

Qui suis je ?

1/14

Chercheur, Physicien-Climatologue au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement



Pas de compétence professionnelle sur le sujet nucléaire

Compétence acquise dans un cadre extra-professionnel, par diverses lectures et interactions directes



Des personnes internes à la filière me mettent en avant, et j'en déduis (naïvement ?) que je ne dis pas trop de bêtises



Membre du CA de *Voix du Nucléaire*



Porte-parole de l'Association Française pour l'Information Scientifique



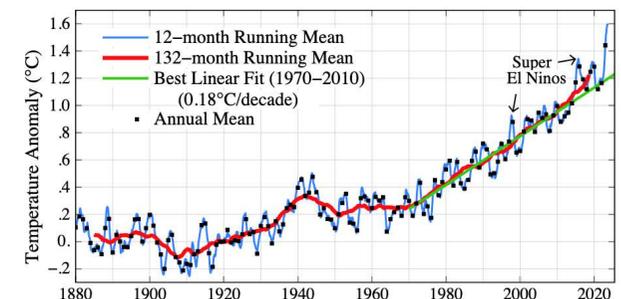
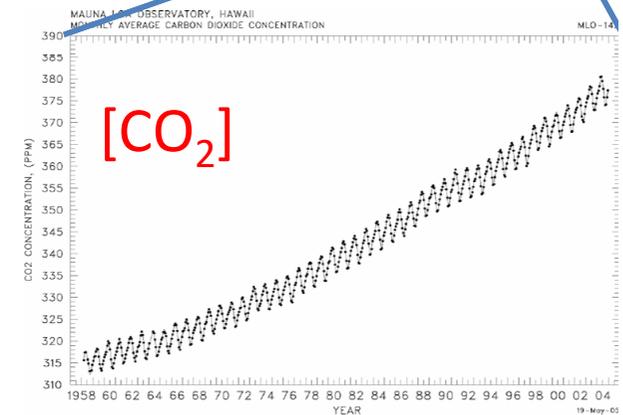
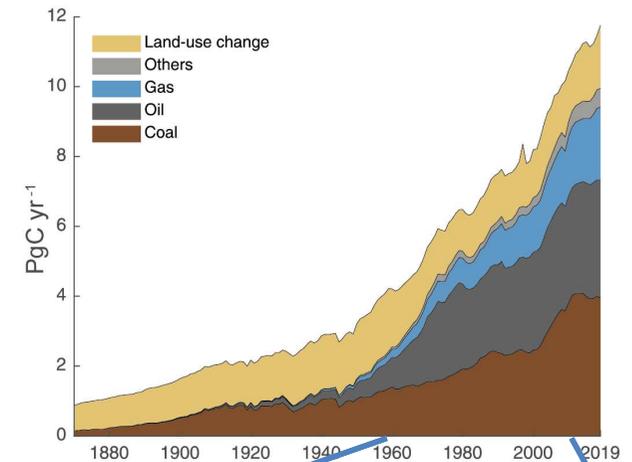
Augmentation des concentrations de CO₂ (et autres gaz à effet de serre) dans l'atmosphère du fait des activités humaines

Augmentation des températures et autres désordres climatiques (précipitations, niveau des mers, évènements "extrêmes" ...)

Objectif fixés par les états (COP-21) de limiter le réchauffement climatique à 2 degrés (avec objectif à 1,5)

L'objectif nécessite de réduire fortement et rapidement nos émissions de GES, à commencer par le CO₂.

Il faut sortir des fossiles !



Contexte :

Objectif de diminution des émissions de CO₂ (et autres GES) visant à la neutralité carbone

Vieillessement du parc nucléaire (\approx 40 ans)

Diminution du coût des énergies renouvelables (solaire, éolien)

Mais

Intermittence des énergies renouvelables

Aucune puissance « garantie »

Les solaire PV produit \approx 4-5 fois plus en été qu'en hiver alors que la consommation est \approx 2 fois plus élevée en hiver qu'en été en France

Scénarios

Certains affirment que on peut avoir une électricité 100% renouvelable

D'autres pensent que le nucléaire rend la transition beaucoup plus facile

RTF a étudié les coûts et prix technologiques de différents scénarii

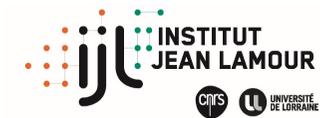
Qui suis je ?

4/14

Professeur émérite, Institut Jean Lamour, Univ-Lorraine

domaine de recherche Physique des plasmas

Président de la commission énergie & environnement de la Société Française de Physique, et membre du  é  de la Société Européenne de Physique



L'aboutissement du travail de notre commission, et auquel à activement participé François-Marie est un gros dossier sur la transition énergétique et les défis de la défossilisation, N°77 de Reflets de la Physique (📄 à commander sur <https://ypl.me/v4q> , accès gratuit sur <https://www.refletsdelaphysique.fr/>)

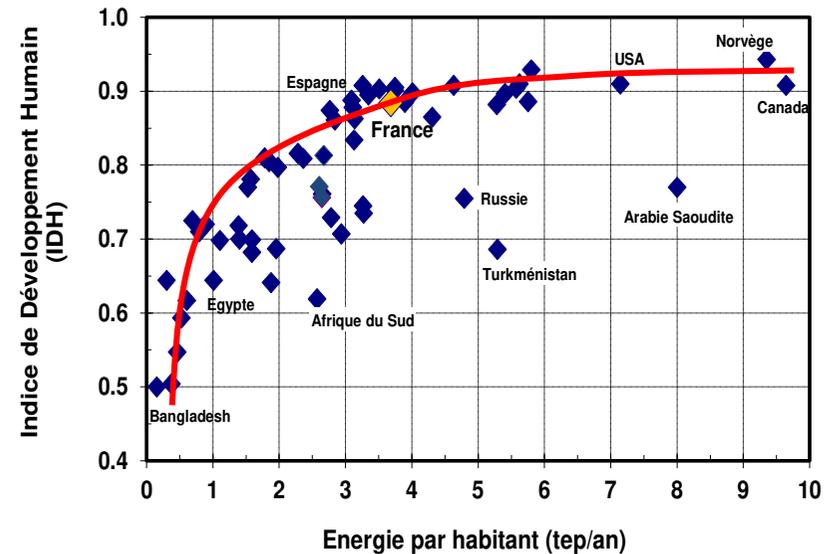
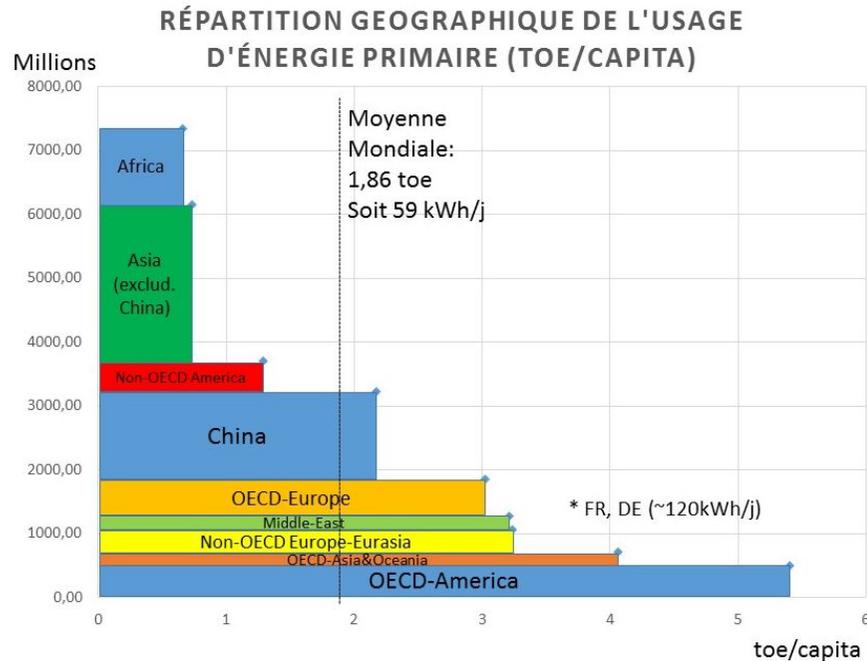
Pas de compétence professionnelle dans la fission, mais quelques activités d'enseignement introductif et général assurées dans le domaine. Un déroulement de carrière entièrement consacré à la physique des plasmas et aux applications à la fusion pourrait garantir un certain degré d'objectivité ...



Article disponible sur le site <https://www.refletsdelaphysique.fr/>

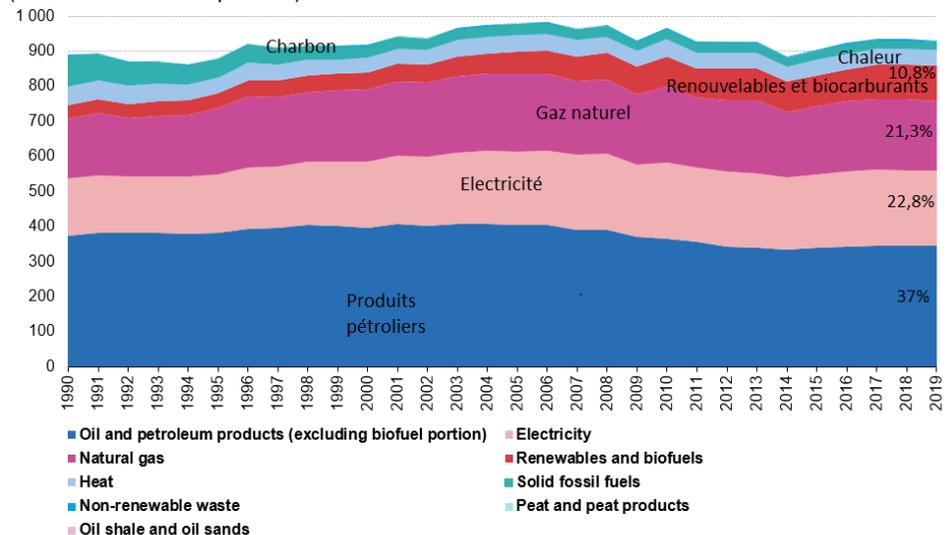
-
- **Les besoins en énergie de nos sociétés**
 - ✓ Etat des lieux. Quelles formes d'énergie ? Quelles ressources ? Quels usages ? Évolution historique ?
 - ✓ Pourquoi autant consommer ? Existe-il un seuil ?
 - **Les scénarios énergétiques, quels leviers ?**
 - ✓ Sobriété énergétique ? Efficacité énergétique ? Électrification des usages ? Quelles sources d'électricité bas carbone ?
 - **Électrification des usages et électricité bas carbone**
 - ✓ Renouvelables électrogènes. Quel potentiel ? Quelles contraintes liées au réseau électrique, *i.e.* la gestion de l'intermittence, le problème du stockage ? Le problème des ressources minérales ?
 - ✓ Électricité nucléaire. Durabilité ?
 - **Quid de la défossilisation de la chaleur ?**
 - ✓ Biomasse
 - ✓ Captage et stockage du CO₂ ?
 - ✓ ...

Les besoins en énergie de nos sociétés 6/14



- Énergie primaire vs. Énergie finale
- Unités: tep (toe), kWh, ...
- Indice de développement humain
- Évolution de la consommation européenne

Final energy consumption by fuel, EU, 1990-2019
(million tonnes of oil equivalent)

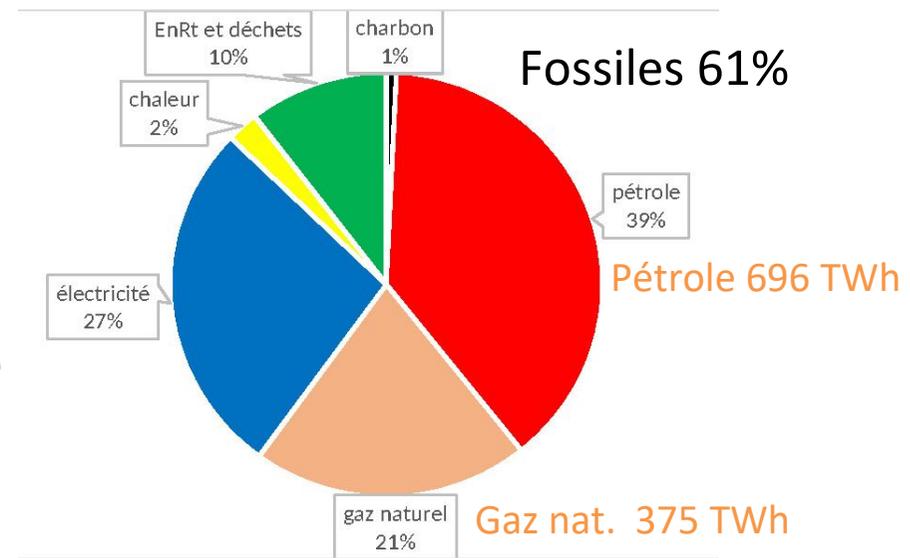


Source: Eurostat (online data code: nrg_bal_c)

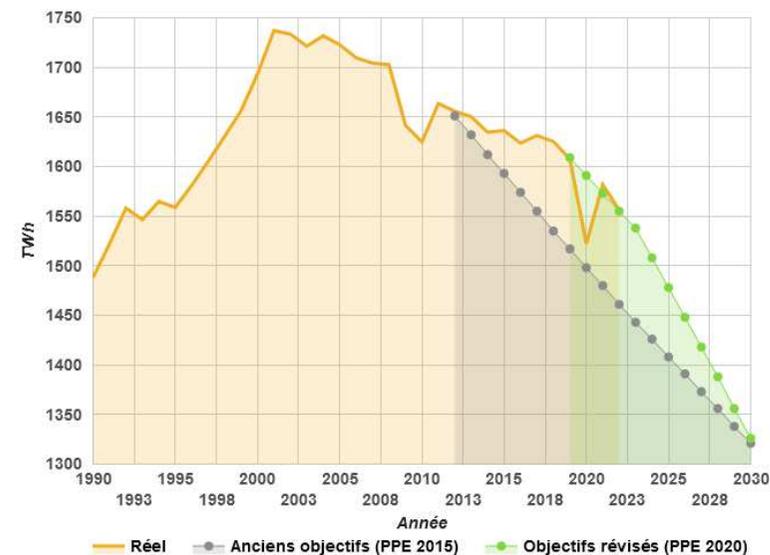
Les besoins en énergie de nos sociétés 7/14

- 43 % : Usages liés aux bâtiments : particuliers (résidentiel 27%) ou par des entreprises (tertiaire 16%) : chauffage, cuisson, réfrigération, éclairage, équipements.
 - 29 % : Mobilité et transport de marchandise
 - 17% : Industrie : les fours, les procédés, etc.
 - 3% : Agriculture (machines agricoles, chauffage des serres, etc.)
 - 9 % : Ressources comme matière première (ex. pétrole → plastique, engrais, ...)
- Chaleur : ~ 45% de l'énergie finale (50 % résid., 20% services, et 30% industrie) ;
Dont : > 60° Fossiles et > 20% biomasse

❓ Scénarios



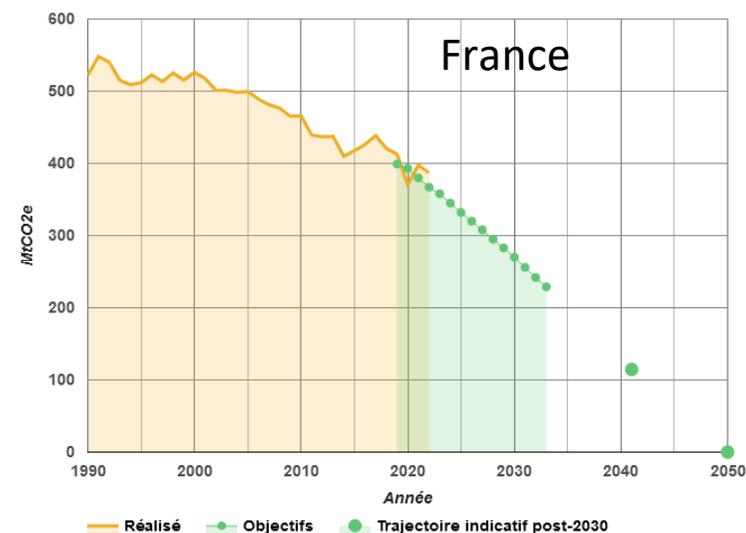
Energie finale en 2016: 153,4 Mtep 1784 TWh



Hypothèses et leviers

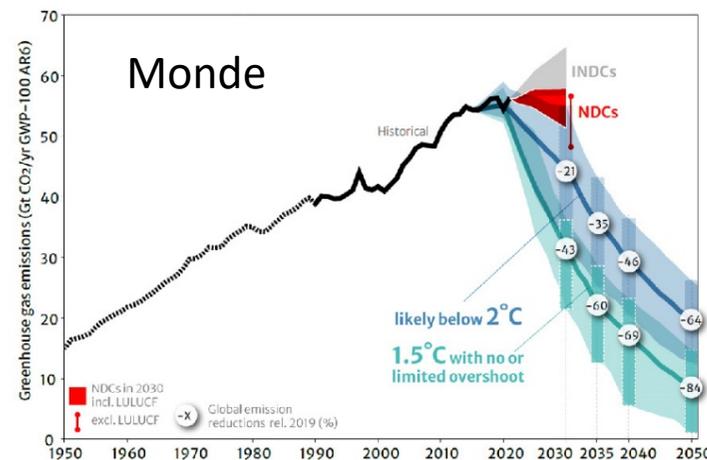
8/14

- **Objectif : neutralité carbone en 2050 (Stratégie nationale bas carbone, Green new Deal) ?**
 - ✓ Baisser les émissions nettes de 55% entre 1990 et 2030 ? Baisse drastique de la consommation de fossiles
- **Leviers: ?**
 - ✓ Électrification massive (électricité décarbonée) :
 - Renouvelables, temporalité, objectifs ?
 - Nucléaire, temporalité, objectifs ?
 - ✓ Baisse de la consommation finale d'énergie :
 - Efficacité énergétique, quelles limites ?
 - Sobriété : part de l'individuel ? Du collectif ?
 - ✓ *Quid* de la défossilisation de la chaleur ?



Évolution des émissions de GES et scénarios

Figure 1
Historical emissions from 1950, projected emissions in 2030 based on nationally determined contributions, and emission reductions required by the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change



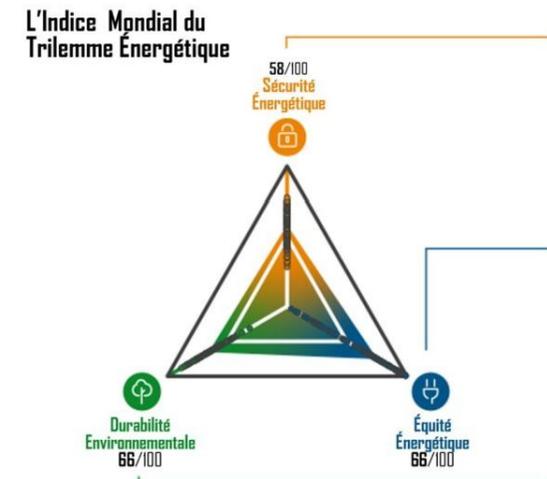
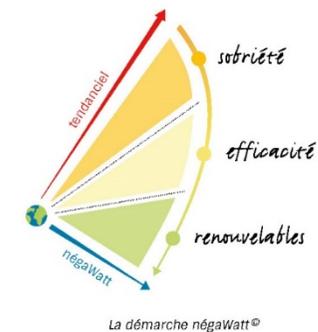
Le trilemme du conseil mondial de l'énergie 9/14

Le « trio gagnant » *Sobriété, Efficacité, EnR* promu par négaWatt peut-il réellement garantir la satisfaction des trois conditions du trilemme du Conseil Mondial de l'énergie ?

<https://www.worldenergy.org>

(Voir la discussion en français sur www.globalshift.ca, bulletin du 14 novembre 2021)

1. Sécurité = capacité à répondre à la demande et aux risques de rupture d'approvisionnement ;
2. Équité d'accès aux ressources énergétiques, à un coût accessible à tous ;
3. Durabilité = impact environnemental minimum

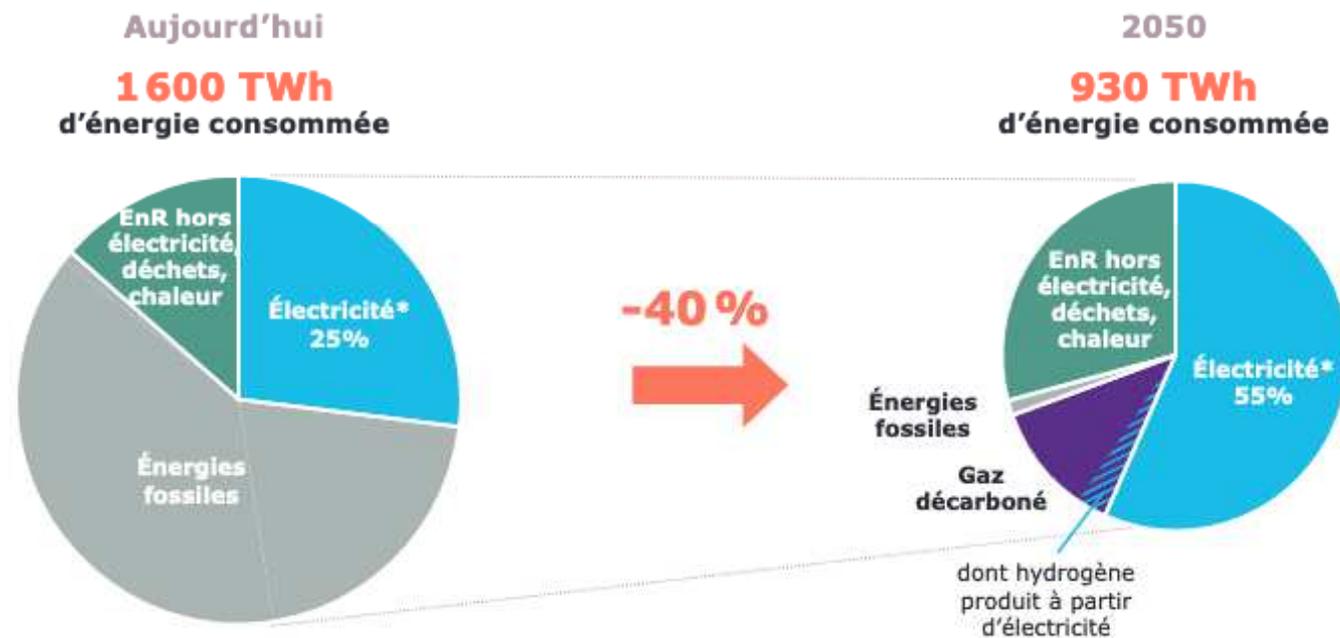


→ est-il possible à la fois de satisfaire la contrainte climatique, qui requiert de s'affranchir des combustibles fossiles, et de se passer de l'énergie nucléaire, comme source pilotable de production d'énergie ?

Evolution de la consommation

10/14

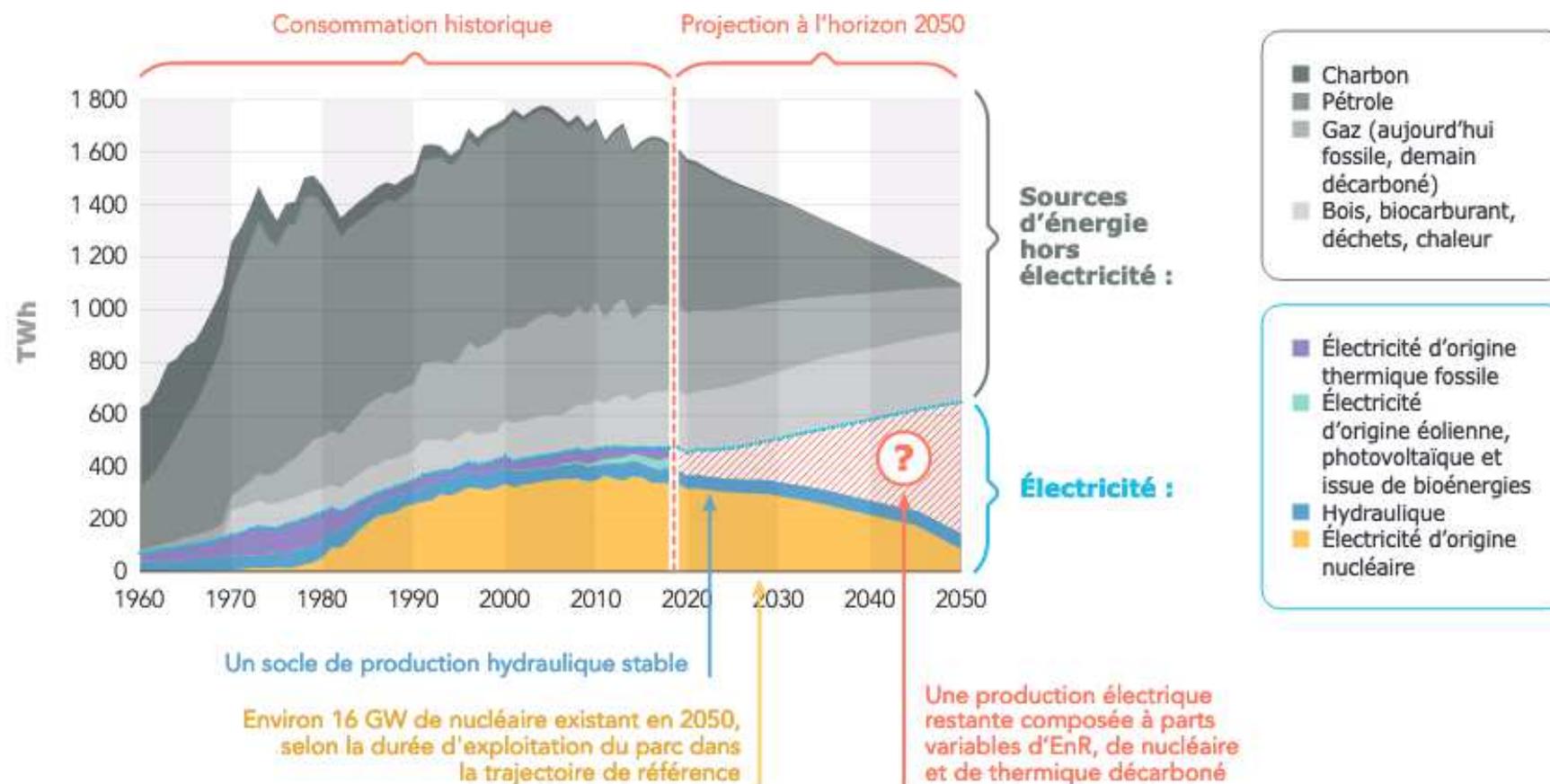
En raison des alertes climatiques, la France a affiché un objectif de neutralité Carbone à l'échéance 2050. C'est une contrainte des scénarii étudiés par RTE



Diminution de la consommation d'énergie (mais on fait plus avec un kWh d'électricité qu'avec un kWh d'essence)

Sortie rapide des fossiles

11/14



On se passe du pétrole

On substitue du gaz fossile par du gaz “décarbonné”

Le parc nucléaire actuel ferme progressivement

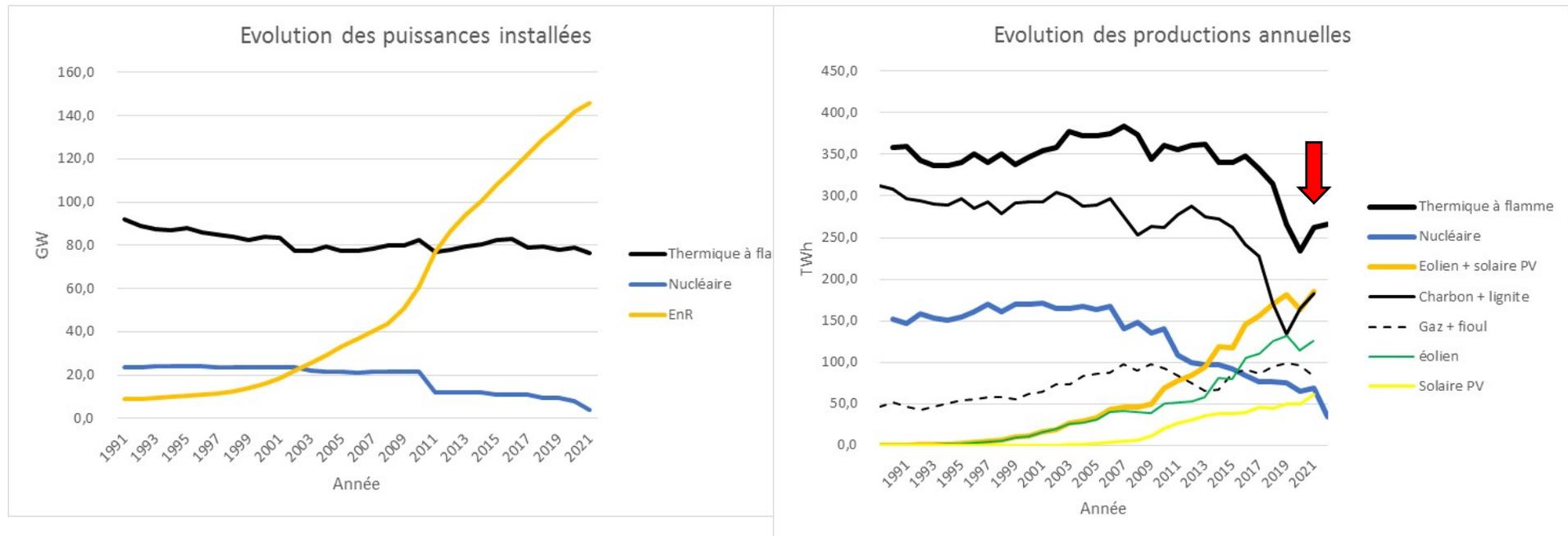
Que fait on pour compenser ???

Les EnR électriques pour défossiliser ? 12/14

- Consommation actuelle d'énergie en Europe: E_f 13 500 TWh, (dont électricité 3330 TWh) ; avec une densité de population de 1,14 hab/ha correspond à **~ 40 MWh/ha/an**.
 - Actualités :
 - 'énorme' projet éolien UE en mer du Nord ☒ 150 GW, 15 à 20000 turbines, soit de quoi produire **~ 550 TWh** d'électricité ☒ **10 Mt H₂ (350 TWh PCI)**, soit la consommation d'hydrogène actuelle de l'UE (industrie chimique, engrais, etc.) à comparer à :

Consommation UE de fossiles = 15 000 TWh ! (dont importations russes ~ 3500 TWh !) !!!
 - La France accélère sur les renouvelables ...mais potentiel **~ 350 TWh**
Éolien terrestre (37 GW ☒ 75 TWh) + éolien en mer (40 GW ☒ 140 TWh)
Solaire PV (125 GWc ☒ 140 TWh)
 - ☒ Question : **quid** de l'objectif **100% renouvelables en Europe avec un potentiel EnR électrogène (non pilotable) de 5-6 MWh/ha/an ?**
 - Sans oublier les questions clefs : - **Demande en ressources minérales ?**
- **Équilibre du Réseau ? Stockage ?**

Évolution des puissances installées ... et des productions depuis 1990



Forte croissance des EnR (capacité x10), nucléaire \rightarrow 0, mais capacité thermique à flamme (piloteable) invariable \sim 90 GW !

\rightarrow Équilibre production – demande nécessaire à tout instant \rightarrow back-up piloteable indispensable (thermique à flamme ou nucléaire \rightarrow Double système

G. Bonhomme, Annales des Mines (2023), <https://www.anales.org/ri/2023/resumes/aout/19-ri-resum-FR-AN-aout-2023.html#19FR>

☐ Il faut utiliser des critères objectifs !

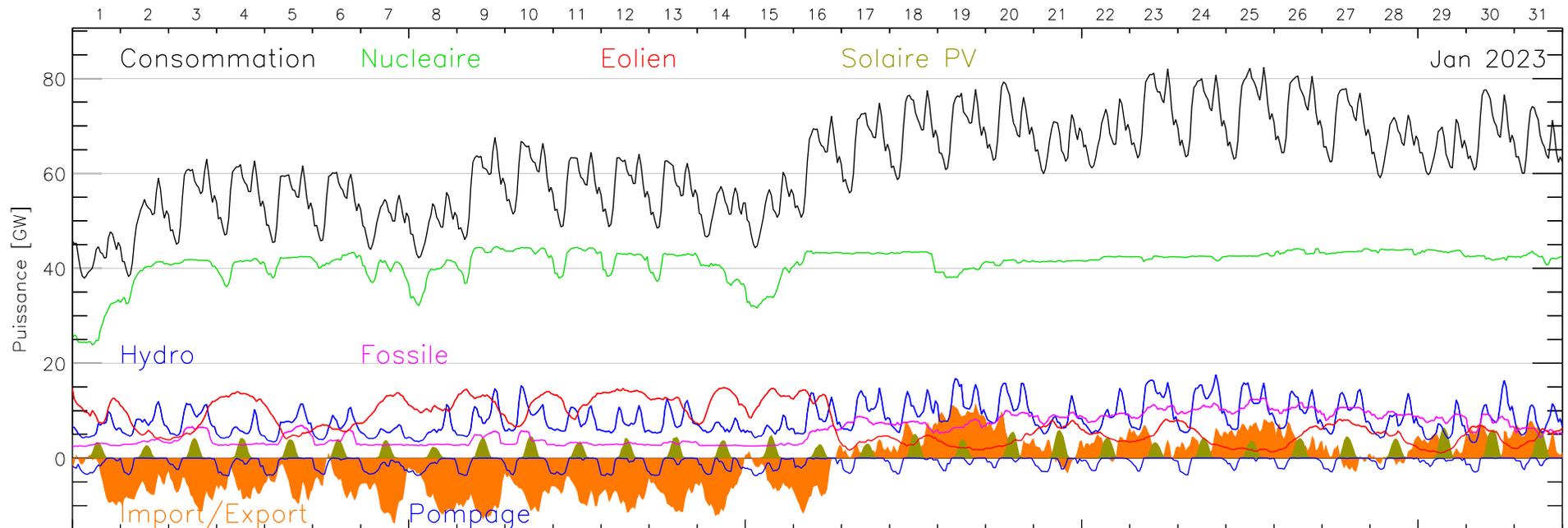
Prendre en compte :

- (i) La quantité de CO₂ émise par MWh produit ;
- (ii) Les surfaces mobilisées par MWh produit et le réel potentiel accessible ;
- (iii) Le volume de déchets ultimes produits par MWh ;
- (iv) Le coût sanitaire par MWh ;
- (v) Les quantités de ressources minérales immobilisées par MW installé, et consommées par MWh ;
- (vi) Le taux de retour en énergie MWh par MWh ☐ **EROI**

... et attention aux coûts cachés de l'électricité !

Intermittence des ENR (1/2)

15/14



Janvier 2023. Le nucléaire est en souffrance (problèmes de corrosion) mais assure 2/3 du besoin

Températures douces en début de mois; consommation modérée => exports

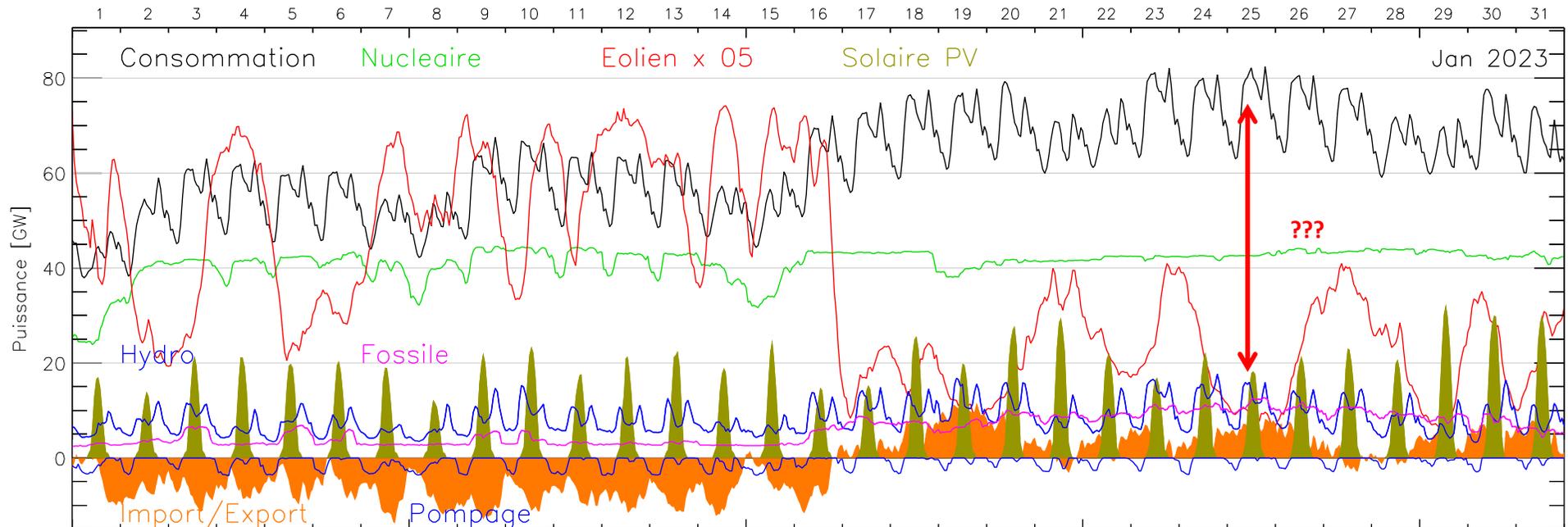
Températures +fraiches en fin de mois; consommation + élevée => Imports

Compléments des besoins avec Hydro, éolien, solaire, et surtout du fossile

Peut on remplacer les fossiles (et imports) par les ENR ?

Intermittence des ENR (2/2)

16/14

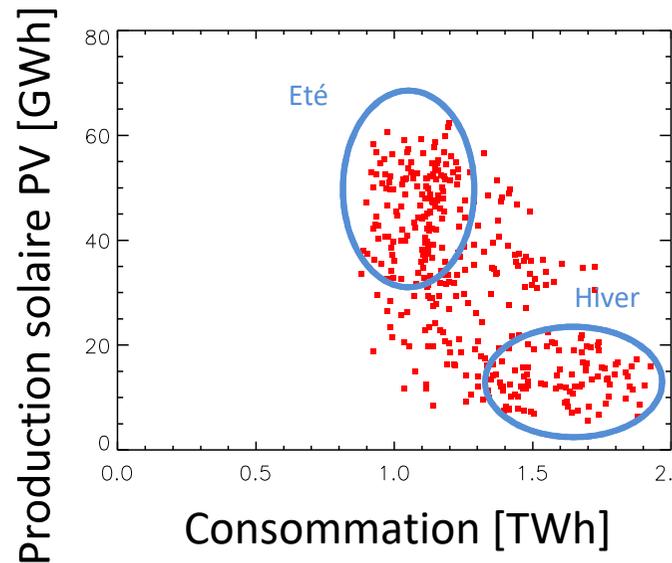


On suppose x5 sur éolien et solaire PV (donc 100 GW et 70 GW)

Cycle diurne du solaire

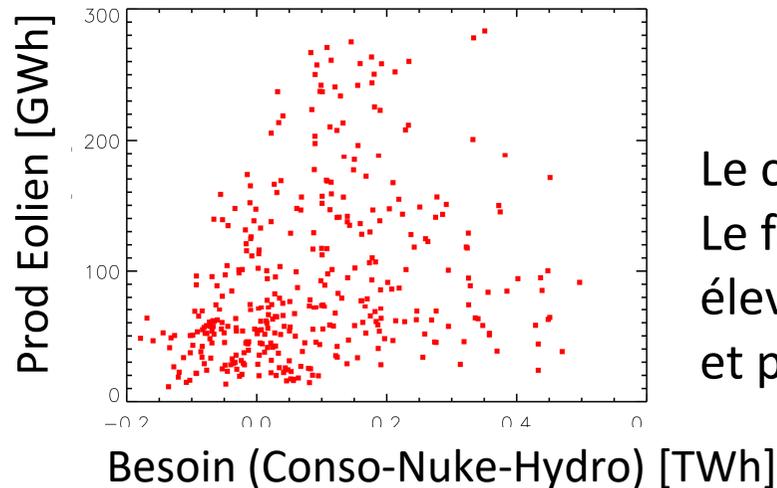
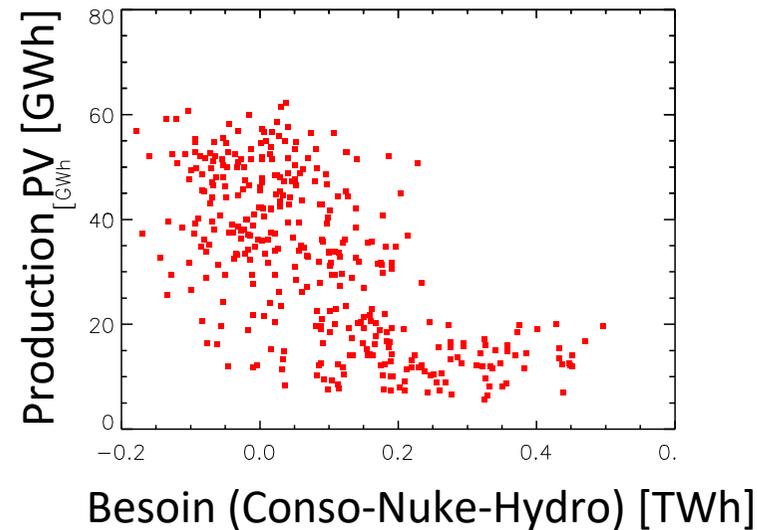
Eolien permet de faire face à la consommation sur la première quinzaine du mois

Moins de vent en fin de période. Production ENR reste faible, insuffisante pour faire face au besoin.



Données à l'échelle journalière
La production solaire est élevée en été lorsque la consommation est faible
Elle est faible en hiver lorsque la consommation est importante

Du coup, la production est faible lorsque les besoins sont importants, et importante lorsque les besoins sont nuls



Le côté saisonnier est plus favorable pour l'éolien :
Le facteur de charge moyen de l'éolien est plus élevé en hiver lorsque la consommation est forte, et plus faible en été lorsque il est faible

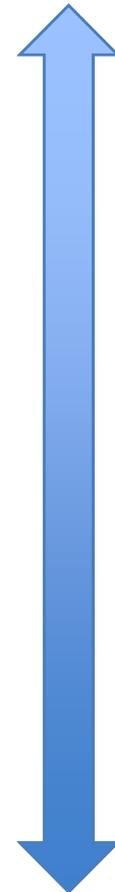
Les 6 scénarii pour le mix électrique

18/14

6 scénarii sont étudiés (avec des variantes pour chacun)

- M0** : Sortie complète du nucléaire en 2050. Gros développement des renouvelables (Solaire PV et éolien)
- M1** : Pas de nouveau nucléaire mais prolongation d'une partie du parc actuel. Très gros développement du solaire; Gros développement de l'éolien
- M23** : Pas de nouveau nucléaire mais prolongation d'une partie du parc actuel. Gros développement du solaire et de l'éolien avec une recherche d'optimum économique
- N1** : Développement d'un parc nucléaire (8 EPR en 2050) en complément d'une prolongation d'une partie du parc actuel. Gros développement des ENR
- N2** : Développement d'un parc nucléaire (14 EPR en 2050) en complément d'une prolongation d'une partie du parc actuel. Pus faible développement des ENR
- N03** : Développement volontariste du nucléaire (14 EPR + SMR) avec prolongation d'une part importante du parc actuel. Equilibre entre production des ENR et du nucléaire (le fameux 50%)

Plus de
renouvelable



Plus de
nucléaire

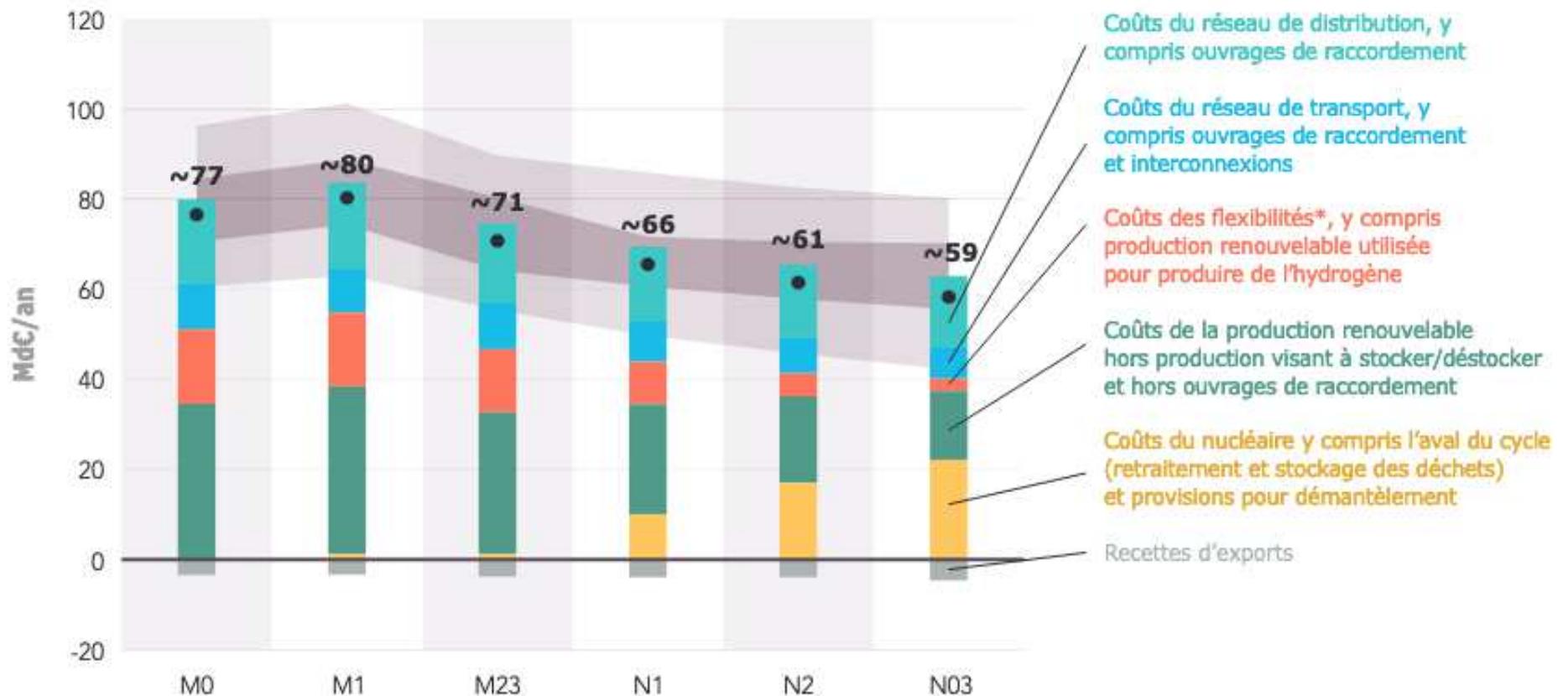
Combien ça coute ?

19/14

Les scénarii avec + de renouvelable sont plus chers que ceux qui développent du nucléaire

Même si la production est moins chère, le cout de l'intermittence (transport et stockage) impacte fortement le cout total

Coûts complets annualisés des scénarios à l'horizon 2060



Sans recours à des importation massives, le nucléaire (durable) est incontournable

- Le nucléaire n'est pas le problème, (ni un mal transitoire), mais la **seule solution d'avenir** pour assurer défossilisation, souveraineté énergétique, maintien de nos industries, voire ... **réindustrialisation**
- RTE vient de reconnaître l'**insuffisance du "trio gagnant"**

Sobriété – Efficacité – EnR et le change en :

Sobriété – Efficacité – EnR + Nucléaire

☐ plus d'électricité et plus de nucléaire ☐ **nucléaire en base (électricité) + flexibilité pilotable (électricité + chaleur par cogénération** ☐ **EPR + SMR** et **EnRi** là où utile et compétitif sans oublier les **EnRs thermiques !**

L'énergie nucléaire polarise de façon caricaturale les opinions.

Mais **si le nucléaire est vraiment incontournable** :

- Que peut-on dire de scientifiquement objectif sur les **risques, et problèmes posés (sûreté, durabilité: ressources en combustibles, gestion des déchets)** ?
- Quelles **pistes pour un nucléaire durable** ?
- Avec le regain d'intérêt actuel pour le nucléaire, apparaissent de nouveaux concepts de réacteurs : après les REP, les EPR, puis maintenant les SMR. De quoi s'agit-il ?
REP = réacteurs à eau pressurisée ; EPR = European Pressurized Reactor
SMR = Small Modular Reactor
- Qu'apporterait le développement de **SMR** ? De **réacteurs dits de quatrième génération** ? **À neutrons rapides** ?

Le nucléaire actuel est-il soutenable ?

22/14

- Combustible (ressource primaire) = U 235, 0,7% de U naturel, car seul capable d'entretenir une réaction en chaîne ☐ noyau fissile
- Réserves limitées ~ 100 ans pour le parc mondial (444 réacteurs pour 4% de la consommation !)
- Les réacteurs actuels fissionnent U 235 avec des neutrons lents (thermiques) ☐ probabilité de fission 200 fois celle avec neutrons rapides issus de la fission, mais
 - ✓ Consomment moins de 1% du potentiel énergétique de U naturel ;
 - ✓ favorise les phénomènes de captures neutroniques ☐ transuraniens ☐ déchets HA VL
- Fermeture du cycle impossible ; le MOX et le multi-recyclage n'apportent pas de solutions, encore plus d'actinides mineurs sont générés (déchets HAVL)

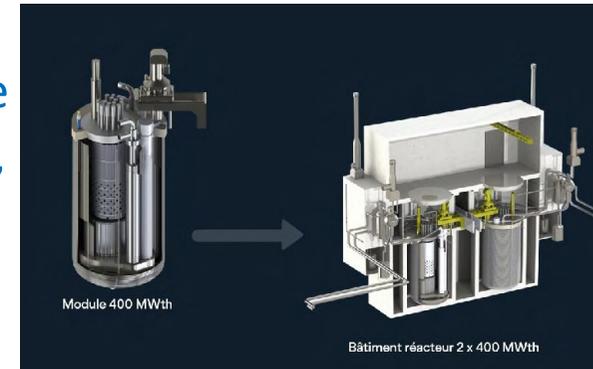
- Réaction en chaîne : - possible car chaque fission de noyau fissile libère deux à trois neutrons rapides ... mais ensuite ?
- Dans les **RNL** : ralentis (modérateur), puis provoquent fission ou perte ou captures, dont certaines avec U 238 (fertile) génèrent du Pu 239 (fissile), mais pas autant que dans les ...
- **RNR**, où le démarrage de la réaction en chaîne impose une charge initiale très enrichie en matière fissile et qui peuvent devenir **surgénérateurs** à condition d'utiliser un cœur chargé en **Pu 239** fissile entouré de matière fertile (U 238, ex. Unat appauvri) ☐ possibilité de **valoriser tout l'uranium naturel** et les actinides mineurs ☐ **réduction drastique de la radiotoxicité et de la durée de vie des déchets**

☐ **nucléaire durable, au sens de *sustainable***

Les réacteurs à neutrons rapides

24/14

- Deux grandes filières : combustible solide vs. combustibles liquides (sels fondus)
- ✓ Filière caloporteur Na : ... toute une histoire française (Rapsodie, Phénix, Superphénix, Astrid) ... pleine d'avenir (espérons-le!)
Nombreux projets (cf. Hexana), proche maturité industrielle sauf surgénérateur, bien adapté large gamme de puissance, avec REP (qui produit la charge initiale en Pu du RNR).
Autres projets avec caloporteur Pb (Newcleo) ou He



- ✓ Filières à combustible liquide (... une autre histoire française, le MSFR)
Plus loin de la maturité industrielle, mais beaucoup d'atouts : sûreté, flexibilité, électrogène ou calogène, eau...
Combustible : Pu, Th-U233 (fluorures) vs. Pu, U238 (chlorures)
Projets dans le monde et en France (Naarea)
Mais il faudra plus que des start-ups !

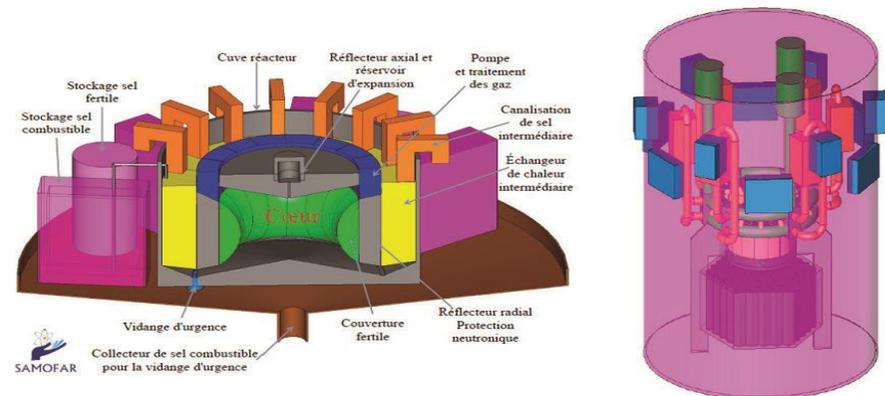


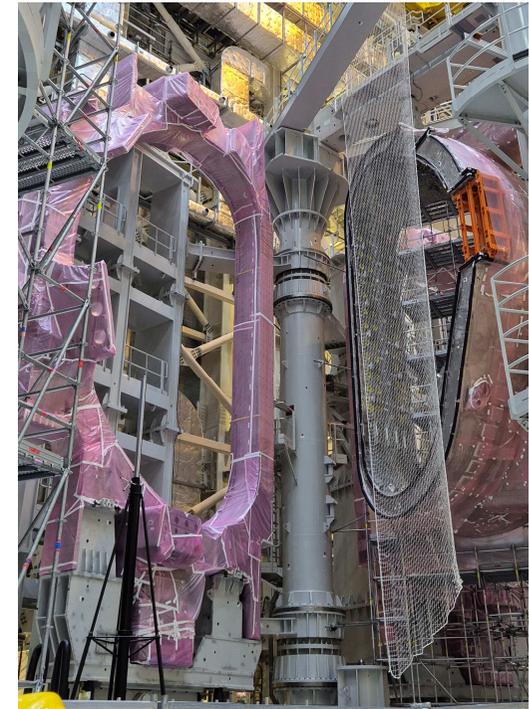
Fig. 6 a,b : À gauche, schéma du cœur, et à droite, enceinte de confinement contenant le cœur et le réservoir de vidange sous-critique dans lequel les sels s'écouleraient par gravité en cas d'incident (LPSC/CNRS).

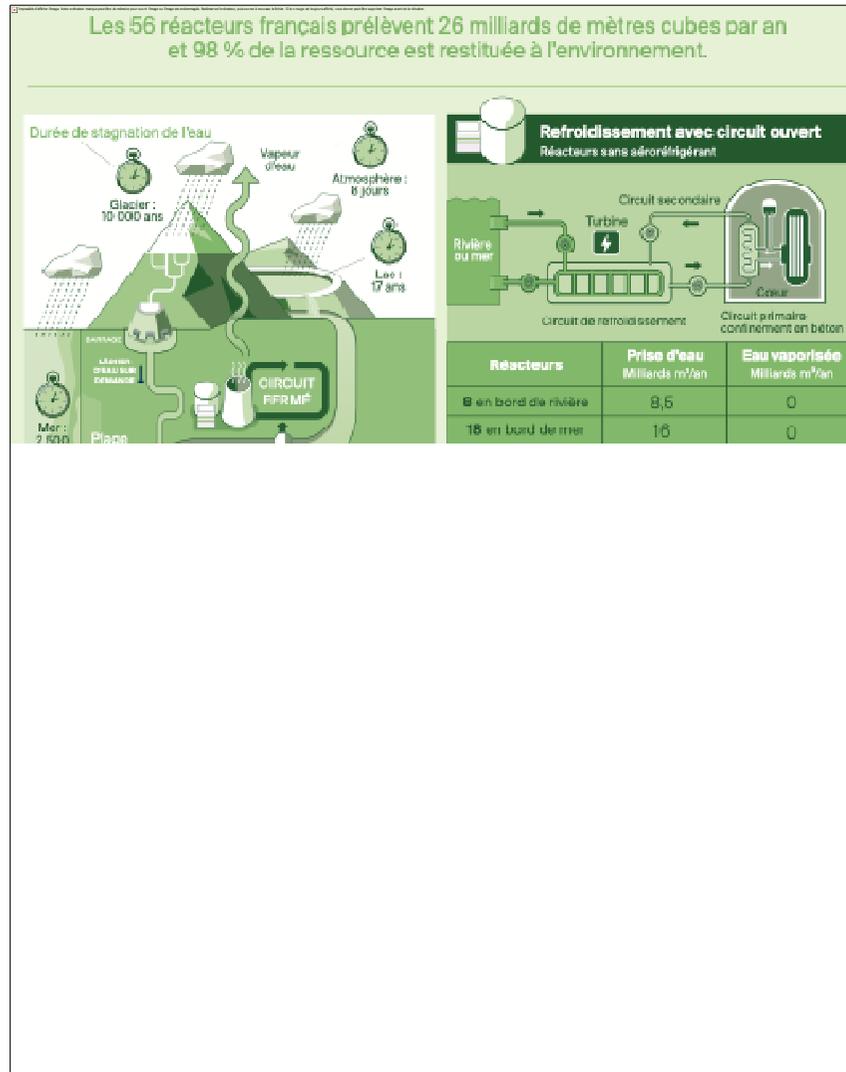
- Seul le déploiement massif de réacteurs de quatrième génération permettra de faire face à la demande en énergie, en garantissant
 - ✓ Sécurité d'approvisionnement (autonomie énergétique pour plusieurs milliers d'années)
 - ✓ Pilotabilité,
 - ✓ Impact minimum sur l'environnement (les déchets les plus dangereux sont brûlés)
- De gros efforts en R&D sont encore nécessaires pour porter à la maturité industrielle les **filières à neutrons rapides** pertinentes ☐
 - à combustible solide (type RNR-Na)
 - à combustible liquide : sels fondus
- **Nécessité absolue de démarrer ces filières avant épuisement des ressources (limitées) en uranium fissile 235 !**

Et la fusion ???

26/14

- Des progrès considérables !
- La machine ITER dont l'assemblage est en cours permettra d'étudier les conditions où le plasma est dominé par la puissance des réactions de fusion.
- ITER est indispensable pour démontrer la faisabilité d'un réacteur à fusion et mettre au point les technologies clefs.
- Les investissements privés dans les projets innovants des startups laissent espérer des avancées sur les technologies de rupture (aimants HTS, stellarators, etc...)
- "DEMO sera la dernière étape avant le réacteur commercial, qui avec 1 GWe permettra de produire 8 TWh d'électricité par an en consommant 100 kg de deutérium et 300 kg de lithium ☐ **250 kg d'hydrogène permettant de produire par électrolyse ... 160 000 tonnes d'hydrogène !**
- Lev Artsimovitch, grand-père du Tokamak déclarait en 1972 - "**Fusion will be there when society needs it**".





Les centrales nucléaires utilisent \approx la moitié de l'eau prélevée en France. Mais 98% est restituée (plus chaude) à l'environnement

Certaines centrales doivent limiter leur production en été pour les contraintes environnementales; ce n'est pas PAS question de sûreté. Consommation est faible en été, et ca ne pose donc pas de vrai problème d'approvisionnement

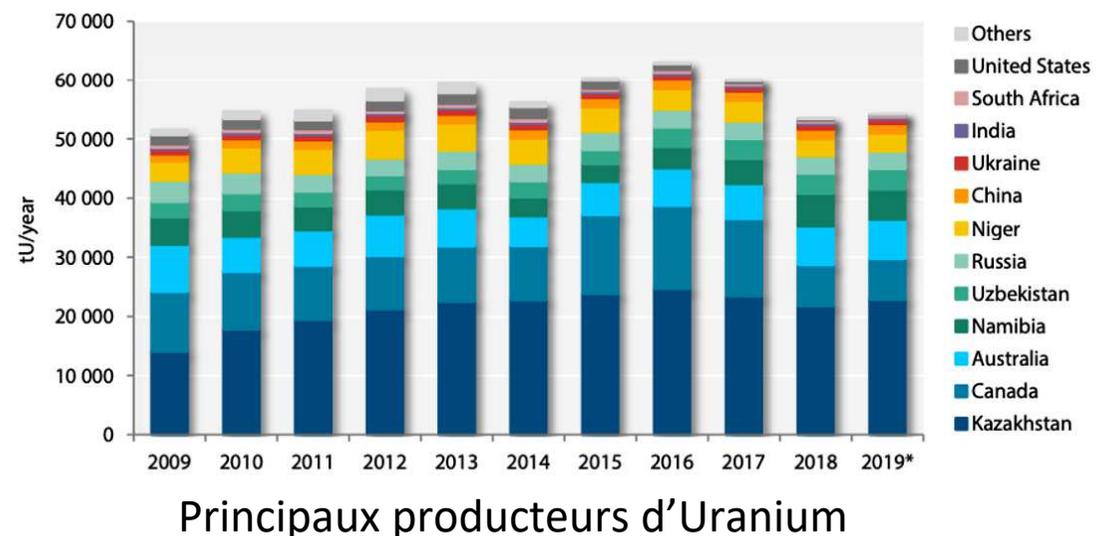
Plus grosse centrale nucléaire aux USA (Palo Verde) en plein désert. Utilise les eaux usées de Phoenix, Arizona



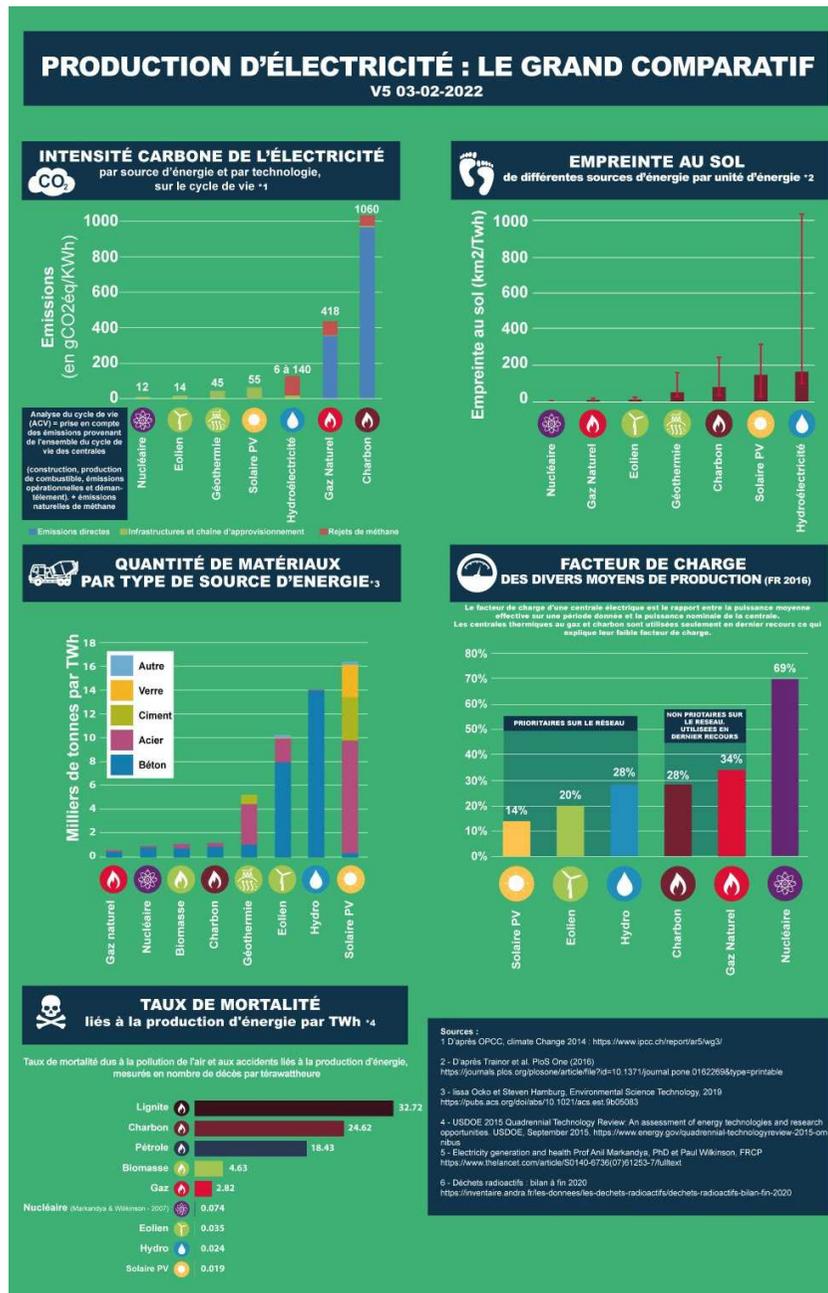
L'Uranium n'est pas produit en France 28/14

L'uranium utilisé en France est intégralement importé. Mais

- Ressources diversifiées
- L'Uranium se stocke facilement (plusieurs années de consommation, déjà minées, sur le sol français)
- Au moins 100 ans de réserve dans le monde
- Perspective de passer aux réacteurs à neutrons rapides (superphénix). Combustible en France pour plusieurs milliers d'années



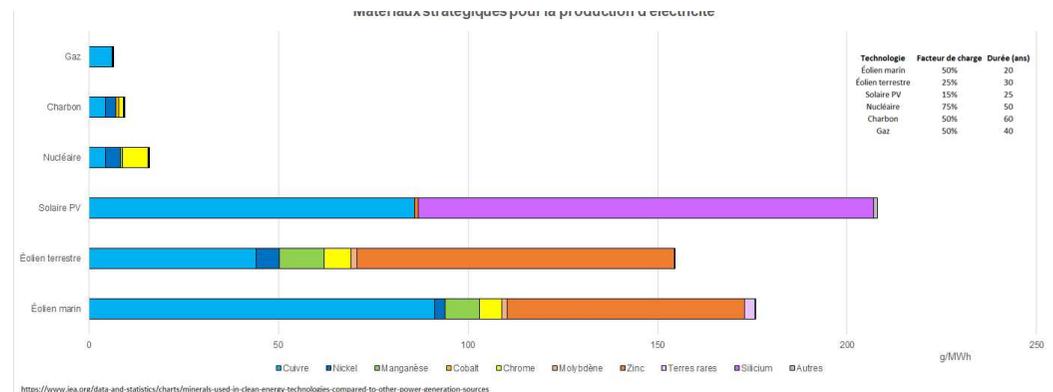
Comparer les dispositifs de production 29/14



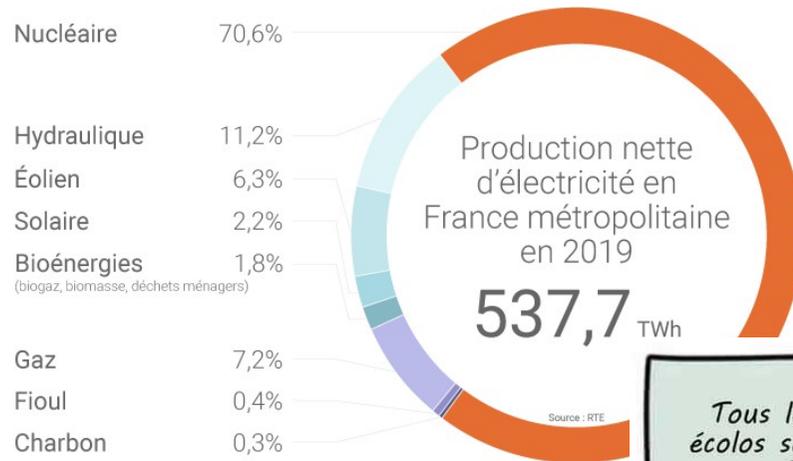
- Intensité carbone (en “cycle de vie”)
- Empreinte au sol
- Besoin en matériaux
- Facteur de charge
- Mortalité (pollution de l’air et accidents)

Sur tous ces critères, le nucléaire est préférable aux énergies renouvelables et, bien sur, aux fossiles

Matériaux pour permettre la production d'électricité

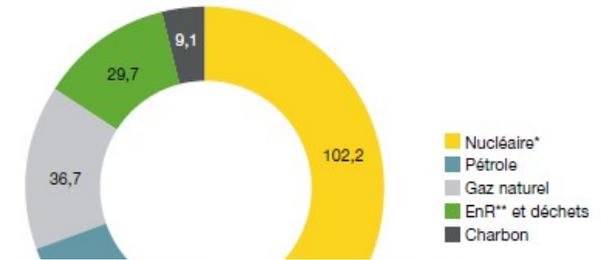


La France est un pays "tout nucléaire"

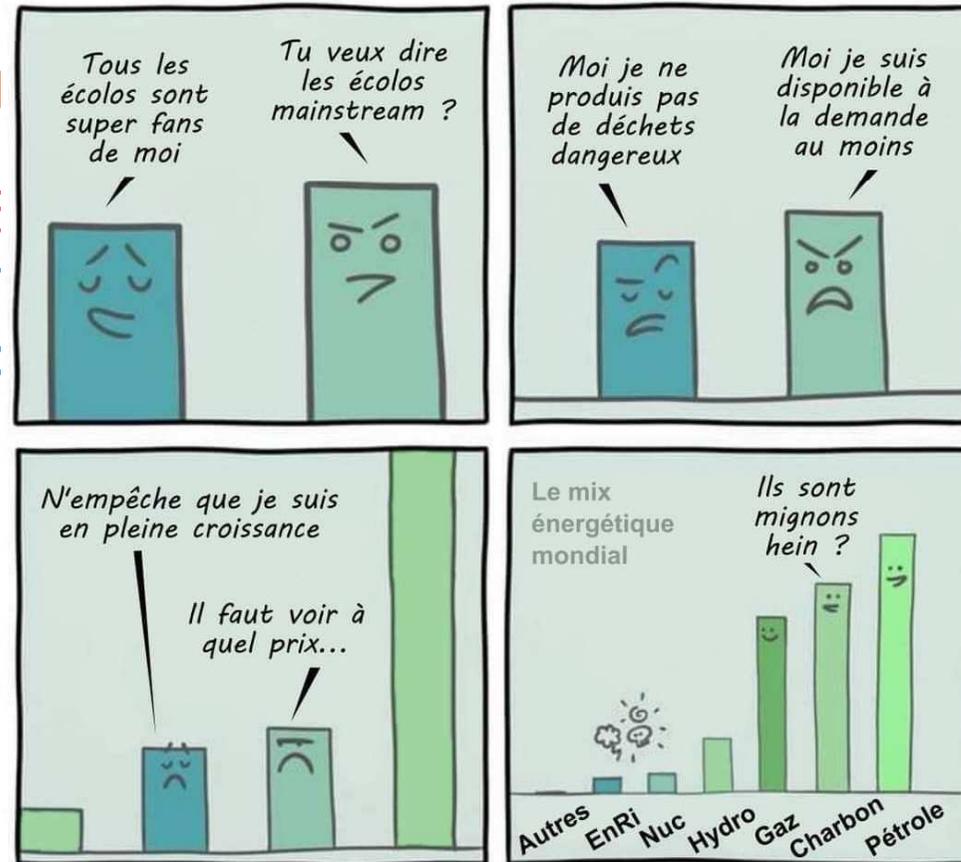


CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR TYPE D'ÉNERGIE EN FRANCE

TOTAL EN 2018 : 248,9 Mtep

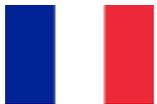


Electricité : ≈70%
Le nucléaire est largement r
Mais les énergies fossiles dc



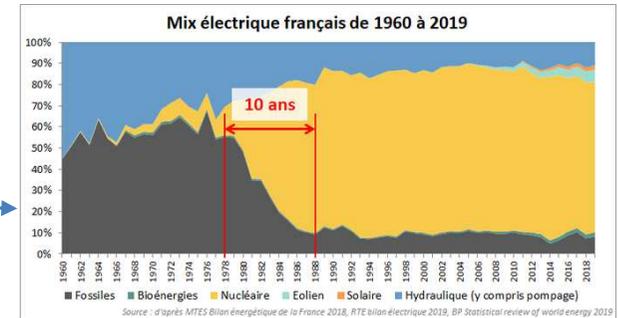
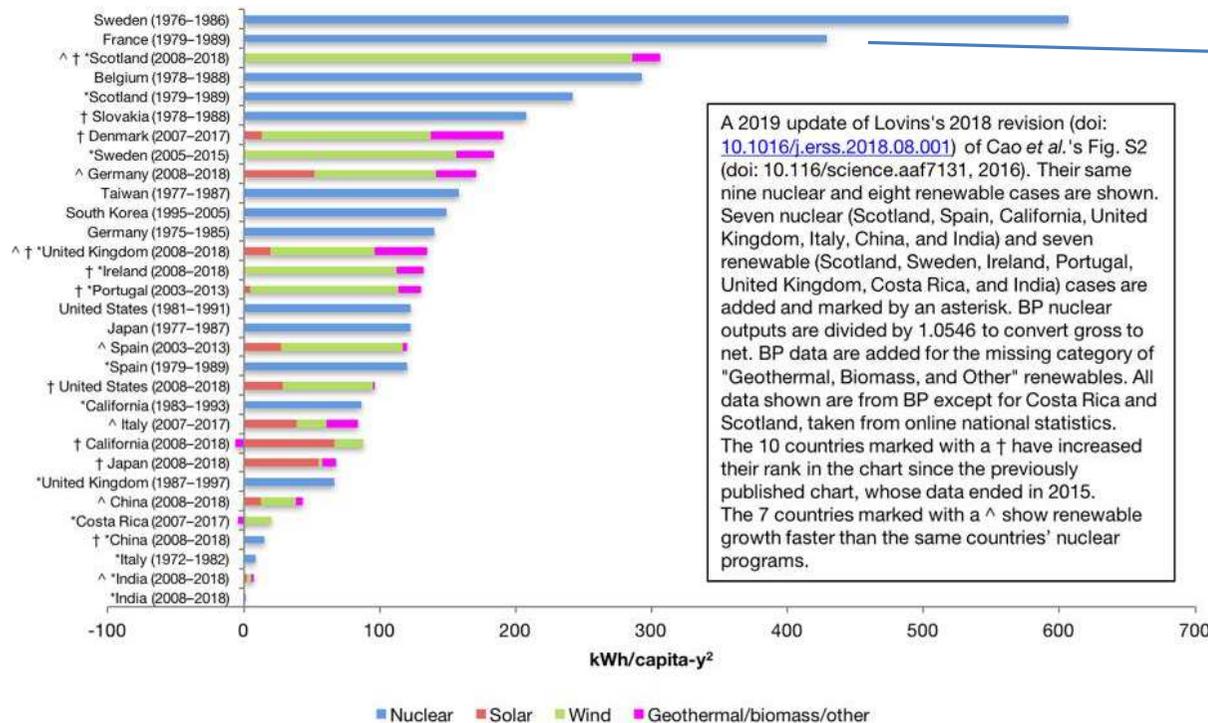
cité.

La France est une exception énergétique 31/14

- Pays avec le plus de réacteurs nucléaire
 - Etats-Unis 
- Pays qui produit le plus d'électricité nucléaire
 - Etats-Unis 
- Pays qui produit le plus d'électricité nucléaire par personne
 - Suède 
- Pays qui a le plus de nucléaire dans sa production électrique
 - France 

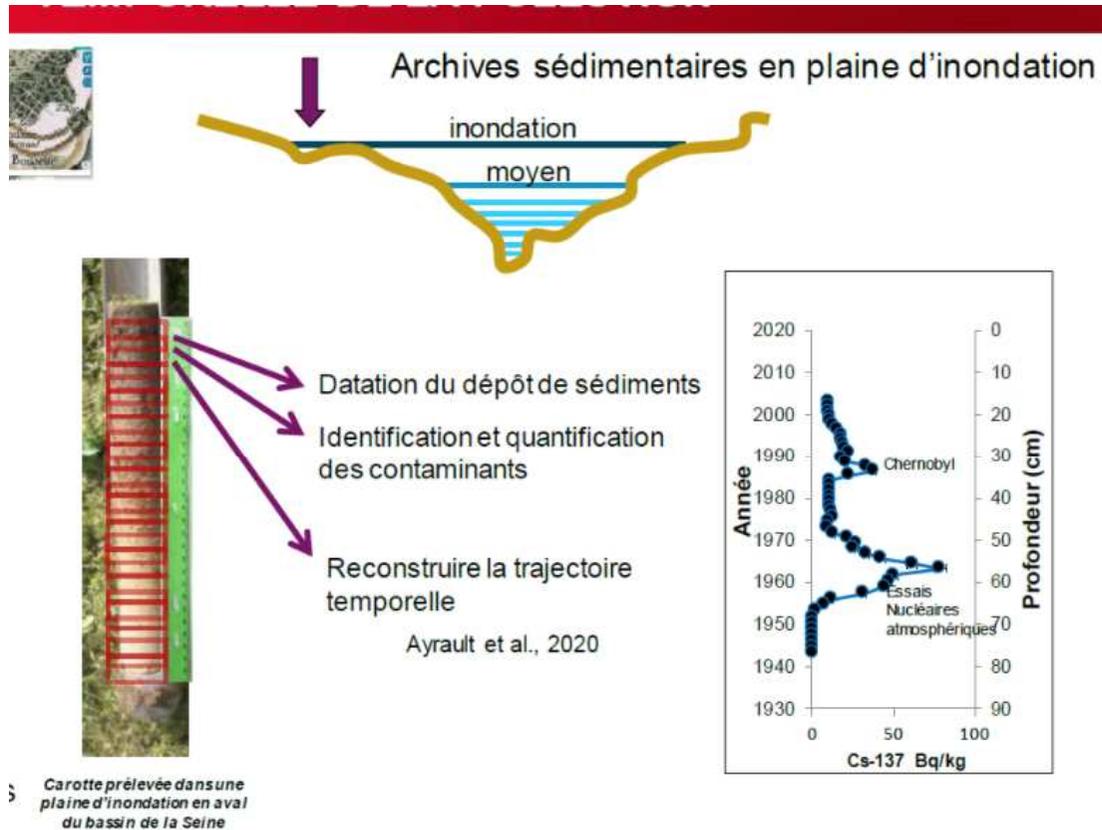
La France est certes la pays avec la plus forte part du nucléaire dans son mix électrique, mais d'autres pays sont très "nucléarisés"

Croissance de l'énergie produite (kWh/hab/an) sur la décennie la plus favorable



Nucléaire
Solaire
Eolien
Autres ENR

Une analyse historique montre que c'est bien le nucléaire qui a permis une croissance rapide d'une production électrique peu carbonée



L'analyse des sédiments en France montre que la contamination en provenance de Tchernobyl est beaucoup plus faible que l'impact des essais atmosphériques

Le gouvernement a nié le passage du nuage de Tchernobyl sur la France

34/14



2 mai 1986 : "l'augmentation de la radioactivité [est] enregistrée sur l'ensemble du territoire"

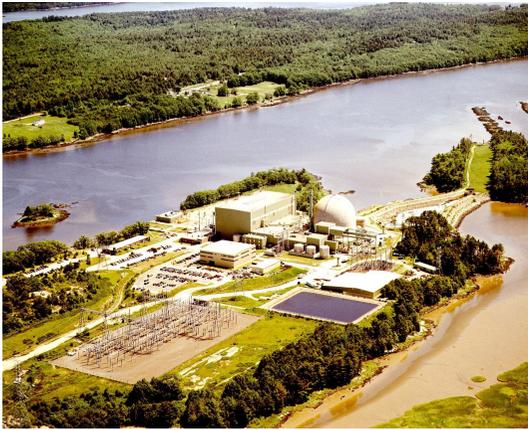


12 mai 1986 : "Les pouvoirs publics ont menti, le nuage [] a bien survolé une partie de l'hexagone"

Même si la communication a été mauvaise, voire quasi inexistante, au regard des standards d'aujourd'hui, le passage du nuage sur la France a bien été annoncé en temps quasi réel. L'impact sur la santé a été négligeable (similaire ou inférieure à radioactivité naturelle)

On ne sait pas démanteler les centrales...

35/14



Maine-Yankee Avant



Après

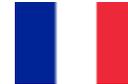
Ces centrales US similaires à celles du parc français ont été complètement démantelées. Le démantèlement de Chooz-A est bien avancé. Les premières centrales françaises posent plus de problème (gestion du graphite irradié)

Un « Tchernobyl » est possible en France

36/14



Tchernobyl (RBMK)



Réacteurs français (REP)

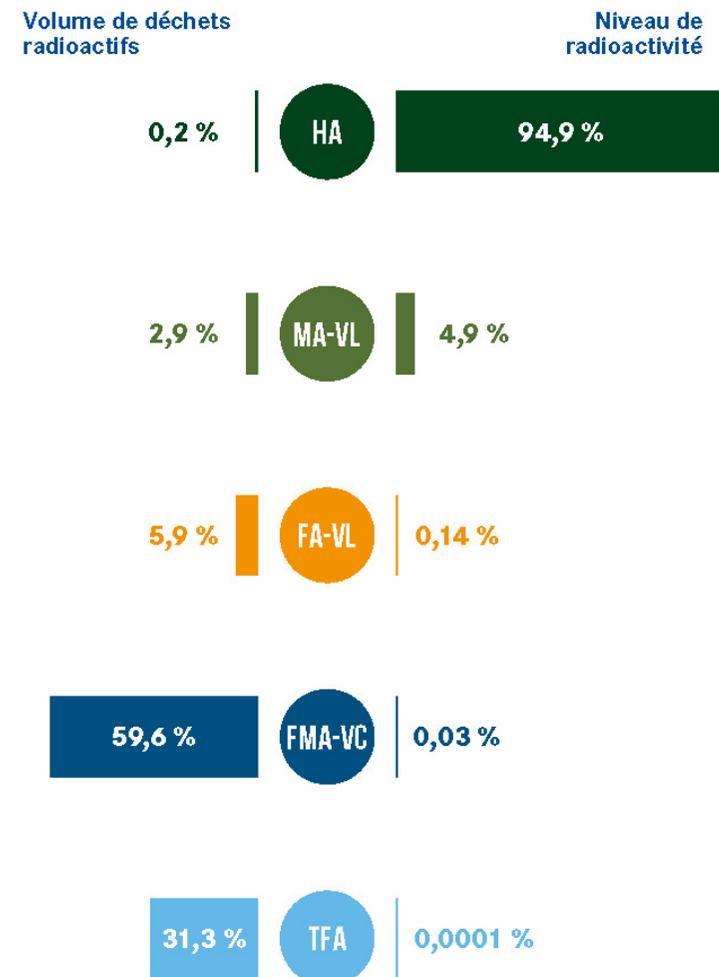
- Cœur graphite (inflammable) de plus de 1000 tonnes → **N'existe pas**
 - Instable à faible puissance → **Conception différente**
 - Pas d'enceinte de confinement → **Enceinte de confinement béton**
 - Pas de séparation de circuits cœur-turbine → **2 circuits distincts et étanches**
 - Temps de réaction trop long du système d'arrêt d'urgence → **2s pour les barres de contrôle**
 - Manque de préparation des opérateurs
 - Non respect des règles de conduite
 - Inhibition des systèmes de sureté
- Meilleure formation, y compris à la gestion des accidents**

Même si on ne peut pas nier la possibilité d'un accident, l'équivalent de Tchernobyl est virtuellement impossible. Le "raisonnablement possible" ressemblerait plus à l'accident de Three Miles Island : Aucun mort, aucune évacuation durable

L'ANDRA gère **1,7 millions de m³** ... mais répartis en :

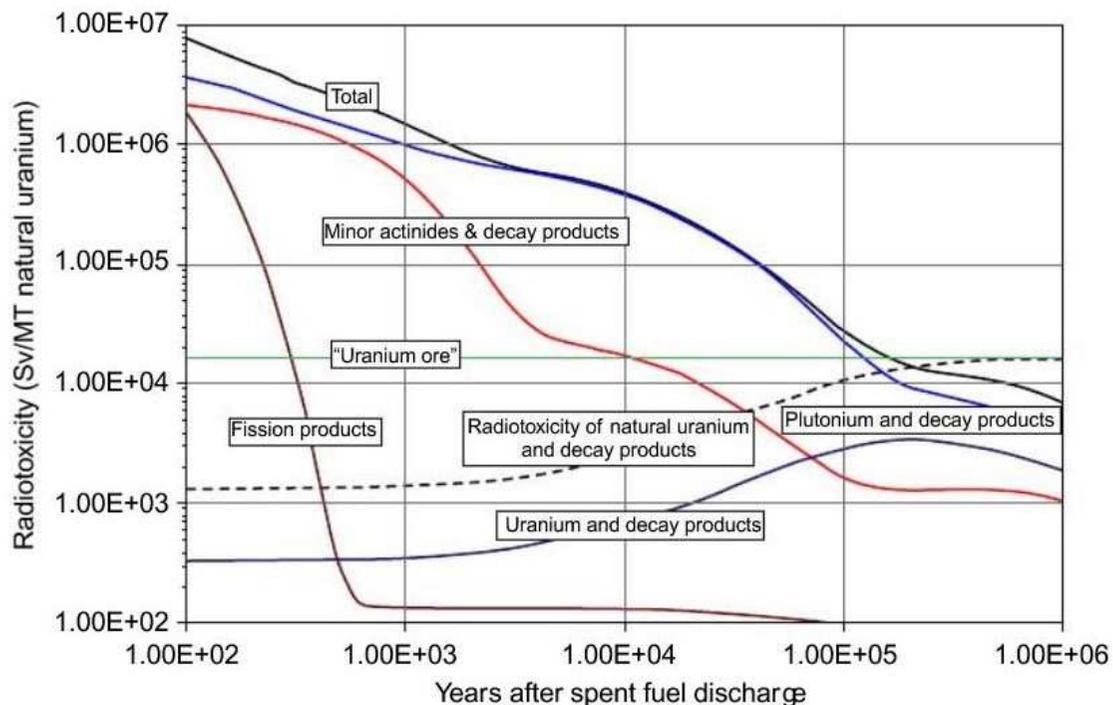
- ✓ **0,2% en volume et 94,9% de la radioactivité:** la **catégorie C**, de type HA-VL, ($> 10^9$ Bq/g), **4000 m³**, produits de fission et actinides mineurs ☐ **Cigeo**
- ✓ La **catégorie B**, de type MA-VL, (10^6 - 10^9 Bq/g, 3,4% de l'activité ☐ et ☐) : e.g. structures métalliques des barres de combustibles, **42 700 m³** ☐ **Cigeo**
- ✓ Les déchets de type FA-VL, ☐ et ☐) **93 700 m³**, correspond aux déchets d'exploitation
- ✓ La **catégorie A**, de type FMA-VC, (jusqu'à 10^6 Bq/g), **961 000 m³**
- ✓ Les déchets de type TFA-VTC (< 100 Bq/g), **570 000 m³**, pas de seuil libérateur (exception française).

La répartition des volumes et niveaux de radioactivité présentée ci-dessous est issue de l'édition 2018 de l'**Inventaire national** (sur la base des chiffres à fin 2016) :



Les « déchets » radioactifs produits par les centrales nucléaires se répartissent en quatre catégories selon leur activité et leur durée de vie :

- ✓ La **catégorie C**, de type HA-VL, (plusieurs 10^9 Bq/g, 97,5% de l'activité C et D), comprend:
 - (i) les produits de fission (70,2 t/an soit 1,1 g/an par hab.) ;
 - (ii) les actinides mineurs non fissionnés* (2,46 t/an soit 0,039 g/an par hab.) ;Total: 360t, 120m³/an conditionnés , cumulés **3880** m³ (soit environ le volume d'une piscine olympique).



*L'Uranium et le Plutonium, (soit 96% des « déchets » produits, et qui pourront être réutilisés, e.g. dans le combustible MOX), sont extraits dans le processus de retraitement avant vitrification. L'extraction du seul Plutonium permet un retour au niveau de radioactivité du minerai naturel d'uranium au bout de 10 000 ans (au lieu de 100 000 ans)



Combustible usé, trié
puis vitrifié



Hall d'entreposage
≈5 ans de déchets

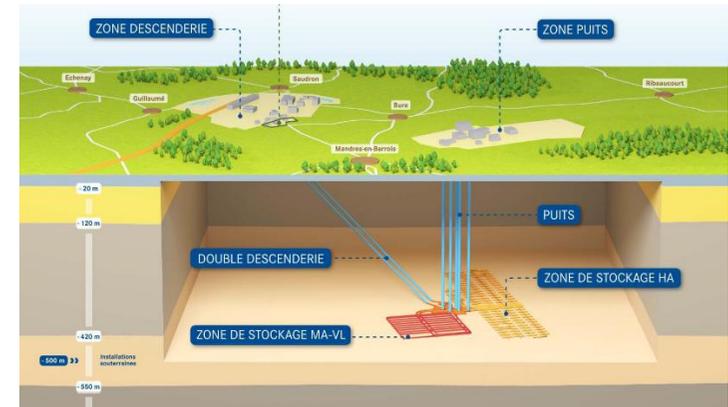
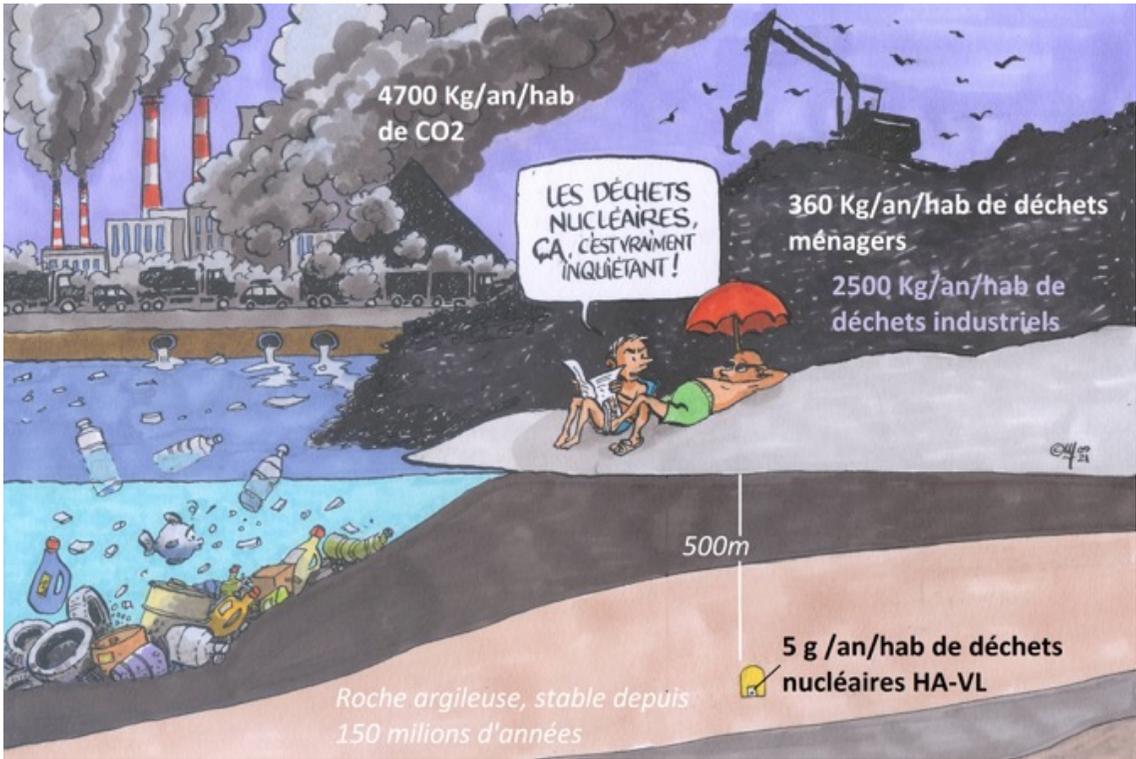


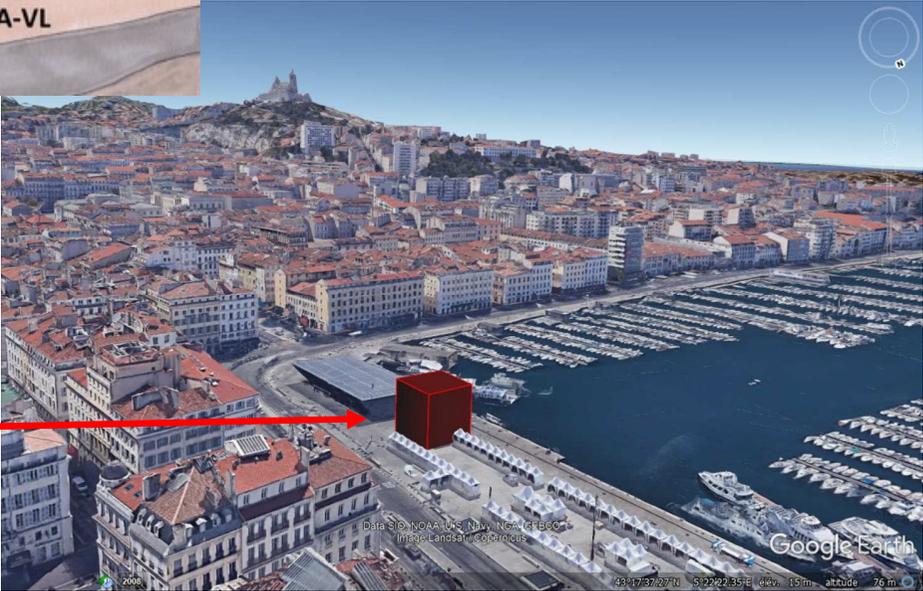
Schéma du projet CIGEO

Le projet CIGEO est une **bonne** solution de gestion des déchets dangereux.
Les générations futures n'auront pas à s'en préoccuper
Il est certain (études géologiques poussées) que l'impact sur la biosphère sera
négligeable (cf. **réacteurs naturels du site d'Oklo** au Gabon)

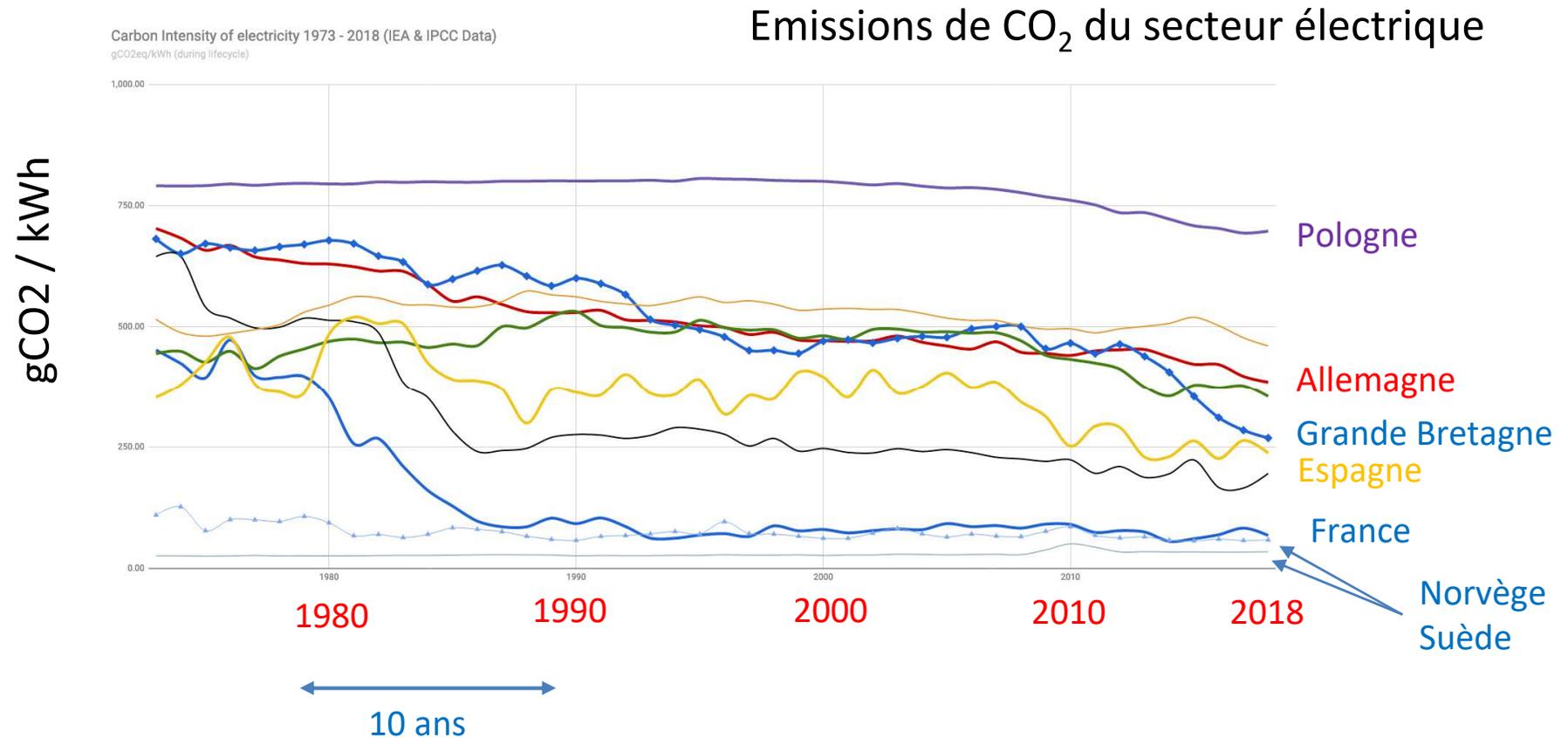
Les déchets...



Volume total des déchets de Haute Activité



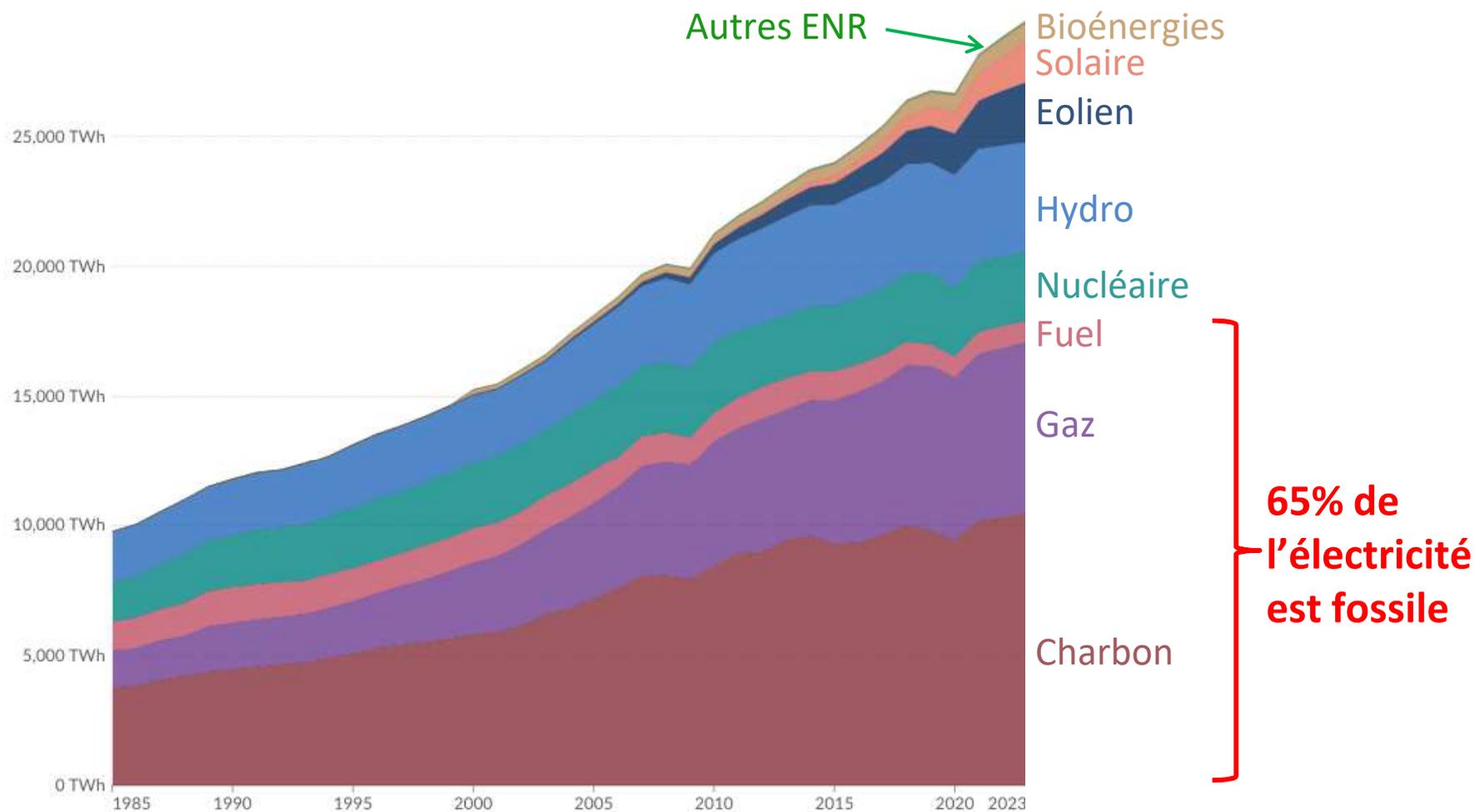
La France est en retard...



La France a déjà fait sa transition énergétique.

Manifestement, pour l'électricité, ce sont les autres pays (sauf Norvège et Suède) qui ont 40 ans de retard

Le nucléaire est négligeable dans le monde...42/14



Si le nucléaire est négligeable, c'est encore plus vrai de éolien ou solaire PV, même s'ils se développent (comme le nucléaire dans les années 70-80)
Le nucléaire n'est pas négligeable en France, et permet de modérer nos émissions

- Inventaire de l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA)
 - <https://inventaire.andra.fr/>
- Surveillance et contrôle de l'Autorité de Sureté Nucléaire (ASN)
 - <https://www.asn.fr/>
- Mesures de la radioactivité dans l'environnement
 - <https://www.mesure-radioactivite.fr/#/>
- Expertises et dossiers de l'Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire (IRSN)
 - <https://www.irsn.fr>
- Documents du Haut Comité pour la Transparence et l'Information sur la Sécurité Nucléaire (HCTISN)
 - <http://www.hctisn.fr/>



Le moindre incident fait l'objet d'une déclaration ASN dont les conclusions sont publiques. Quelle autre industrie fait l'objet d'une telle transparence ?

La radioactivité, c'est dangereux

44/14

Dans votre corps ≈ 7000 désintégrations par seconde (7000 Becquerels : Bq)

Lait : ≈ 100 Bq par litre

Radon dans une maison en granit \approx quelques 100 Bq / m³

Radioactivité naturelle ≈ 2 milli-Sieverts (mSv) par an mais très variable

Jusqu'à 50 mSv dans certaines régions

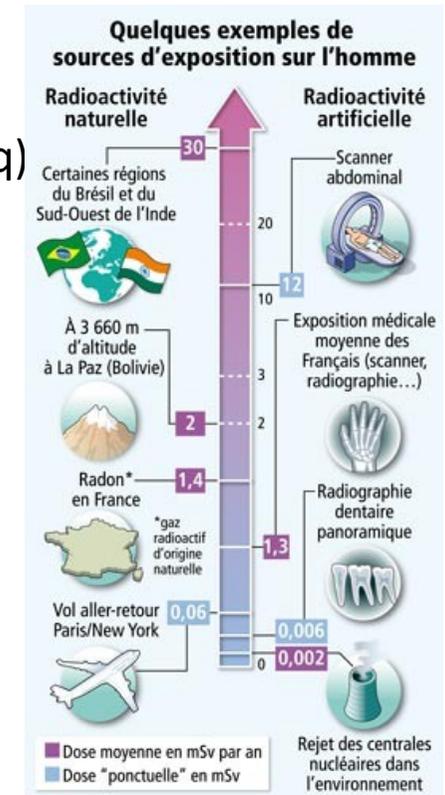
Examens médicaux ≈ 1 mSv / an

Limites d'exposition du public

Tchernobyl en France < 1 mSv

Rejets des centrales nucléaires : < 0.01 mSv / an

La radioactivité est dangereuse, voire mortelle, à forte exposition. Mais les doses reçues sont généralement très faibles. Nombreux anti-nucléaires jouent sur la méconnaissance des ordres de grandeur pour faire peur

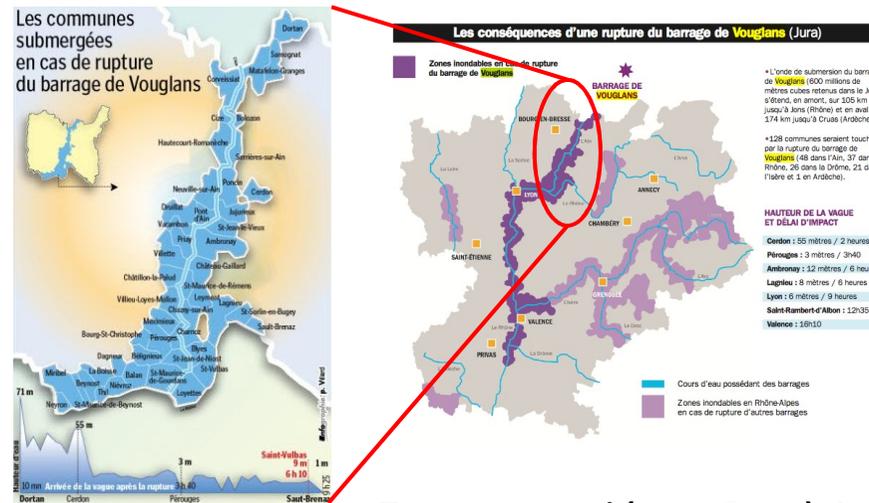


Le danger du barrage de Vouglans

45/14



Hypothèse: Rupture barrage de Vouglans lors d'une crue



Zones inondées. 6 m à Lyon



Centrale nucléaire Bugey

Si vraiment le barrage de Vouglans est un danger pour la centrale nucléaire en aval, c'est encore plus un danger pour la ville de Lyon et bien d'autres. Par cohérence, il faudrait militer pour la **sortie de l'hydraulique** plus que du nucléaire

Accidents : - Impact précoce

Filière énergétique	Pays de l'OCDE			Hors OCDE		
	Accidents	Nombre de morts	Nombre de morts/GWe/an ¹	Accidents	Nombre de morts	Nombre de morts/GWe/an ¹
Charbon	87	2 259	0,157	2 394	38 672	0,597
Chine 1994-1999				818	11 302	6,169
Chine 1999-2008				1 214	15 750	
Hors Chine				162	5 788	
Pétrole	187	3 495	0,132	358	19 516	0,897
Gaz naturel	109	1258	0,085	78	1 556	0,111
GPI	58	1856	1,957	70	2 789	14,896
Hydro	1	14	0,003	21	30 069	10,285
Nucléaire	0 ³	0	0	1	31	0,048
Biofioul	0	0	0	0	0	
Biogaz	0	0	0	2	18	
Geoth	0	0	0	1	21	
Total	442	8 882		2 925	92 672	

(1) Les deux graves accidents de Three Mile Island et de Fukushima n'ont occasionné aucun décès précoce imputable à la filière.

Fonctionnement normal :

- Énergie nucléaire : Uniquement effets de l'exposition au radon des mineurs d'uranium
- Énergies carbonées : - Extraction du charbon ; Émissions toxiques, gazeuses et particulaires (fines particules)

Le coût des énergies carbonées est disproportionné par rapport à celui des autres filières.

Prévisions: 100 millions de décès prématurés à l'échelle mondiale pour une période

d'exposition correspondant à une vie entière

- EnRs et nucléaires bons élèves.

- Impact tardif (décès)

Cancers radio-induits : Seuls cas identifiés: thyroïde de l'enfant (Tchernobyl 6000 cas).

Expositions < 100 mSv ? aucune donnée prouvant un risque ? à la dose reçue.

Mais (principe de précaution) risque pas exclu ;

... Autres causes : maladies cardio-vasculaires (fortes doses), effets indirects des évacuations.

Défi climatique et objectif neutralité carbone ☐

- ✓ Pas de solution miracle
- ✓ Augmentation nécessaire de la production d'électricité bas carbone, combinant renouvelables et nucléaire, mais la répartition dans le mix doit être dictée de façon à assurer l'équilibre du réseau électrique
- ✓ Le nucléaire est incontournable, pour répondre aux besoins en électricité **et en chaleur**, car seule la maîtrise de sources à haute densité peut permettre de découpler consommation d'énergie et consommation de ressources minérales.
- ✓ Urgence du développement d'un nucléaire durable
- ✓ Ne pas négliger d'autres pistes de défossilisation

☐ Ne surtout pas oublier les énormes besoins en énergie et ressources pour le développement de plus de la moitié de l'humanité !