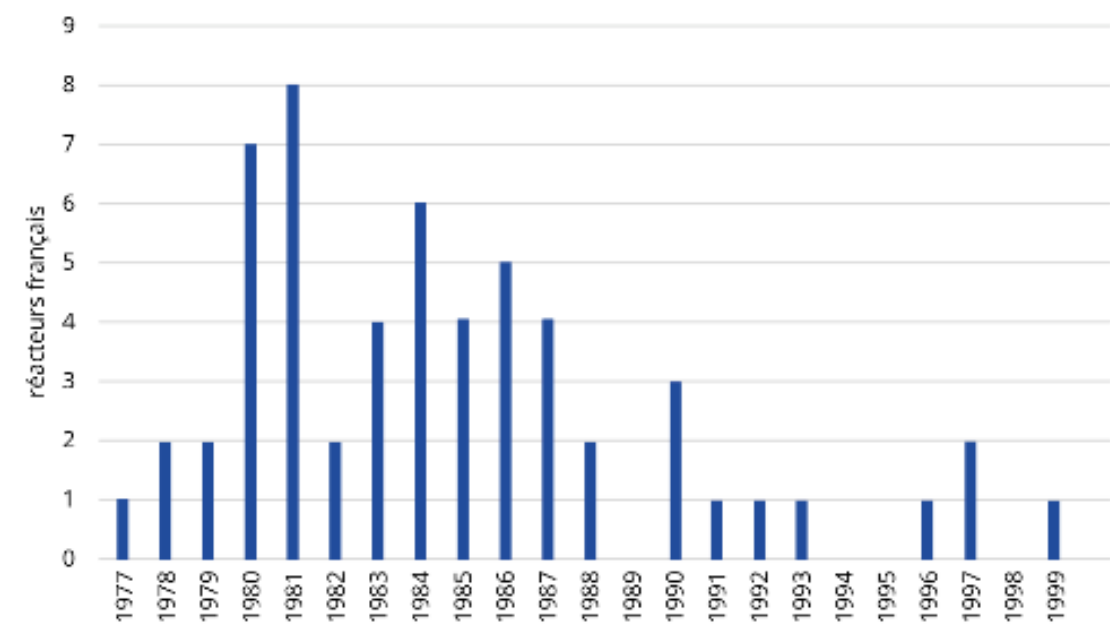
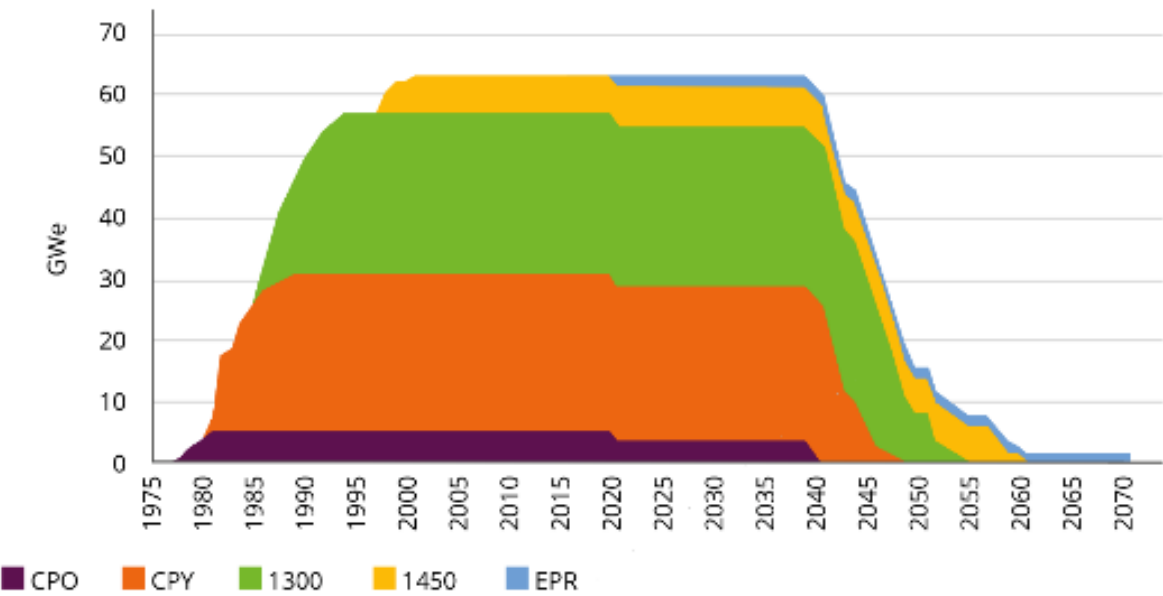


Figure 4 : Évolution du parc nucléaire français avec une hypothèse de durée de fonctionnement à 60 ans.
(Source : SFEN)



2- Faisabilité technique / nucléaire

La France s'est dotée en 20 ans d'un parc de près de 60 GW de nucléaire.

On peut donc extraire de notre expérience nationale les conditions de cette réussite.

La poursuite et le développement du nucléaire s'appuient sur 4 axes :

1) La poursuite d'exploitation des réacteurs actuels : protections contre le flux de neutrons sur la cuve primaire

⇒ au moins 60 ans, voire plus comme aux Etats-Unis

⇒ adoucir l'effet falaise de mise à l'arrêt des réacteurs de 2^{ème} génération à partir des années 2040

2) Le lancement industriel des EPR2 de 3^{ème} génération :

- stabiliser en France les exigences et procédures de sûreté,
- simplifier et systématiser la conception du réacteur,
- former des compétences,
- recréer une filière industrielle de sous-traitants.

580 TWh = 45 EPR2
2 à 3 par site sur les 18
sites nucléaires existants

3) Le lancement des SMR de 3^{ème} génération :

- réacteurs de faible à moyenne puissance (300 MW au maximum)
 - certifiés dans les années 2030 ; disponibles de façon industrielle dans les années 2040
 - intrinsèquement sûrs (sûreté passive)
- => chaleur industrielle et domestique,
=> électricité pour les besoins locaux (industrie)

4) Si le nucléaire prend un grand essor dans le monde, **réacteurs de 4^{ème} génération à neutrons rapides**

Pour exploiter nos réserves en Pu-239, et U-238 (300.000 tonnes)

- réacteurs à métal liquide ? => nouvelles usines de traitement du combustible utilisé
- réacteurs à combustible fondu ?
- extrapolés des petits réacteurs en cours de conception ?

2- Faisabilité technique / nucléaire

En résumé

Depuis **plus de 70 ans** qu'on fait du nucléaire de par le monde, ce ne sont pas les solutions **techniques** qui manquent pour assurer une fourniture d'énergie **nucléaire bas-carbone** : les Soviétiques ont fait des réacteurs pour

- la désalinisation de l'eau,
- le chauffage des villes,
- la propulsion des brise-glaces,
- en plus de l'électricité.

C'est une question de volonté politique et donc **sociétale**, avec le développement du **cadre réglementaire** et des **compétences techniques et humaines**.

2- Faisabilité technique / nucléaire

Débat

Quelle faisabilité technique
d'un scénario basé sur une part
importante de nucléaire dans notre mix
énergétique ?

2- Faisabilité technique / nucléaire

Quelques références pour mieux comprendre les enjeux

Programme de nouveaux réacteurs nucléaires en France, par Olivier BARD, EDF

https://provence.sfen-regions.org/wp-content/uploads/sites/3/2022/04/7_Olivier_Bard_EDF.pdf

Le projet d'EPR à Hinkley Point au Royaume-Uni, par Catherine BACK, EDF

<https://provence.sfen-regions.org/wp-content/uploads/sites/3/2022/04/Catherine-BACK-Lien-et-minutage-du-film.pdf>

Les réacteurs de 3ème génération : l'EPR et ses concurrents, par Jean-Luc JACOUD,

Framatome : <https://provence.sfen-regions.org/evenement/les-reacteurs-de-3eme-generation-concurrents-de-lepr/>

Nucléaire du futur : NUWARD™, le SMR européen, A. DOUVENEAU et B. LECARPENTIER (EDF)

<https://provence.sfen-regions.org/wp-content/uploads/sites/3/2022/11/Nuward-deroule-video.pdf>

Le CEA lance des start-ups de systèmes énergétiques nucléaires

<https://www.linkedin.com/in/patrick-michaille-9596802b/>

3^{ème} séquence :

**Comment peut-on aujourd'hui et demain
apprécier la dangerosité technique de la
filrière nucléaire civile en France ?**

Les dangers de la radioactivité se manifestent

- 1) en cas d'accident, pendant **l'exploitation** du réacteur ;
- 2) avec le déchargement du **combustible utilisé**, très radioactif,
- 3) jusqu'à ce que tous les **déchets** soient traités ;
- 4) lors du **démantèlement** du réacteur.

Accidents

Tchernobyl : 3 causes de l'accident (pas uniquement techniques !)

Conception : réacteur instable à puissance intermédiaire (**aspect technique**)

Culture de sûreté : une équipe d'exploitation n'hésitant pas à violer les consignes,

Transparence (transfert des informations aux autorités) : absente totalement à l'époque soviétique

Conséquences de la catastrophe de Tchernobyl

[https://www.energethique.com/file/ARCEA/Argumentaire/Fiche N 46 Accident de Tchernobyl.pdf](https://www.energethique.com/file/ARCEA/Argumentaire/Fiche_N_46_Accident_de_Tchernobyl.pdf)

Liquidateurs : Exposés à des doses létales en quelques minutes,

- **28** d'entre eux, les plus irradiés, moururent au cours des 2 ou 3 semaines suivantes.
- **19 autres décédèrent entre 1987 et 2004**, pour des causes diverses pas nécessairement associées aux rayonnements (total = 47).

Les **600 000** liquidateurs et **400 000** personnes évacuées ont été suivis de façon diverse. L'OMS estime à **4 000** le nombre de décès **prématurés** en 20 ans, dus à l'exposition radiologique.

France , en 20 ans : $\approx 700\,000$ décès prématurés suite à des cancers du poumon (tabagisme)

Conséquences de la catastrophe de Tchernobyl

cancers de la thyroïde : Le rapport des Nations Unies (UNSCEAR) réactualisé en 2011 confirme le chiffre de **7000**, en très grande majorité chez les jeunes enfants.

Le nombre de décès connus depuis 2006 est de 15, car ce type de pathologie est opérable. Les doses moyennes à la thyroïde chez les personnes atteintes d'un cancer ont été évaluées à **500 mSv**.

La consommation de produits laitiers locaux, la **carence en iode** chez des populations consommatrices de sel gemme, la **pollution chimique des sols de Bélarus**, ont été des facteurs aggravants.

Conséquences socio-économiques

Arrivant après la guerre en Afghanistan, la catastrophe et les mensonges des autorités soviétiques ont provoqué la chute du régime et la dissolution de l'URSS. L'inflation a atteint un facteur 1000 en Russie et 100.000 en Ukraine ! => Remise à zéro de l'économie et de la société (écoles, hôpitaux) avec un fort impact psychologique sur la population.

3- Dangerosité technique / nucléaire

L'accident de Fukushima introduit d'autres paramètres (non techniques):

- la capacité d'anticipation d'une situation ingérable,
- le manque d'autorité de l'administration de surveillance.

Car après le tsunami du sud-est asiatique de décembre 2004,

les tranches 1 à 4 auraient dû être mises à l'arrêt définitif !

Pour la France, l'accident de référence est celui de **TMI (*Three mile island*)**, où certes le cœur a fondu, mais sans entraîner de rejets radioactifs à l'extérieur qui auraient nécessité un **déplacement de population** (=> crise psycho-sociologique)

3- Dangerosité technique / nucléaire

Après l'accident de Fukushima, EDF a créé une **Force d'action rapide nucléaire**, la FARN, capable d'intervenir sur toutes les centrales dans les 24 heures, pour traiter l'accident et venir en secours du personnel d'exploitation. (voir références)

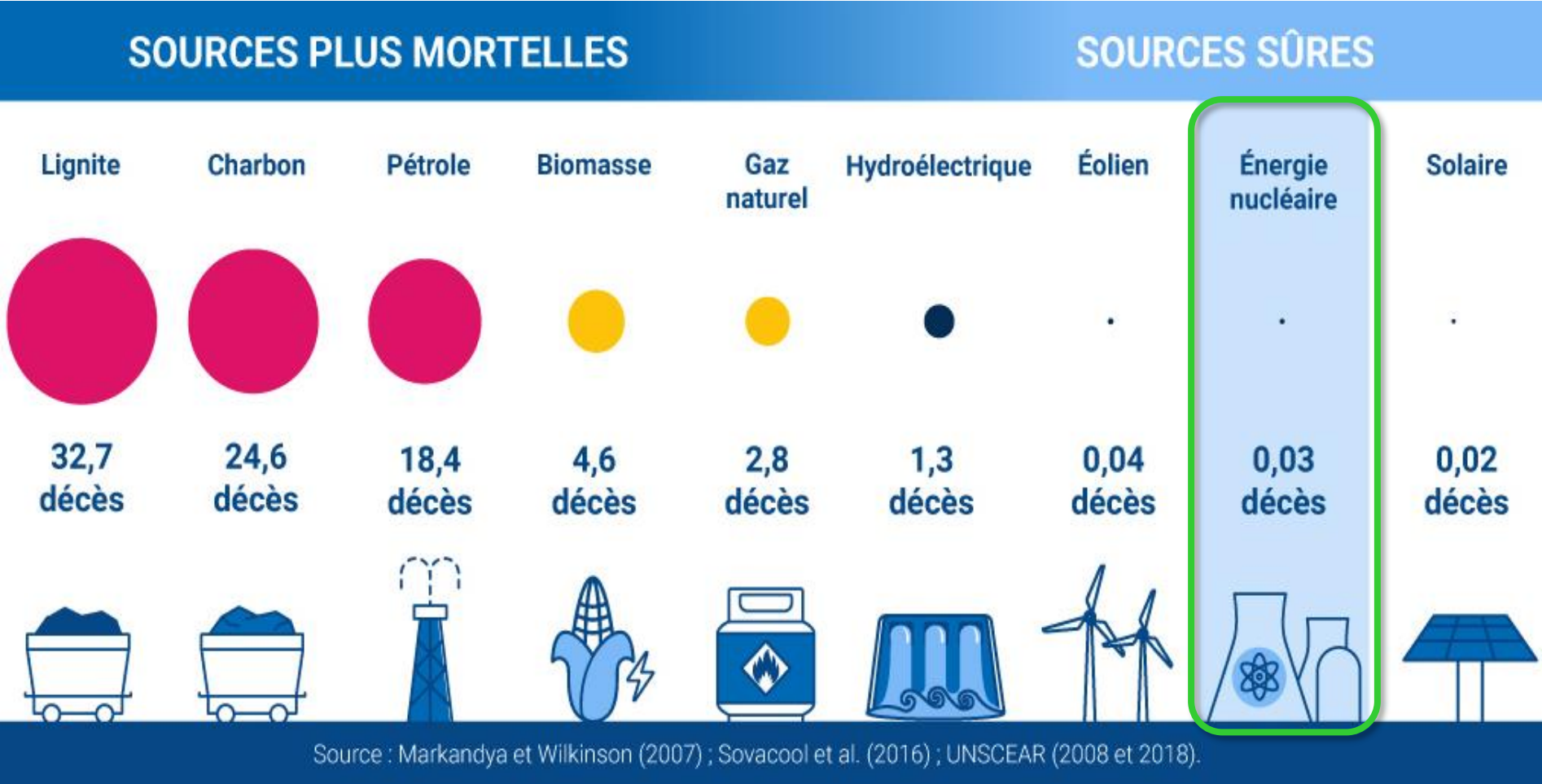
Etudes complémentaires de sûreté (ECS) : EDF a identifié comme devant être renforcé :

- les **réserves d'eau** et les circuits de secours des générateurs de vapeur (« ASG ») ;
- l'autonomie de production d'énergie avec, pour chaque tranche, un **diesel d'ultime secours (DUS)** robuste vis-à-vis de l'inondation et du séisme ;
- la **tenue au séisme des filtres à sable** utilisés en cas de dépressurisation de l'enceinte
- les **locaux de crise** (bloc de sécurité « **BDS** »).

3- Dangersité technique / nucléaire

Nb de décès liés aux :

- accidents
 - extraction,
 - transformation
 - production de l'énergie,
- pollution de l'air (production, transport, utilisation des combustibles),
- résultant du changement climatique



3- Dangerosité technique / nucléaire

La gestion des déchets radioactifs

Qu'il s'agisse de l'exploitation courante et du combustible utilisé, ou des déchets de démantèlement, elle s'appuie sur

- une **protection totale des travailleurs, de la population, et de l'environnement**, par
- **isolation vis-à-vis de la biosphère** après un
- **tri selon le type de déchet**.

Par exemple, les déchets de très haute activité provenant du combustible, sont fondus dans une matrice de verre, elle-même coulée dans un conteneur d'acier, dont la durée de vie est de plusieurs milliers d'années. Ces conteneurs cylindriques seront ensuite placés dans des alvéoles au sein d'un sous-sol argileux qui n'a pas évolué depuis des millions d'année, à 500 m de profondeur : ce sont ainsi 4 barrières de protection étanches qui sont placées entre la source et la biosphère, le public et l'environnement.

Les déchets

Différents types de colis de déchets



Cimentés



Compactés

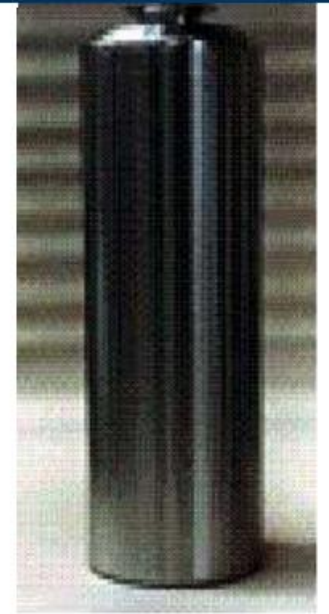


Bitumés



verre

Bloc de



Vitrifiés

Les déchets

- Les déchets nucléaires sont **classés** et gérés
- Principe de **zonage** : pas de seuil de libération (* sauf pour métaux TFA recyclables)
- **Négligeables en quantités** par rapport aux déchets industriels

Radioactifs		Non radioactifs	
TFA/FAVC	18.000 m ³	Déchets ménagers	900 millions tonnes
FAVL	1500 m ³	Déchets industriels banals	95 millions tonnes
MA		Déchets industriels spéciaux	7 millions tonnes
HA	130 m ³	Déchets chimiques toxiques	1 million m ³

- **1200 t/a** de combustible utilisé
- **1% Pu soit 12 t/a**
- 0,1% actinides mineurs (Am, Np, Cm) 1,2 t/a
- 46 t/a de PF dont **3,5 t/a HAVL**

En France, l'uranium et le plutonium sont recyclés ; reste # **5 t/a** de déchets vitrifiés et conteneurisés

Recyclage les déchets métalliques très faiblement contaminés

Recyclage < développement durable :

1 tonne d'acier recyclé => 20% d'économie d'énergie et 60% de réduction d'empreinte carbone.

Déjà en service en Allemagne et en Suède : ça n'empêche pas d'acheter des Mercedes et des Volvo !

compresseurs de l'usine d'enrichissement Georges Besse-1 d'Orano +

générateurs de vapeur des centrales à démanteler => **500 000t de métaux**

très peu radioactifs, décontamination de surface

La réglementation européenne définit des niveaux en dessous desquels un matériau peut être considéré comme non radioactif.

Ces valeurs garantissent une exposition **< 0,01 mSv/an**

A ces niveaux, la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) considère que **le risque est négligeable pour la santé et l'environnement**

Quelques références pour mieux comprendre les enjeux

L'expérience de la Force d'Action Rapide Nucléaire (FARN) par Pierre EYMOND (EDF)

<https://provence.sfen-regions.org/wp-content/uploads/sites/3/2022/07/minutage-conf.-Eymond.pdf>

Qu'avons-nous appris en France des accidents nucléaires dans le monde ?

[https://www.energethique.com/file/ARCEA/Argumentaire/Fiche N 50 REX accidents nucleaires.pdf](https://www.energethique.com/file/ARCEA/Argumentaire/Fiche_N_50_REX_accidents_nucleaires.pdf)

Les déchets radioactifs

[https://www.energethique.com/file/ARCEA/Argumentaire/Fiche N 03 Dejets radioactifs.pdf](https://www.energethique.com/file/ARCEA/Argumentaire/Fiche_N_03_Dejets_radioactifs.pdf)

TECHNOCENTRE, projet d'installation de valorisation des métaux TFA ; par M. Zilber, F. Mousset

<https://provence.sfen-regions.org/wp-content/uploads/sites/3/2022/04/211208-Conference-Marine-ZILBER-Fabrice-MOUSSET-diaporama.pdf>; <https://www.youtube.com/watch?v=hdJ10mvl444>

Débat

Nature de la source (Wikipedia)		mSv par personne et par an
Radon (gaz radioactif naturel dense souvent présent dans les rez-de-chaussées)		1,3
Irradiation d'origine médicale (radiographies, scanners, radiothérapies, etc.)		0,6
Éléments absorbés par alimentation (essentiellement du potassium 40 contenu naturellement dans les aliments)		0,5
Rayonnement cosmique		0,4
Rayonnement interne	100 Bq/kg (40K, 14C)	0,2

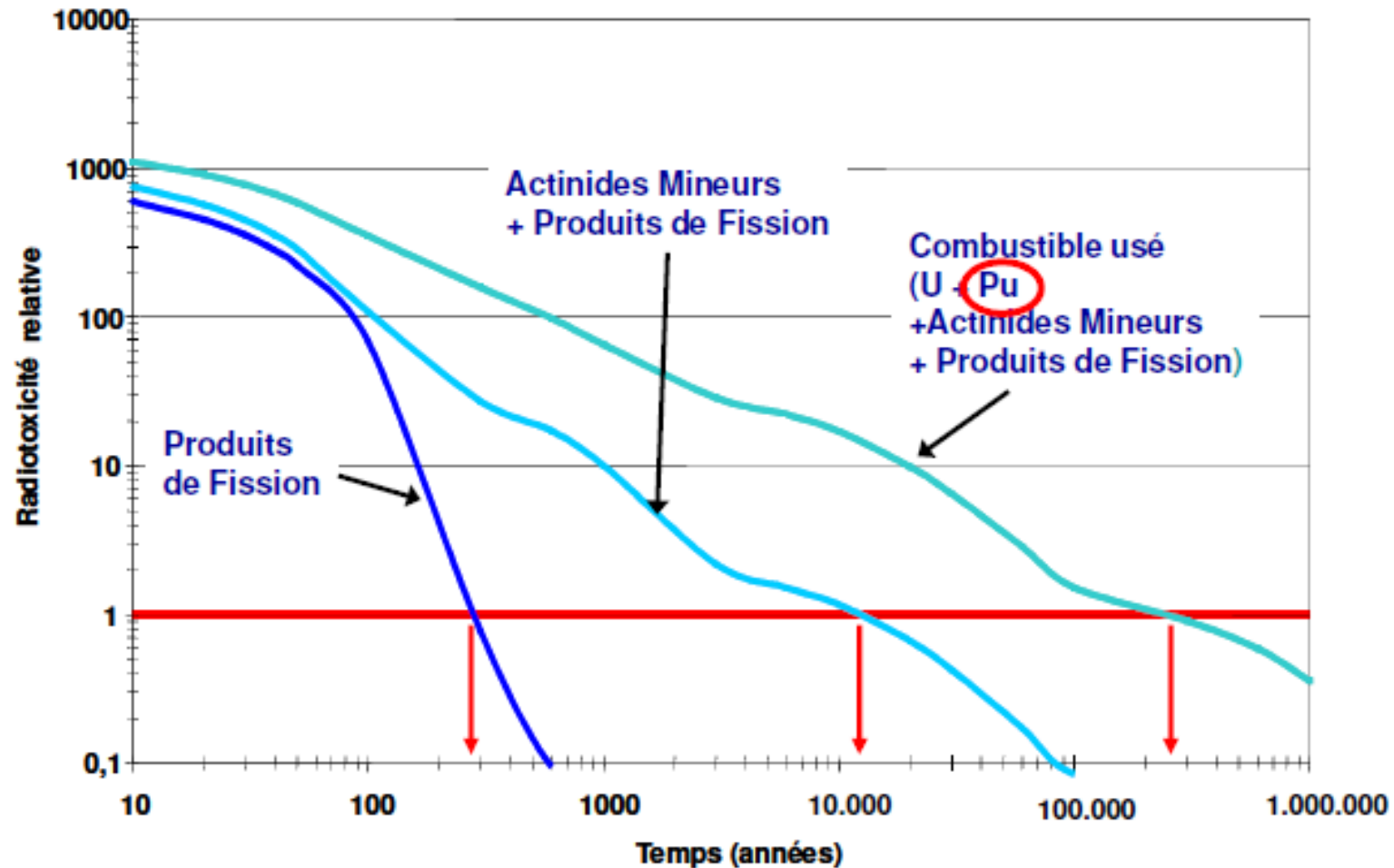
Mines, centrales à charbon, contrôles γ, etc .

Nucléaire civil

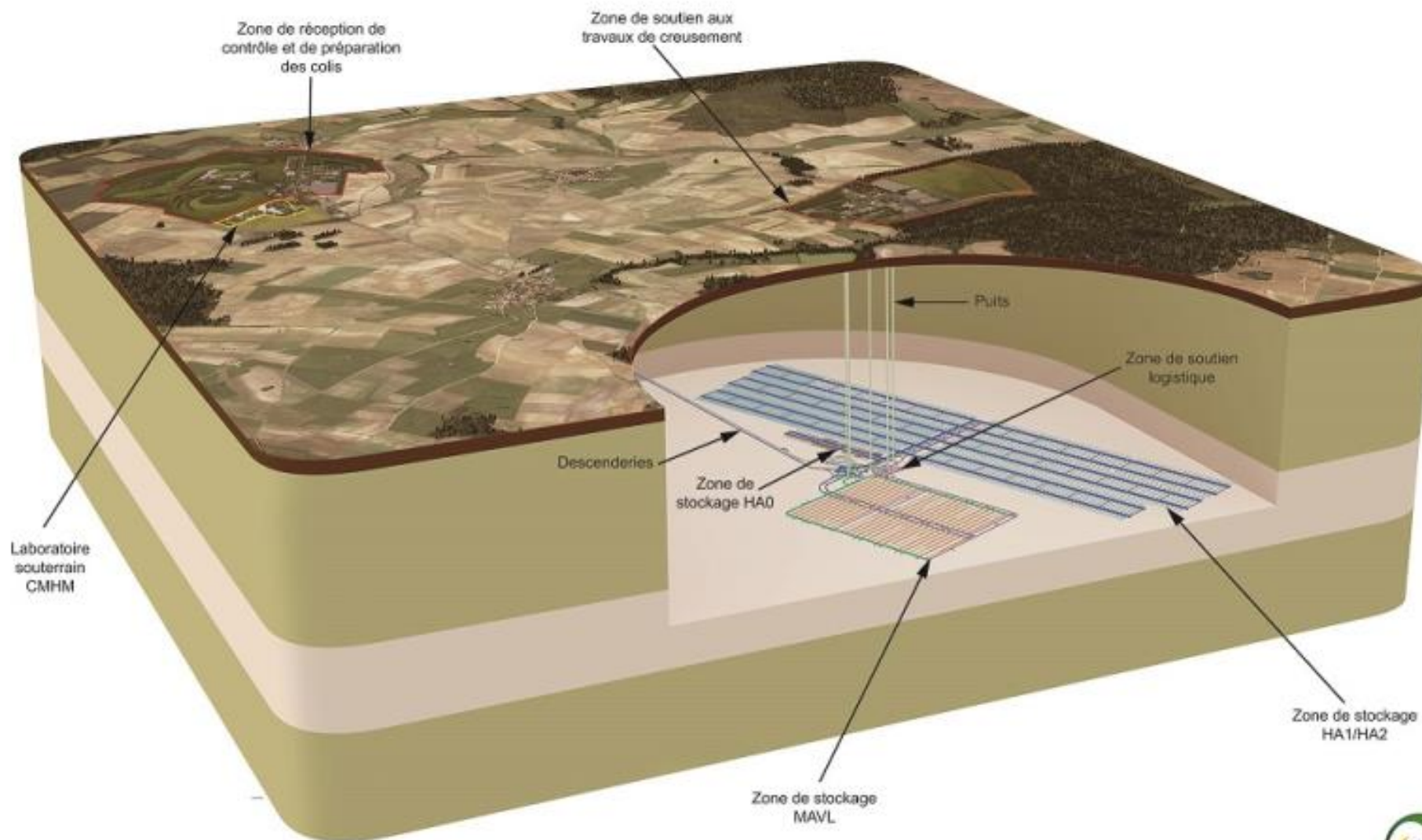
0,1

0,01

Radiotoxicité des déchets en fonction du temps



Bloc diagramme 3D Cigéo



C.IM.0EKS.15.0005.C

Echelle des ouvrages non respectée.
Pendage des formations géologiques non représenté.



.... Et les autres déchets ?

© AP Images/European Union-EP



- Sait-on ce qu'il y a dedans ?
- Nappes phréatiques ?
- On laisse aussi ça à nos enfants !

Attention aux **millions de tonnes de cendres toxiques des centrales au charbon** qui contiennent :

- **plomb,**
- **arsenic**
- **mercure**
- **cadmium**
- **uranium, thorium**

Source : Radioactivité Naturelle
Technologiquement Renforcée –
Robin des Bois/ASN.

4^{ème} séquence :

**D'un point de vue économique,
quelles sont aujourd'hui les filières à privilégier
pour arriver à la neutralité carbone
à moindre coût ?**

4- Coût des filières énergétiques bas-carbone

définir le cadre : pour quoi (pour quel résultat ?) ; pour qui ? pour quand ?

Coût induit : pour suppléer l'intermittence : quel est le coût du kWh non produit ? pour le patient hospitalisé, pour l'ordinateur de surveillance qui est arrêté, etc.

coût d'un « black out » sur le réseau européen (ENTSOE) : plusieurs milliards d'euros par jour !

et il faudra plusieurs jours pour rétablir le réseau : quel coût accorder aux barrages, aux STEPS, aux turbines à gaz qui permettront de rétablir le réseau ?

Le tableau établi par l'Université de Montpellier donne les coûts actualisés de l'énergie qui incluent les coûts du capital, les coûts fixes et variables de l'exploitation et de la maintenance, et du combustible nucléaire. On a ainsi pour les filières bas-carbone :

Système énergétique	Hydraulique	Nucléaire	Solaire	éolien	Biomasse
Coût actualisé (€/MWh)	31,6	58,5	68,6	72	74,3

Calcul des composantes du LCOE

Levelized Cost Of Energy : coût actualisé de l'énergie

$$LCOE = AAC + FOMC + VOMC + FC$$

Exploitation

Capital Fixe Variable Fuel Coût total

Energy	ACC	FOMC	VOMC	FC	LCOE
Sun	58.94	9.65	-	-	68.59
Wind	51.90	20.07	-	-	71.97
Gas	7.07	2.09	3.25	*	#
Hydraulic	22.04	8.15	1.39	-	31.58
Coal	16.09	5.58	5.42	*	#
Nuclear	30.79	14.34	4.60	8.80	58.53
Biomass	35.10	22.00	5.50	11.70	74.30

* : le coût du fuel dépend du prix du marché

: le LCOE dépend du coût du fuel

- *ACC* is the annualized capital cost expressed in €/MWh,
- *FOMC* are the fixed operating and maintaining costs expressed in €/MWh,
- *VOMC* are the variable operating and maintaining cost expressed in €/MWh,
- *FC* is the fuel cost (including the carbon price) expressed in €/MWh.

Timilsina, G.R., 2020. Demystifying the Costs of Electricity Generation Technologies (No. 9303), World Bank Group, Policy Research Working Paper, Policy Research Working Paper. Washington.

28 octobre 2022

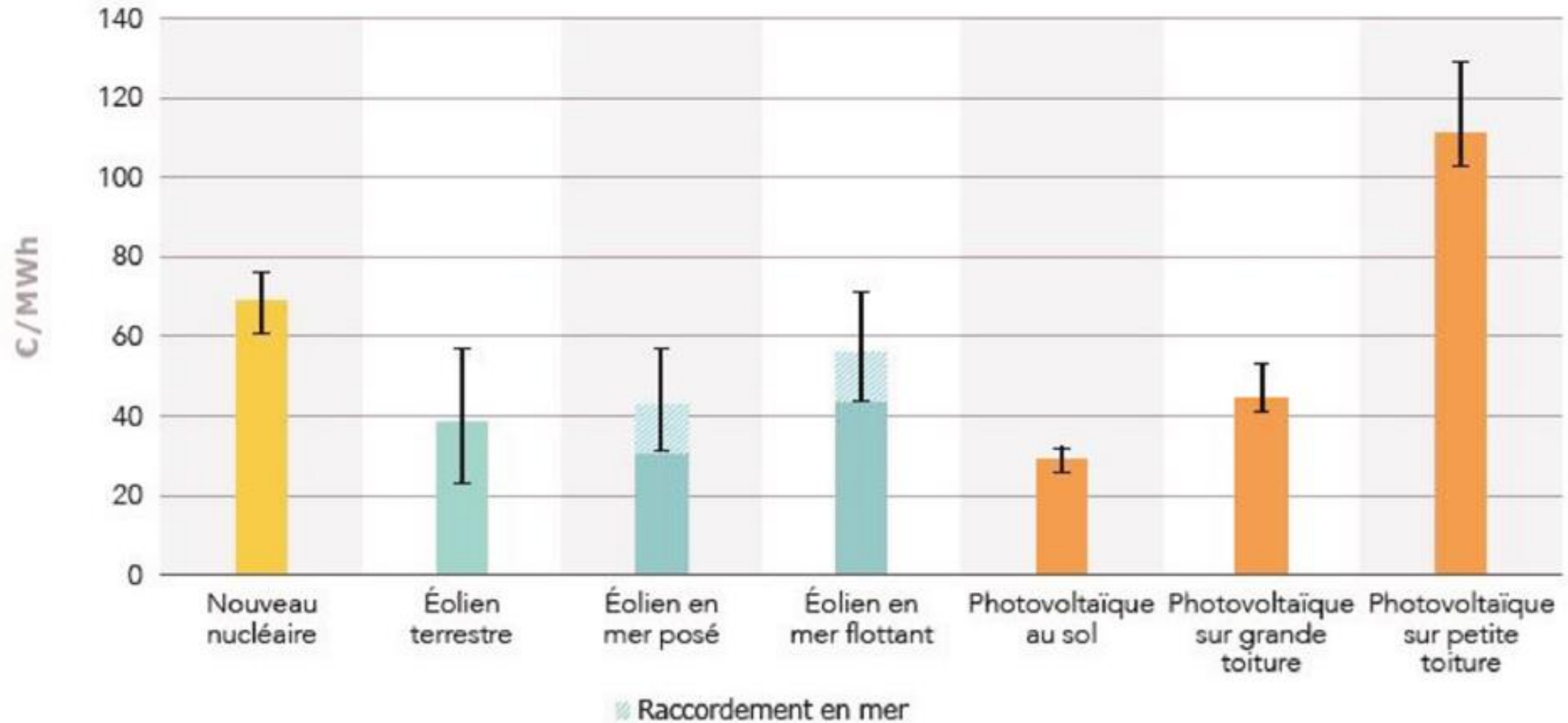
Séminaire de recherche EDF

11

19 jun 2023

65

Figure 21 : Coût de production des principales filières de production en France à l'horizon 2050
 (source : RTE, 2021)



4- Coût des filières énergétiques bas-carbone

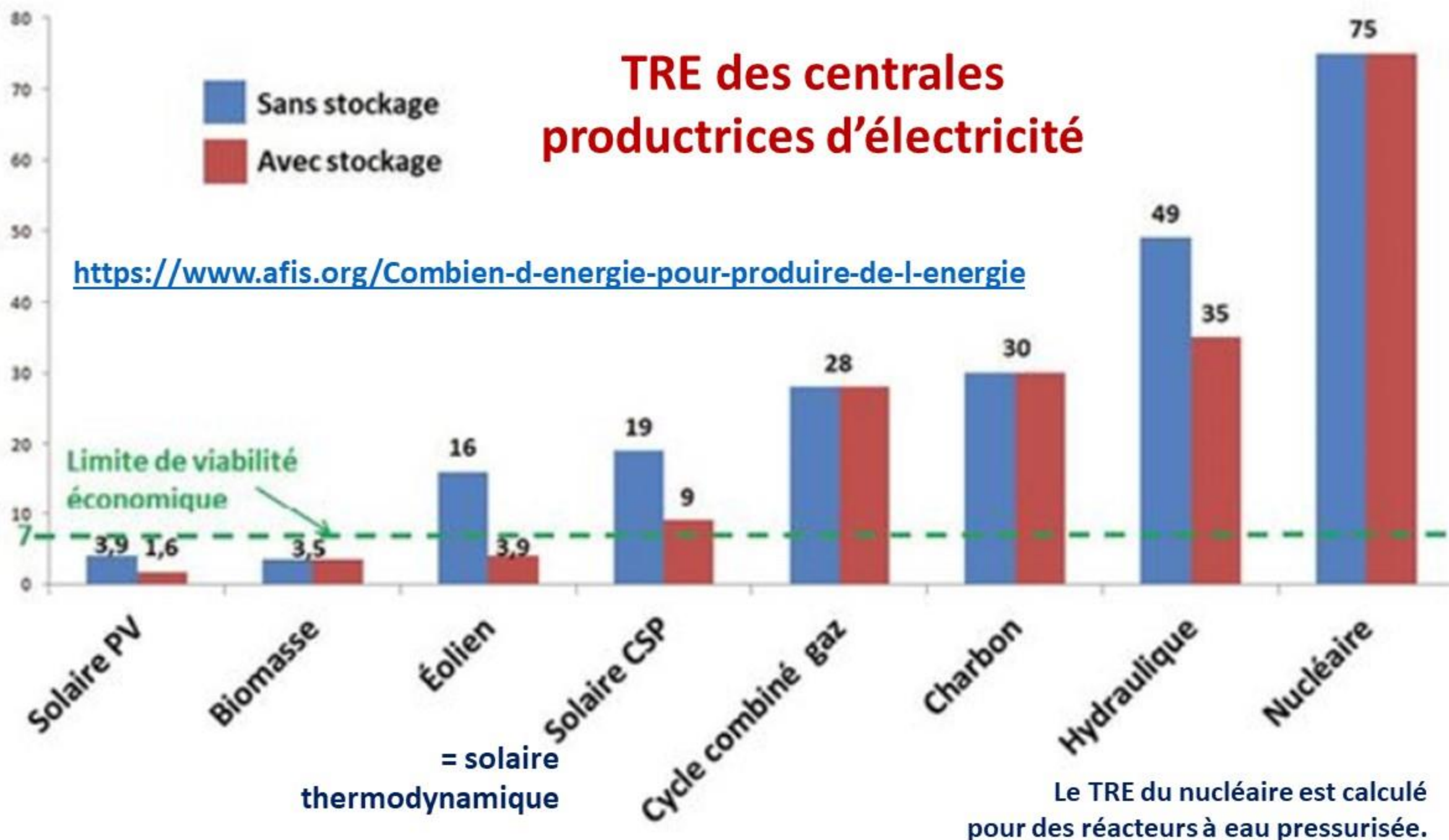
LCOE : Les coûts complets actualisés apparaissent de **60-70 €/MWh pour le nucléaire** avec un taux d'actualisation de 4% ; et **70 €/MWh pour les énergies intermittentes**,.

D'autres critères peuvent être considérés :

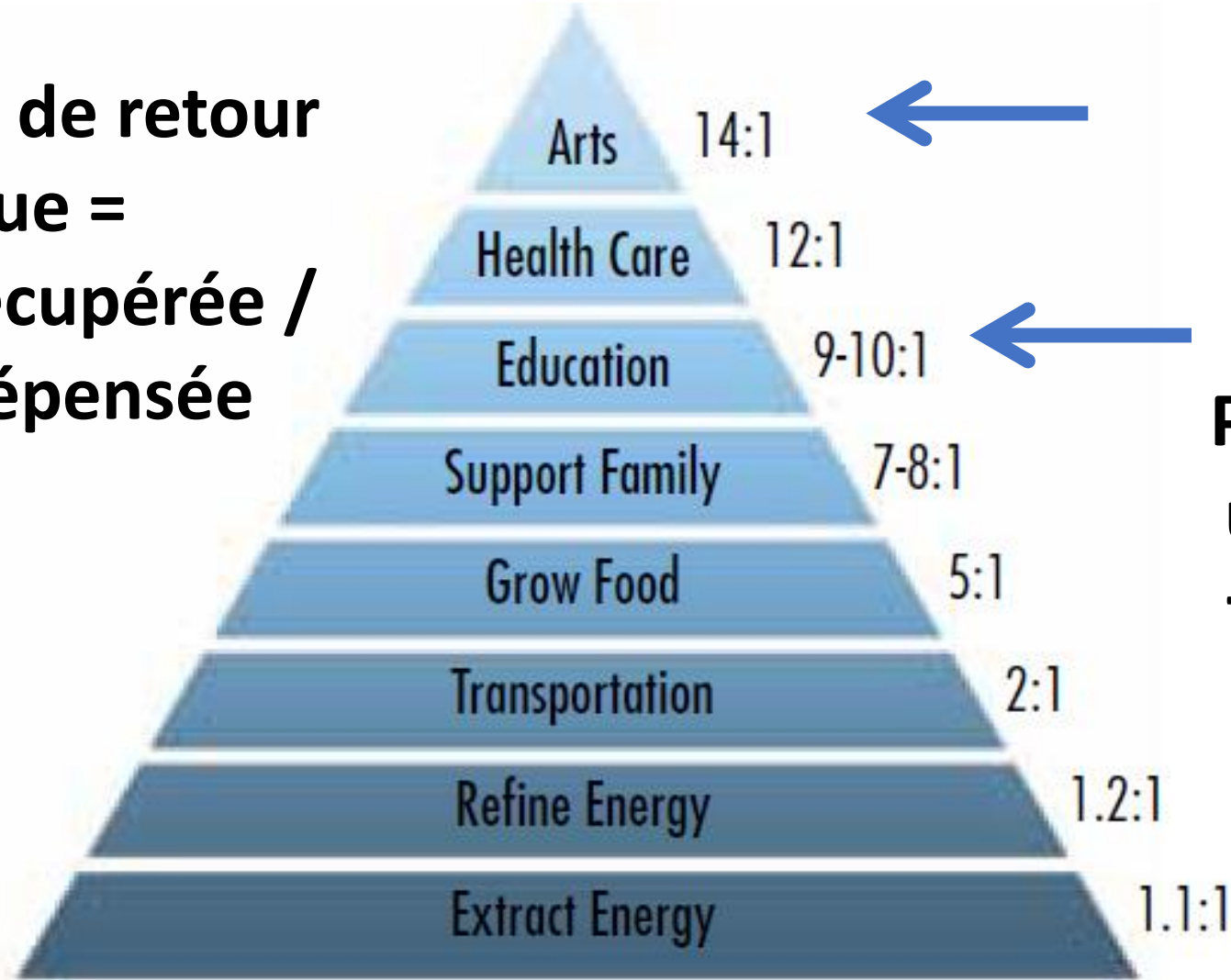
Le **taux de retour énergétique (TRE)** : le solaire photovoltaïque n'atteint pas la rentabilité économique, mais les prix ont fortement chuté !

Le « **taux de retour carbone** » : le solaire photovoltaïque épargne des rejets de CO₂ en Chine, où l'électricité est fortement carbonée. En France, où l'électricité est déjà fortement décarbonée, il faut 30 ans pour équilibrer les rejets de CO₂ d'un panneau chinois : c'est la durée de vie du panneau ! (J-M Jancovici)

TRE des centrales productrices d'électricité



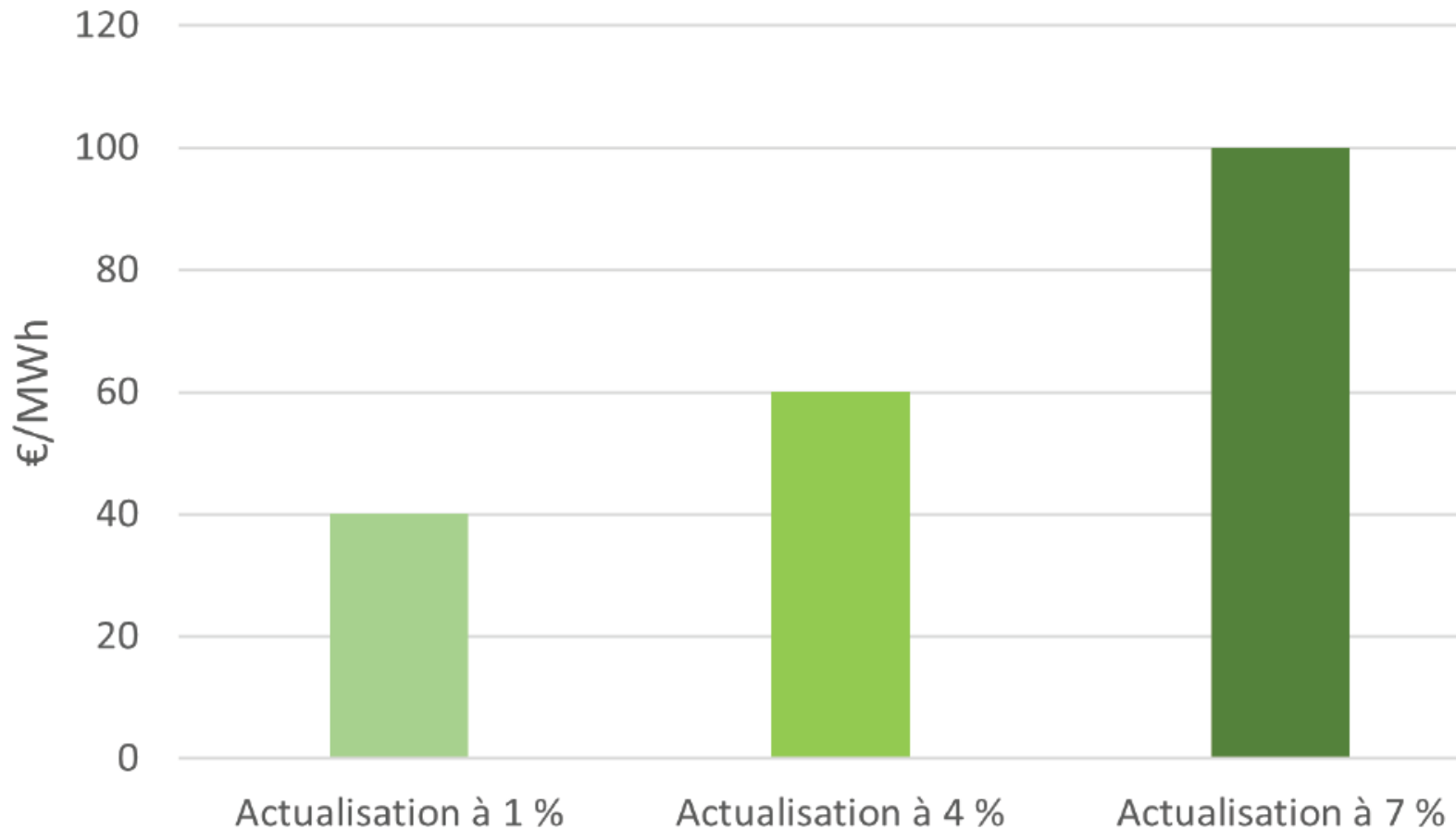
**TRE : taux de retour
énergétique =
Énergie récupérée /
énergie dépensée**



**Pour satisfaire
un échelon, il
faut que tous
les échelons
inférieurs
soient
satisfaits.**

4- Coût des filières énergétiques bas-carbone

Figure 19 : Les coûts de production actualisé des 3 paires d'EPR 2



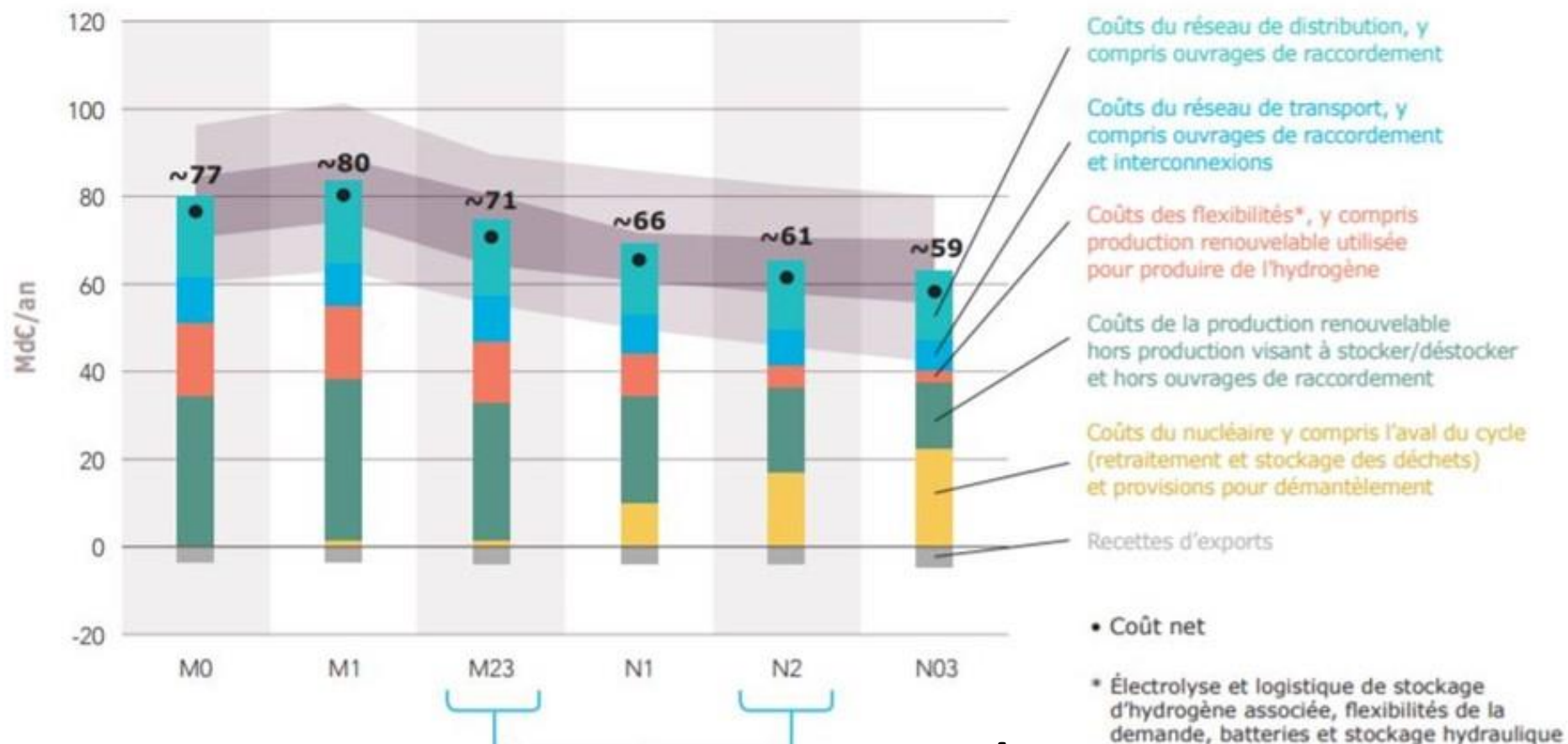
Sfen : Combien coûte le nucléaire ?

Economie du nucléaire dans le système électrique

p. 70/132

Scénarios RTE BP 2050 : mise en avant des « coûts systèmes »

Coûts complets annualisés des scénarios à l'horizon 2060



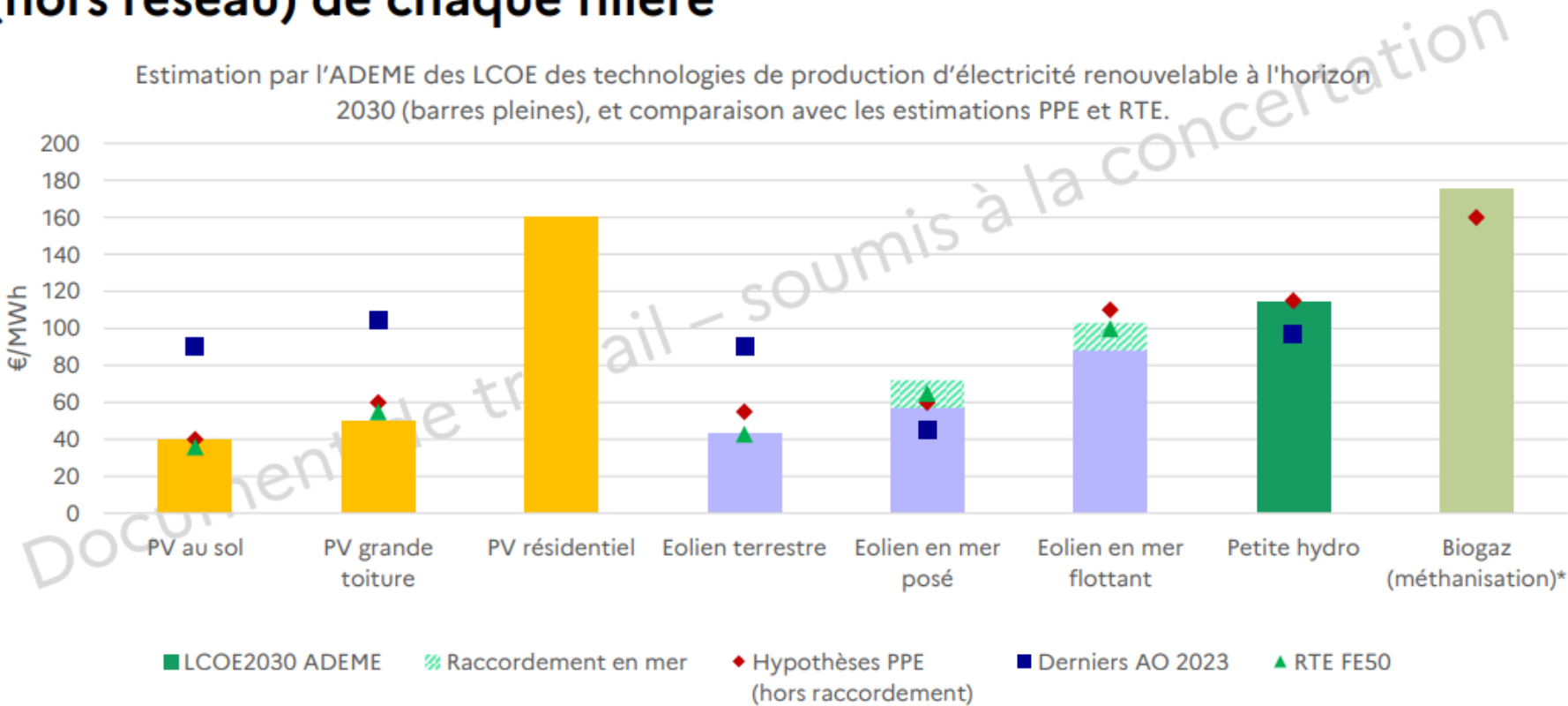
Différence entre **M23** et **N2** de **10Md€/an**

Évolution de l'écart de coûts complets annualisés entre les scénarios selon les variantes (en Md€/an)



Les scénarios avec renouvellement du socle nucléaire se montrent moins coûteux, même dans l’hypothèse extrême où le coût des futurs réacteurs seraient au niveau de l’EPR de Flamanville

Rappel des ordre de grandeur des coûts complets de production (hors réseau) de chaque filière



Conclusion : prudence !

Pour piloter la décarbonation de l'économie, le bon critère est le **coût de la tonne de CO2 évitée**. Cela aurait évité les errements de la Réglementation thermique RT-2012 qui privilégie le gaz (russe), et la RT 2020 qui est socialement inapplicable.

Développer le solaire photovoltaïque n'a de sens que si les panneaux sont produits en France, voire en Europe.

Tout comme les batteries qui permettront un stockage temporaire.

Arrêter de subventionner le consommateur, mais au contraire les fabricants français.

Obtenir des conditions financières favorables pour le nucléaire (taxonomie européenne).

Arrêter l'ARENH qui pille EDF au profit des *traders* (spéculateurs sur le marché de l'électricité).

Conclusion : en avant !

Assurer l'expertise de l'ASN, sans noyer les décisions dans des procédures administratives.

Reconquérir le marché des métaux critiques

Soutenir les développements technologiques en étant vigilant sur leur modèle technico-économique

- batteries,
- Production d'hydrogène bas-carbone
- Piles à combustible
- SMR/AMR

Rendez-vous le 24 novembre au colloque **Renouveau du nucléaire en France : les enjeux**

<https://provence.sfen-regions.org/evenement/renouveau-du-nucleaire-en-france-les-enjeux/>



Transition énergétique : la France en échec

Analyse et perspectives

Gilbert Bruhl, Dominique Grenèche,
Maurice Mazière, Patrick Michaille,
Jean-Pierre Pervès et Jean-Pierre Schwartz

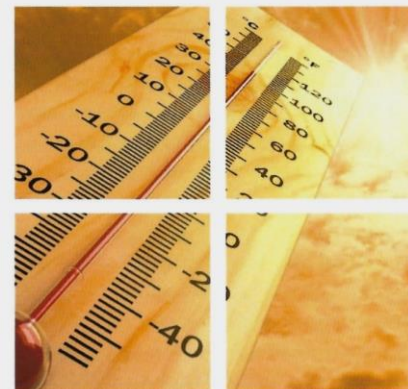
En libre accès sur



19 <https://www.edpopen.org/books/edp-open-books>



Réchauffement climatique Bonnes questions & vraies réponses



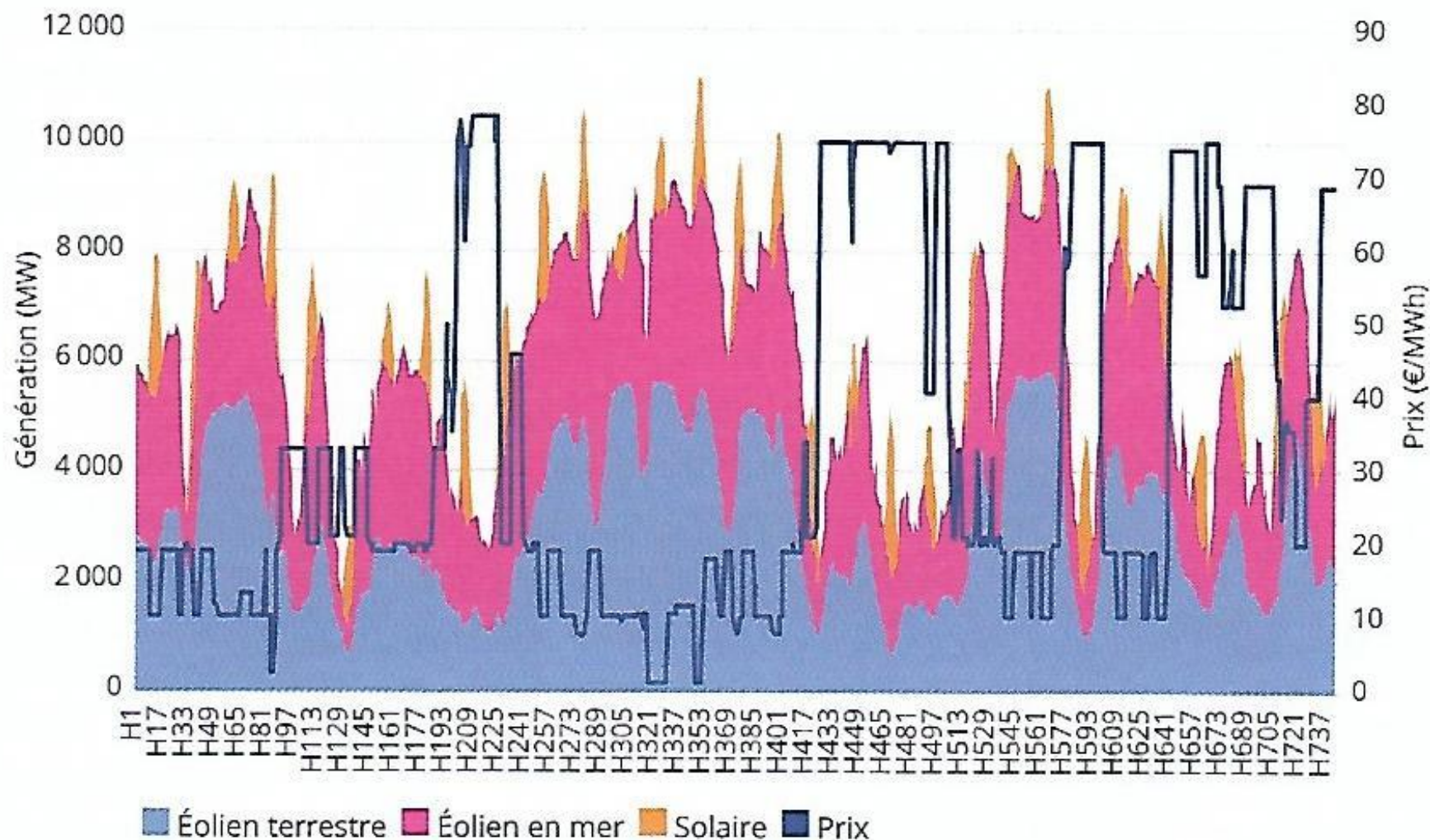
Sauvons le climat

4- Coût des filières énergétiques bas-carbone

Débat

Graphique 22 : Production renouvelable intermittente horaire par rapport au prix de l'électricité - Janvier 2050 (Source : Étude SFEN-CL)

Qui voudra
investir
avec des
prix aussi
fluctuants ?



La configuration du Danemark est exceptionnelle

Danemark : 5,8 M hab
Suède : hydro (+nuc)
Norvège : 150 TWh hydro



Que représentent les importations ?

L'indépendance énergétique n'est pas l'autarcie
Uranium importé = **5%** du coût de l'électricité

Diversité d'approvisionnement : Niger, Canada, Kazakhstan, Australie

Plus de **40 %** des réserves actuelles en uranium se trouvent dans l'OCDE

Les risques géopolitiques sont faibles.

- **Réserves énergétiques :**
Uranium appauvri (traitement du minéral)
Uranium légèrement enrichi (retraitement)
Plutonium (retraitement)

- La France dispose de **10 ans** de stock d'uranium stratégique sur son sol (deux ans pour la production d'électricité + stock d'uranium appauvri qui peut se substituer à 7-8 ans de consommation d'uranium naturel).
- En 2022, la France a importé plus de **100 milliards d'euros de produits pétroliers** et moins d'un milliard d'euros d'uranium.

