



L'épuisement des combustibles et les risques d'accumulation de CO₂

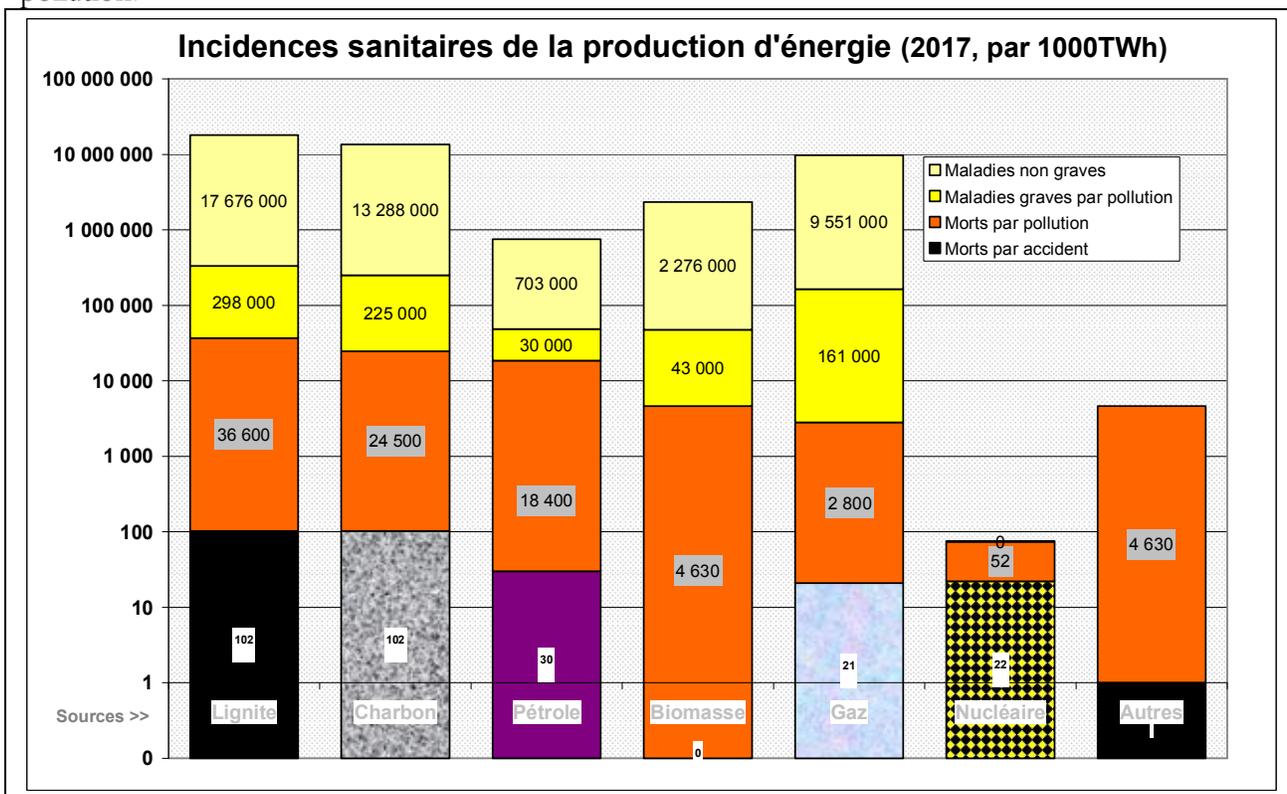
Table des matières

1. Les risques sanitaires actuels de la production énergétique.....	2
2. La part des sources dans la consommation mondiale d'énergie.....	2
3. La limite des émissions futures de CO₂.....	3
4. L'épuisement des combustibles	6
L'épuisement du charbon.....	7
L'épuisement du pétrole	7
L'épuisement du gaz « naturel »	8
5. Y aura-t-il épuisement de l'uranium ?.....	11
6. L'énergie éternelle de fusion.....	13
7. Comment limiter l'épuisement des combustibles et l'émission de CO₂.....	13
8. Conclusion	14
9. Annexe	14

1. Les risques sanitaires actuels de la production énergétique

L'essentiel des combustibles est utilisé dans le monde pour produire de l'énergie, est la source majeure d'émissions de gaz à effet de serre. Ces émissions représentent un risque titanesque pour l'humanité, à horizon du siècle. Rappelons cependant les risques courants.

Le diagramme suivant donne l'incidence sur la mortalité et sur la santé de la production d'électricité, par pétawatt-heure produit, en raison des émissions de particules fines PM10, du SO₂, des NO_x et des radionucléides issus de la production d'électricité (selon le projet ExterneE : External Costs of Energy). Ces données ne prennent pas en compte les décès dus aux canicules dues au réchauffement climatique. Les coordonnées sont logarithmiques, ce qui écrase les grands chiffres. Néanmoins, on note que les décès par accident sont numériquement 1000 fois plus faibles que les décès et maladie graves dues à la pollution.



On note que la source primaire de production qui a le moins d'incidence sanitaire est de très loin le nucléaire, contrairement à l'opinion la plus répandue, dans un rapport supérieur à 1000. Selon l'OCDE, de 1970 à 2008, 21 accidents de barrages hydrauliques ont provoqué plus de 30.000 décès accidentels, soit un niveau de risque semblable à celui du charbon pour les mineurs.

Contrairement à ce que la majorité des gens pensent :

Lorsqu'on prend en compte les émissions de pollution, les combustibles carbonés sont la source la plus risquée pour la population, sinon la plus dangereuse. Les barrages hydrauliques sont une autre origine de risques d'accidents. Le nucléaire est de loin la source la plus sûre.

2. La part des sources dans la consommation mondiale d'énergie

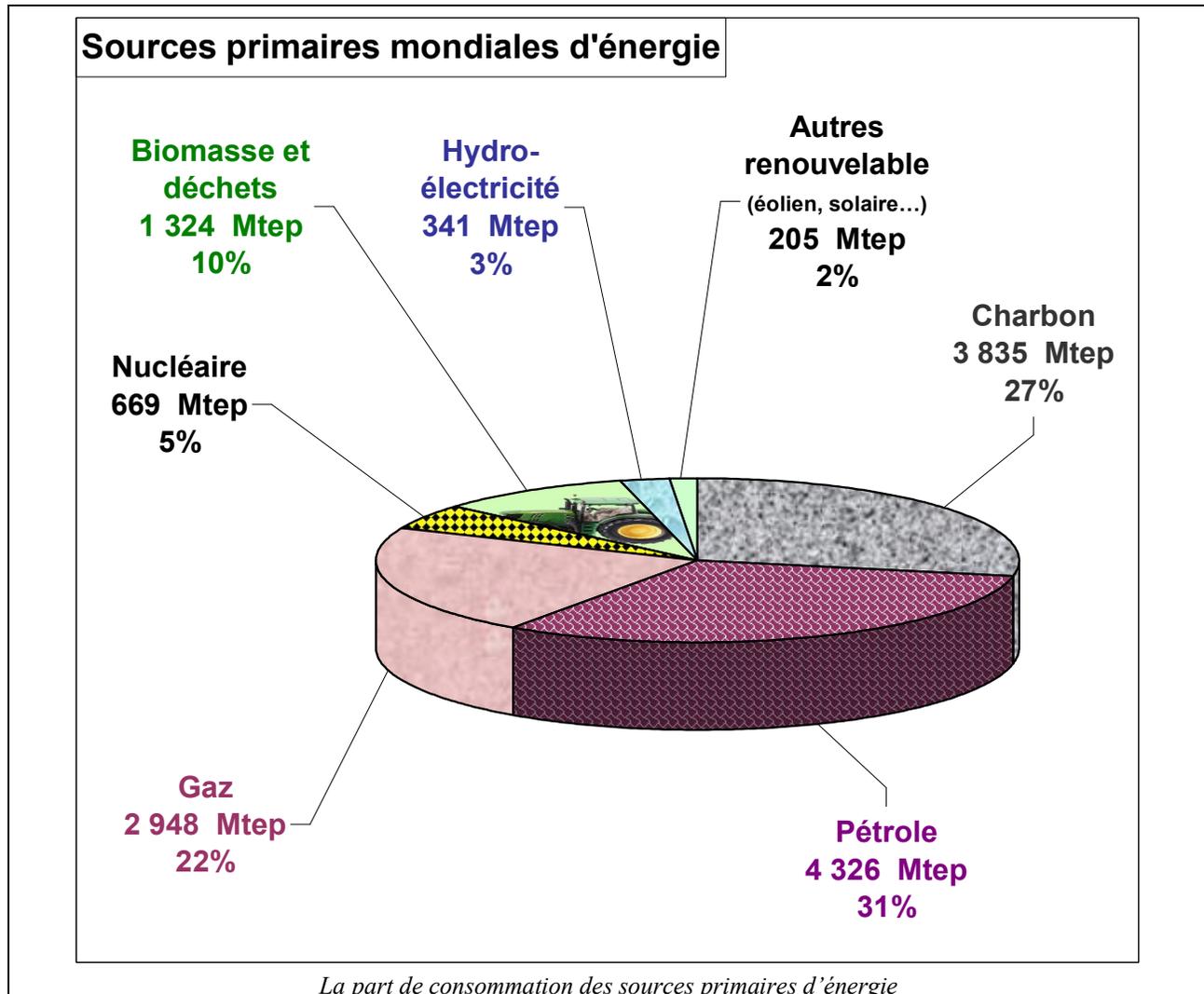
Au niveau mondial, seulement 20% de l'énergie est relativement décarbonnée et aussi nous allons le montrer, inépuisable, dont 5% renouvelable (hors les solutions de reprise en secours de l'éolien par exemple, qui est le gaz, jusqu'à 80% du temps).

Or ces sources sont épuisables.

L'utilisation de ces sources carbonées va se heurter à 2 limites :

- ⇒ l'épuisement du minéral ;
- ⇒ la quantité d'oxyde de carbone que l'on peut encore émettre dans l'atmosphère.

Compte tenu des ratios de consommation actuels, demanderons nous quel est la durée d'utilisation restante ?



3. La limite des émissions futures de CO₂

Les modélisations publiées par le GIEC (Figure 3-1 et Figure 3-2) indiquent les augmentations de températures qui résulteront de plusieurs hypothèses d'émissions de CO₂. Or il serait très risqué que l'augmentation de température dépasse le facteur 2, soit un degré de plus que la température actuelle, car au-delà les risques d'emballement existent. Cet emballement peut notamment être provoqué par le passage à l'état gazeux du méthane gelé et sous pression au fond des océans et dans le pergélisol.

Les modélisations du climat utilisées par le GIEC indiquent que cet objectif de réchauffement de 2°C correspond à un rejet cumulé de CO₂ dans l'atmosphère de 3.500 Gt.

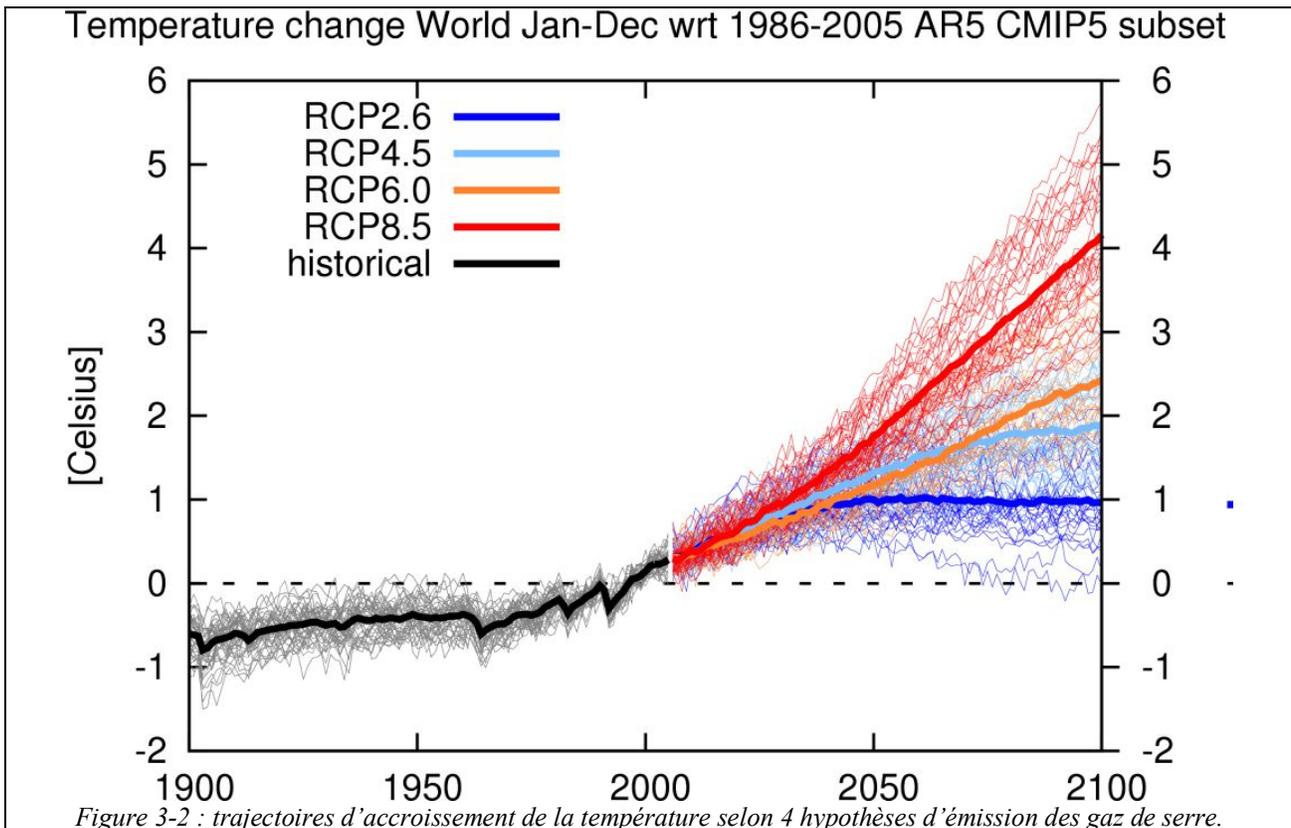
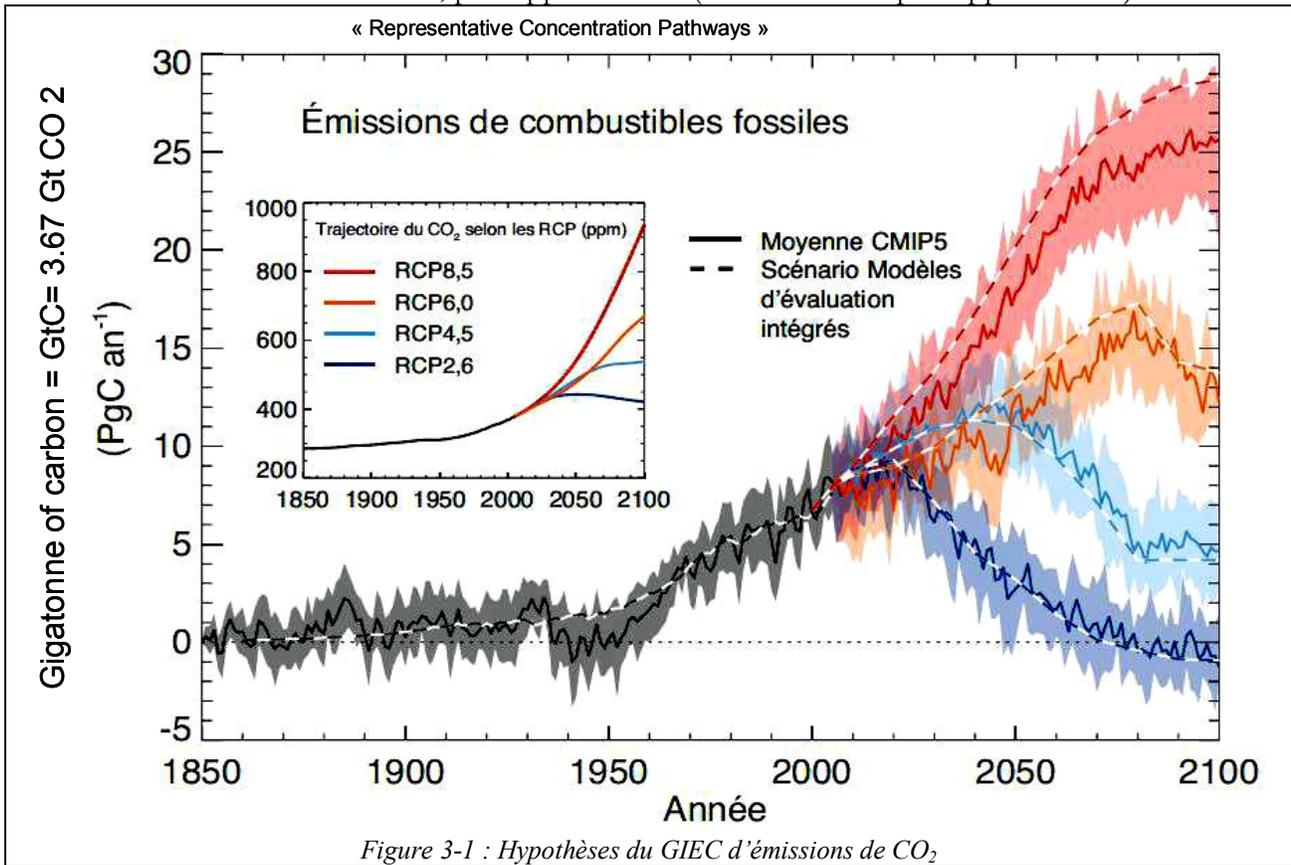
Or l'humanité en a déjà rejeté environ 2.000 Gt. Nos émissions moyennes sont de 10 Gtec/an.

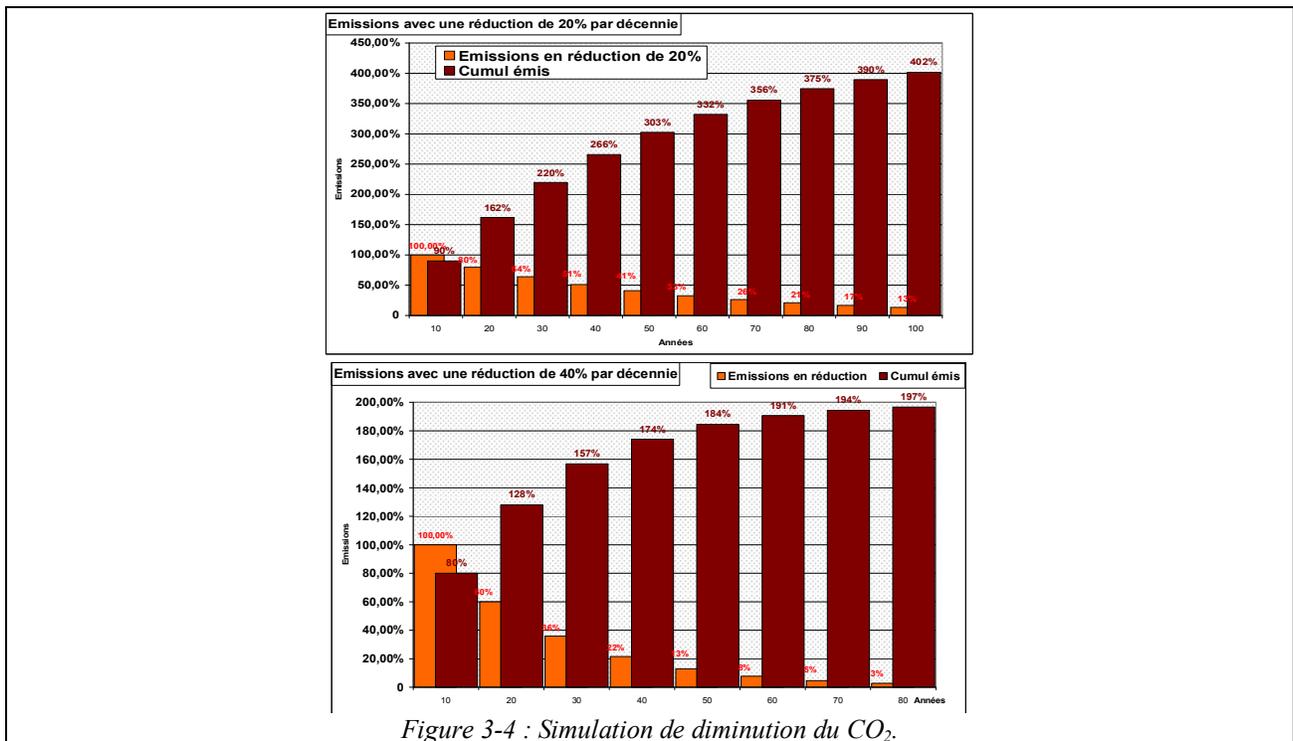
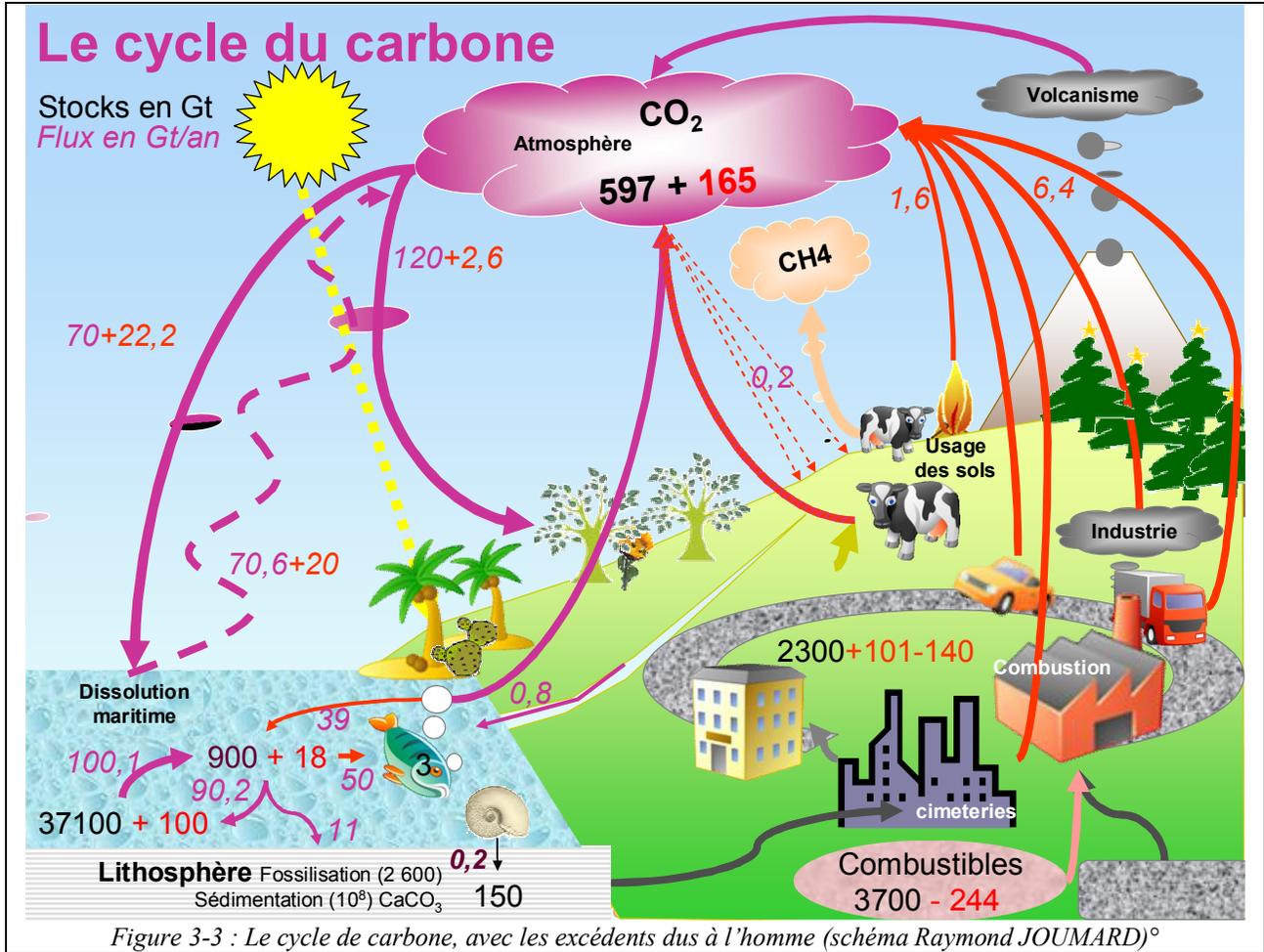
En 2020, il reste donc environ 1.500 Gt de CO₂ à émettre, soit 400 Gt de Carbone (C), soit :

- ⇒ 40 ans à émission constante de 10 Gtec/an,
- ⇒ mais 100 ans à émissions décroissantes de 20% par an,
- ⇒ et seulement 200 Gt émises, si l'on réduisait nos émissions de 40% / an.

C'est ce que montre les 2 graphiques simulant cette diminution.

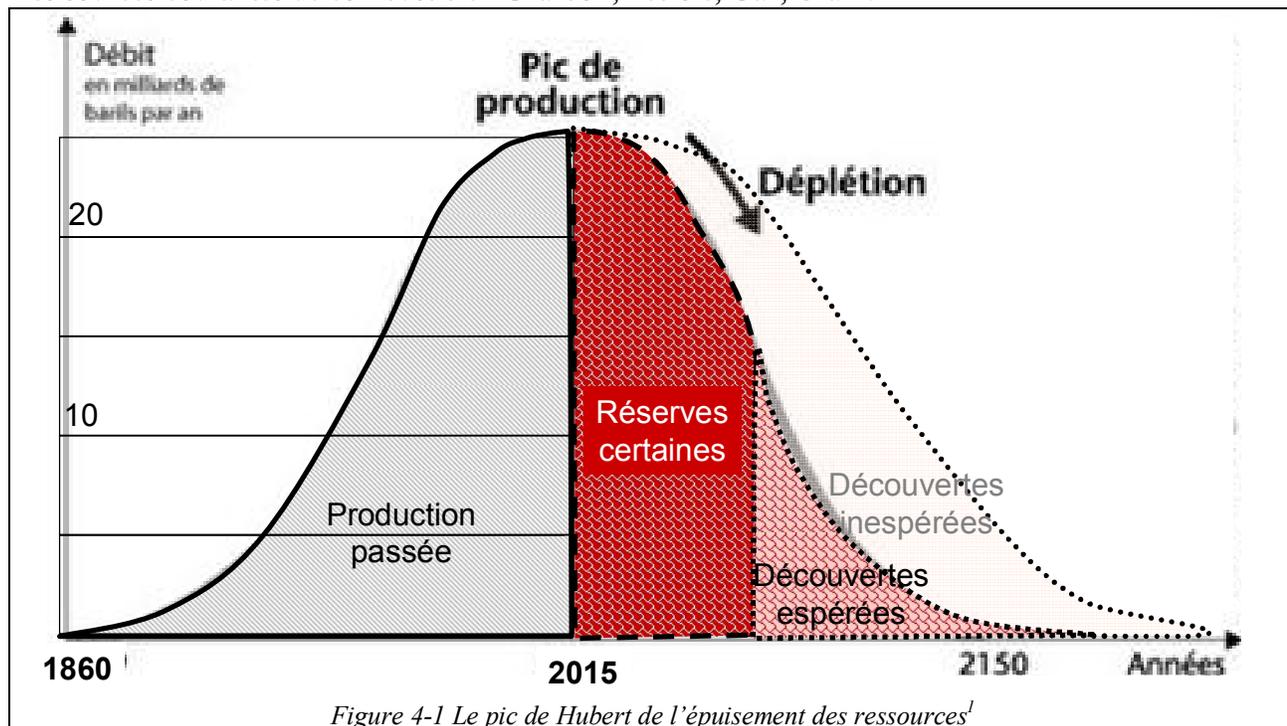
D'où l'objectif de diminution de l'ordre de 40% par an pris comme objectif, ce qui correspond à une diminution d'un facteur 5 en 2050, par rapport à 2020 (ou un facteur 6 par rapport à 1950).





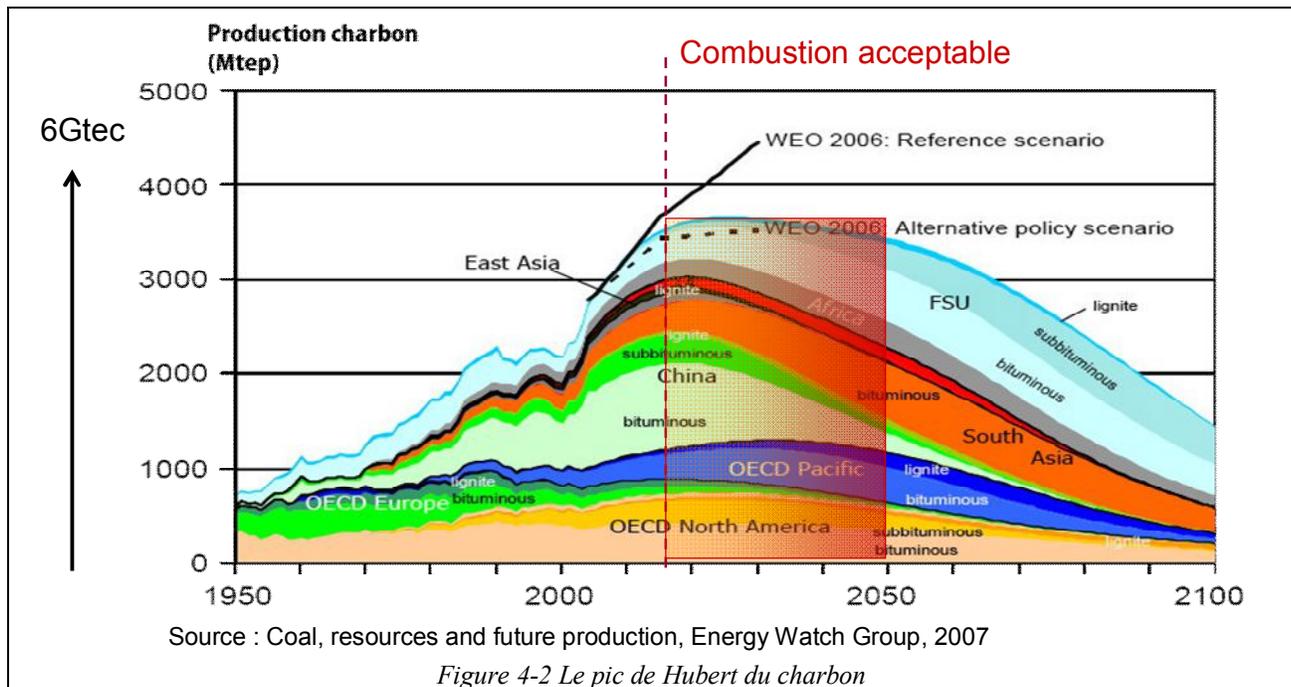
4. L'épuisement des combustibles

L'évolution de la consommation d'une ressource finie a une forme du type « courbe en cloche », dite Pic de Hubert, le mathématicien qui en a fait la démonstration, passant par un maximum, puis diminuant. Selon l'évolution technologique, il arrive que de nouvelles formes de ressources soient découvertes (comme le fracturation des schistes) ce qui repousse la date d'épuisement. La forme de la consommation donne alors une idée de la date d'épuisement. Nous allons analyser ce qu'il en est pour les sources courantes de combustible : Charbon, Pétrole, Gaz, Uranium.



¹ 1 tec (tonne d'équivalent charbon) = 29 Gj = 0,7 tep = 5 baril
 1 tep (tonne d'équivalent pétrole) = 42 Gj = 1,45 tec = 7,3 baril
 1 baril = 0,14tep = 0,2 tec

L'épuisement du charbon



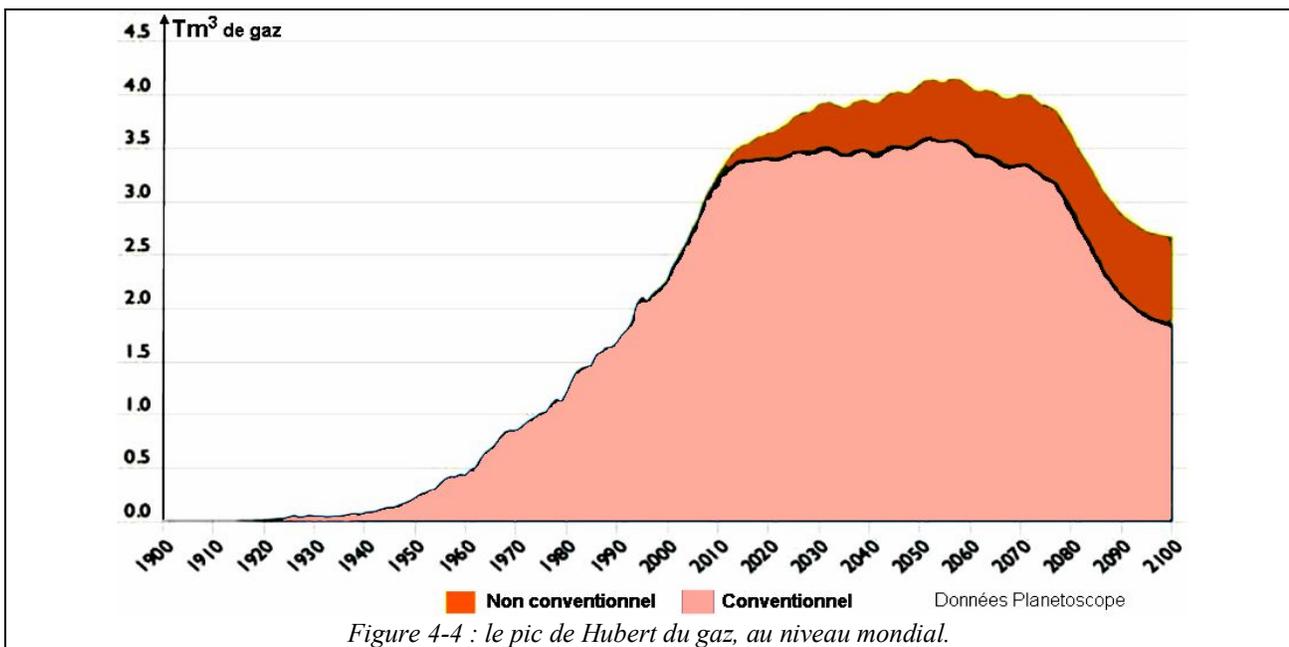
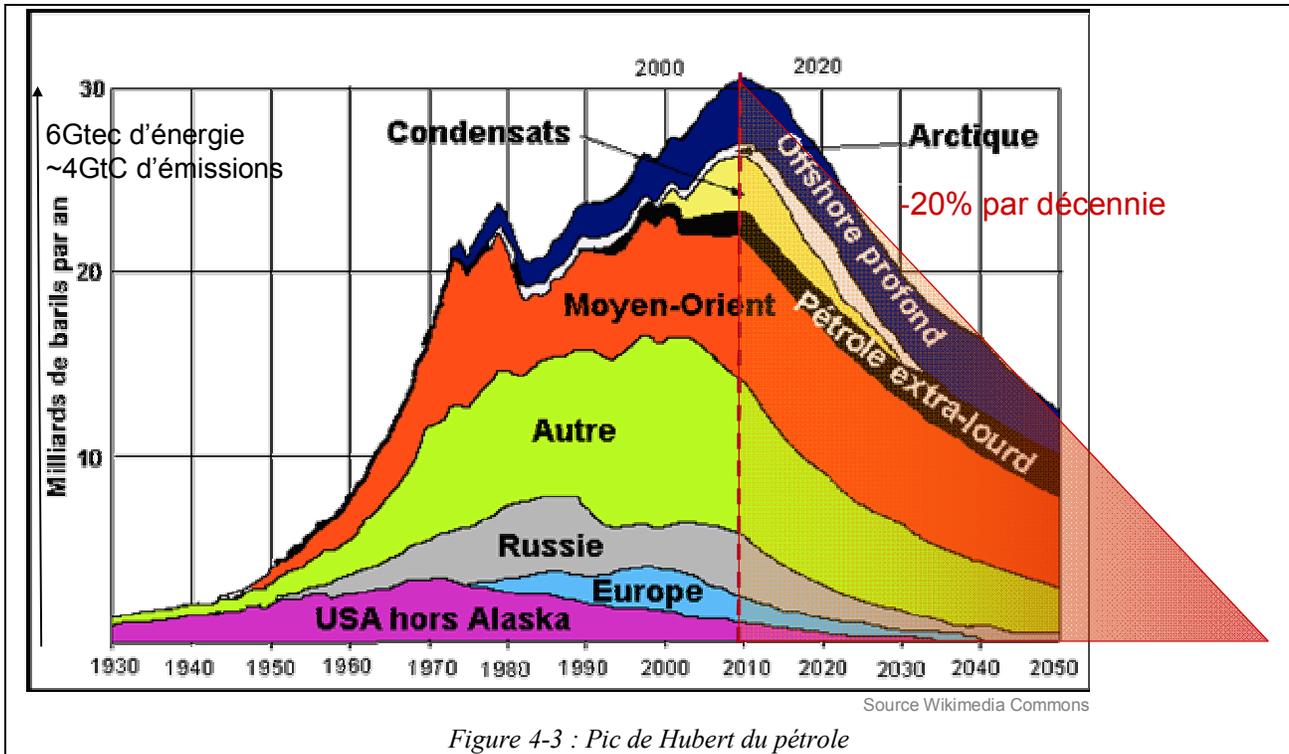
La Figure 4-2 donne la forme du pic de Hubert du charbon. La courbe suppose que le taux d'énergie soutirée du charbon reste de l'ordre d'un petit tiers de l'énergie. On est en ce moment sur un plateau qui va baisser à partir de 2050. Dans ces conditions, la consommation du charbon aura épuisé sa part d'émissions de CO₂ en 2050.

Il conviendrait donc que la prise en compte de l'externalité insupportable d'émissions de CO₂ impose de diminuer la consommation du charbon.

Cette contrainte pourrait être par exemple une taxe carbone suffisamment élevée pour qu'une énergie décarbonnée maîtrisable comme le nucléaire fasse effondrer la consommation du charbon.

L'épuisement du pétrole

Le summum de consommation du pétrole a été franchi en 2010. Depuis, la consommation décroît de 15 à 20% par décennie. Cela signifie que les puits de pétrole devraient s'épuiser vers 2110. Malheureusement ce rythme est légèrement supérieur à ce qui serait nécessaire pour réduire suffisamment nos émissions de CO₂ pour 2100.



L'épuisement du gaz « naturel »

Le pic de Hubert du gaz montre qu'au niveau mondial, nous avons atteint un maximum dans la production du gaz la production et sommes sur un plateau.

Cependant, le transport du gaz est complexe et coûteux. C'est pourquoi, il est important d'analyser la production locale de l'Europe et de la France.

Les gisements de gaz en Europe sont surtout en mer du Nord et ils sont en train de s'épuiser au rythme de 43% par décennie. Cette décroissance est celle espérée pour limiter nos émissions de CO₂. Il y a donc un risque de pénurie de gaz en Europe, qui pourra avoir besoin d'en importer et, dans ce cas, l'Europe sera totalement dépendante du gaz russe d'ici à la fin du siècle.

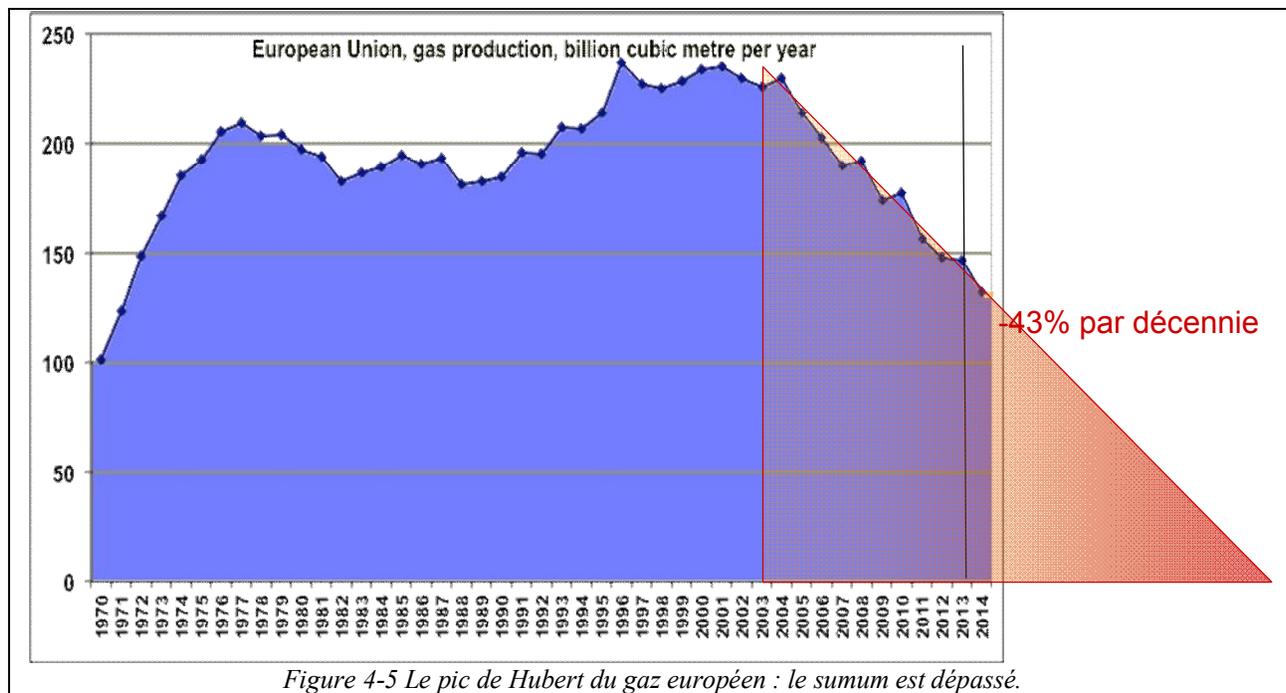


Figure 4-5 Le pic de Hubert du gaz européen : le sumum est dépassé.

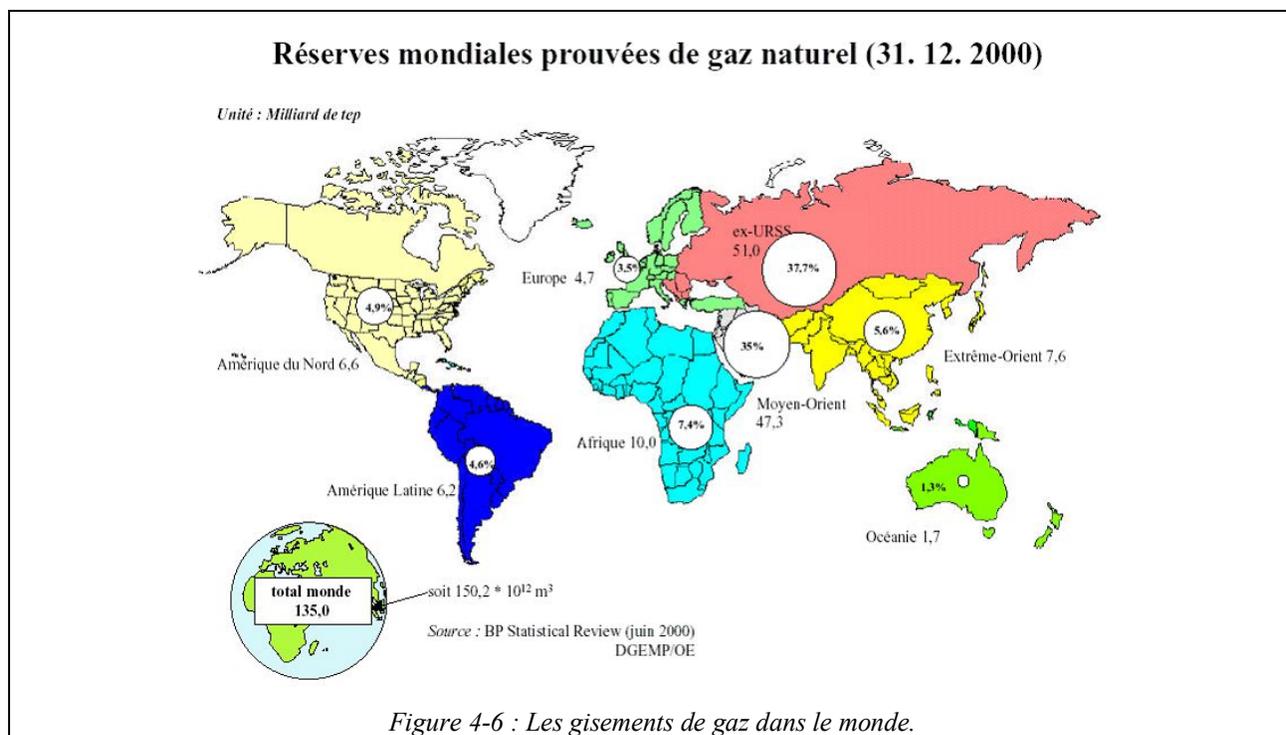
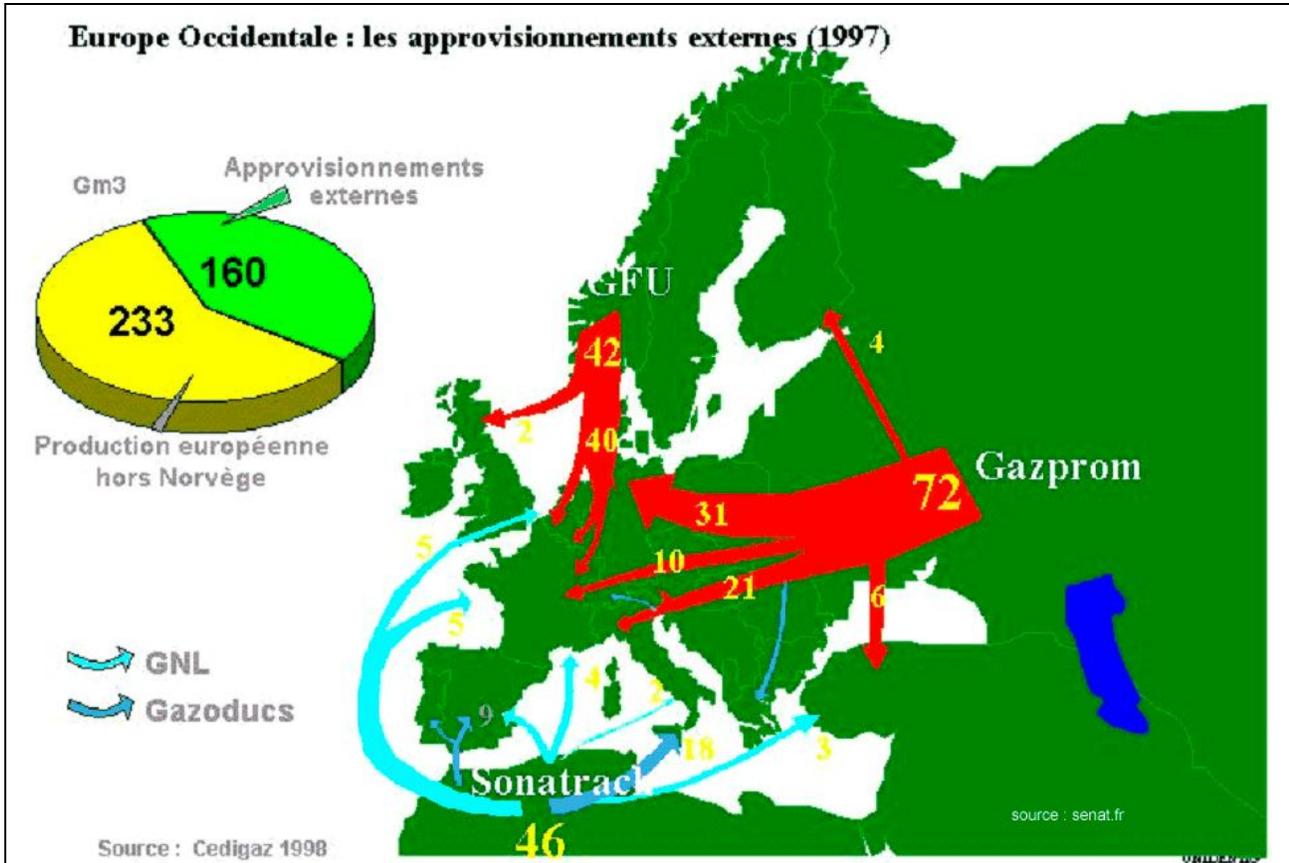
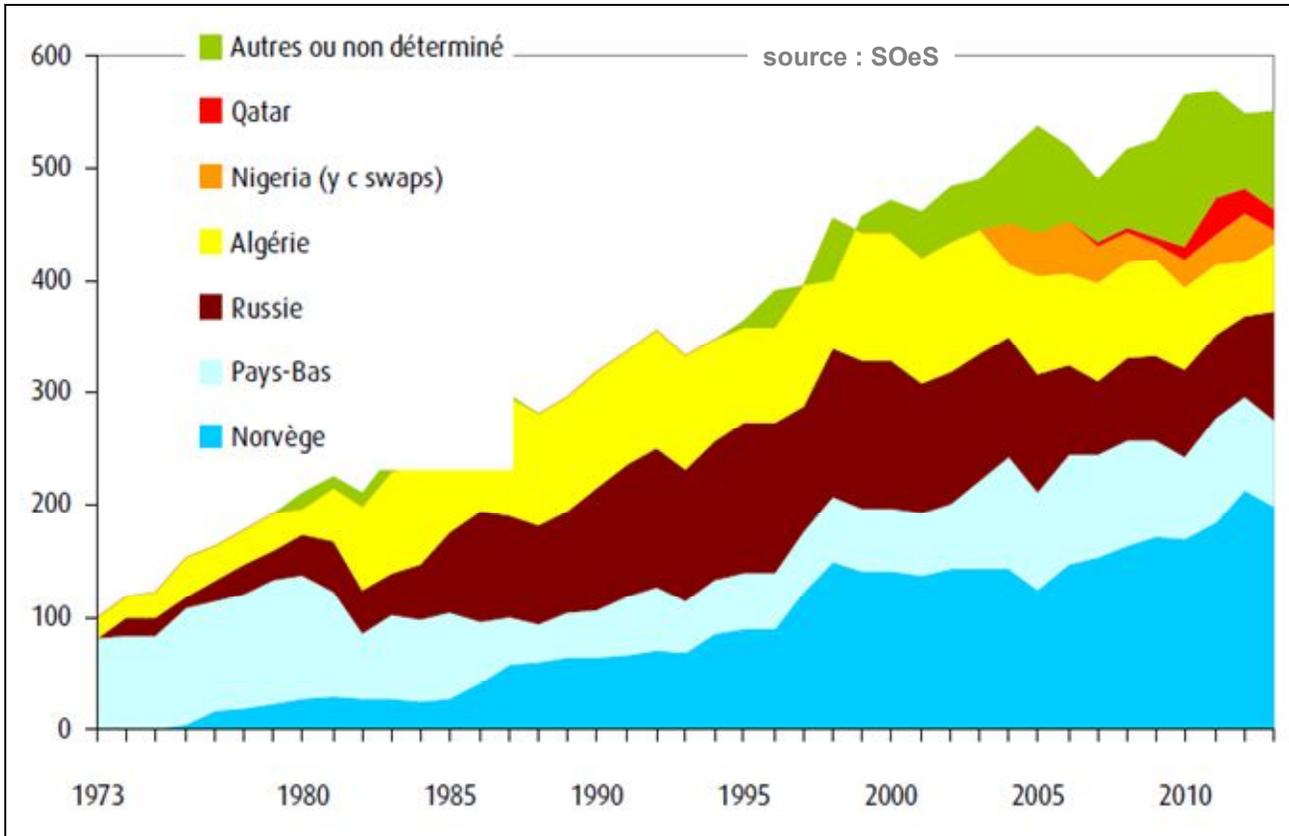
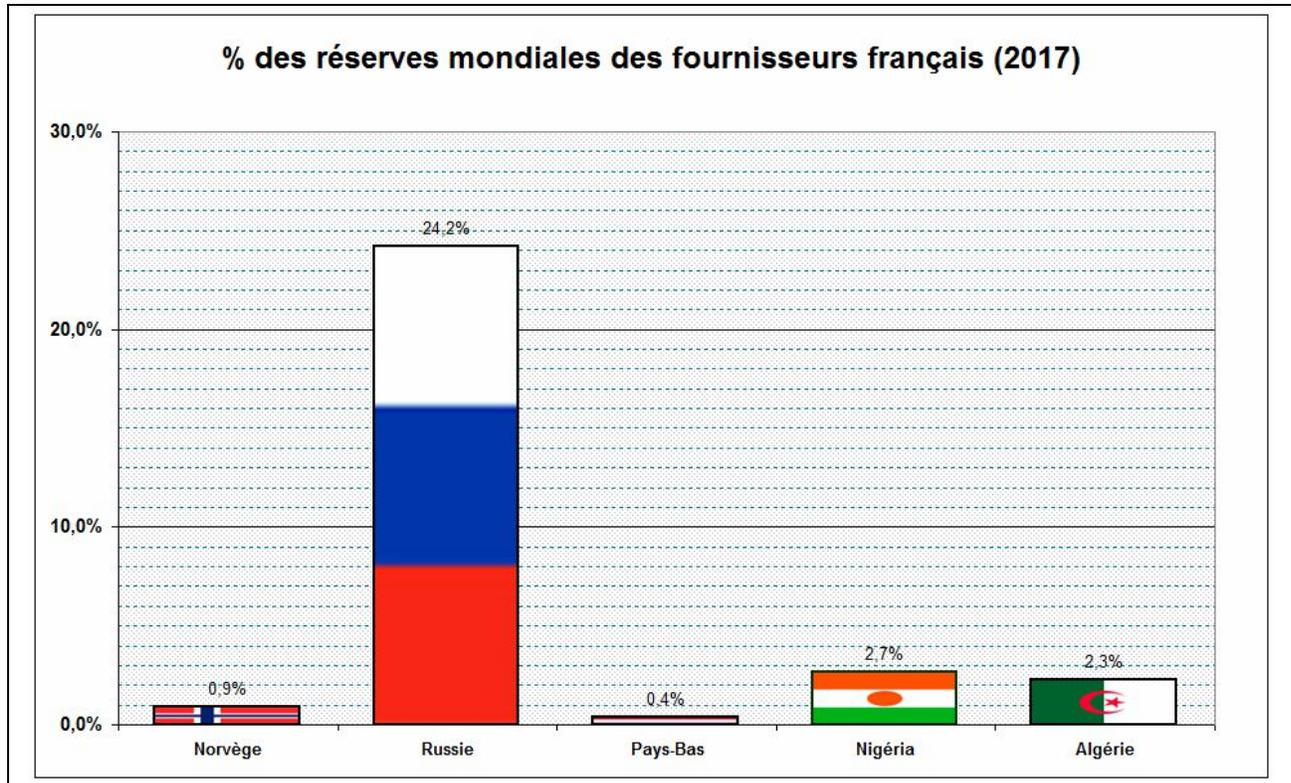


Figure 4-6 : Les gisements de gaz dans le monde.

Quant à la France, elle a épuisé le gaz de Lacq et importe désormais son gaz essentiellement depuis d'autres pays européens, de la Russie, de l'Algérie, du Nigeria et du Qatar.

**Le summum du pic de Hubert est dépassé pour les énergies carbonnées (hormis le gaz russe).
On disposera cependant de charbon pour plus de 100 ans. La décroissance de la disponibilité des combustibles est bien inférieure à celle préconisée par le GIEC.**





5. Y aura-t-il épuisement de l'uranium ?

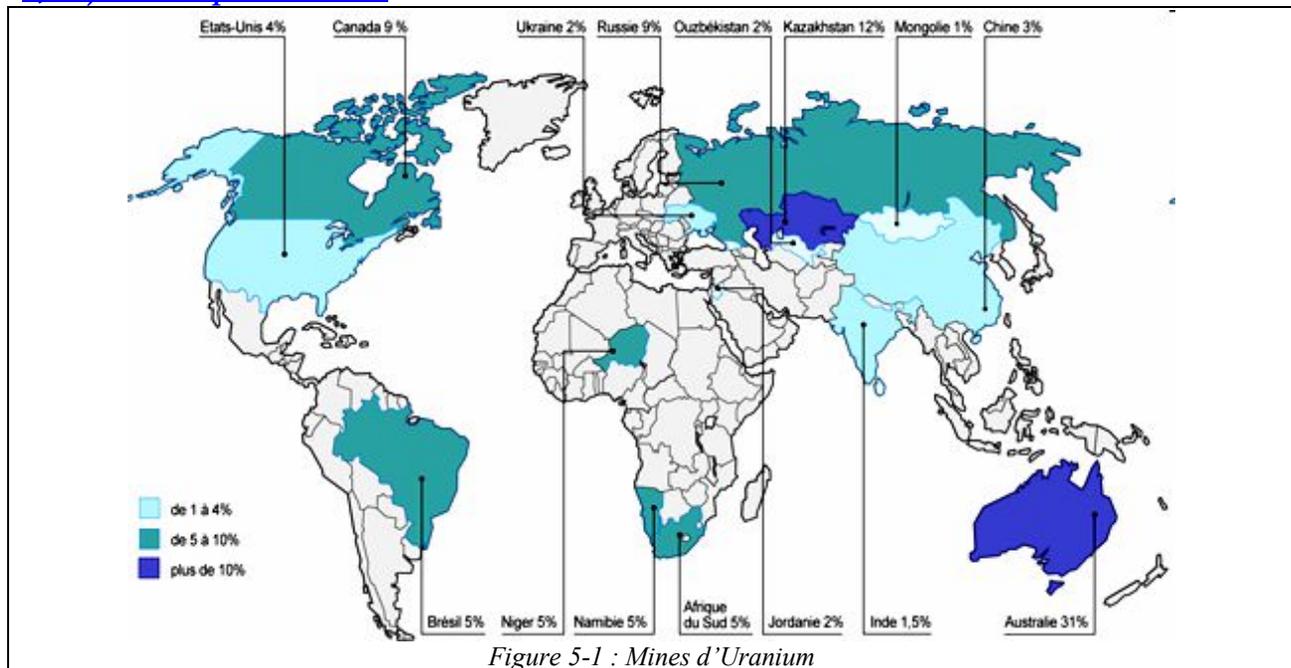
Une part de 11% de l'électricité mondiale est produite par de l'uranium enrichi, en 2012.

La Figure 5-1 montre la localisation mondiale des mines d'uranium. L'uranium naturel existe partout dans le monde, comme dans le Rhône. Mais les stocks et importations restent secrets.

L'uranium naturel n'est constitué que de trois isotopes :

- ⇒ à 99,28% d'uranium 238 (^{238}U) non radioactif ;
- ⇒ à 0,71% d'uranium 235 (^{235}U) fissile ;
- ⇒ des traces (0,006%) d'uranium 234 (^{234}U)

Dans les réacteurs nucléaires à eau REP et REB, est utilisé de l'uranium « enrichi » à 5% (depuis 0,7%) en isotope fissile ^{235}U



Les ressources dites : « Raisonnablement Assurées » (RRA) sont recouvrables en concentration supérieure à 0,1%, à un coût d'extraction compétitif de moins de 130 \$/kg d'uranium extrait. Ces ressources sont estimées à 5,3 millions de tonnes en 2017. Cependant, le coût de l'uranium naturel dans la production d'électricité étant très faible (0,5%), il serait envisageable de recourir à du minerai moins concentré. Des roches ayant des concentrations en uranium inférieures à 0,1% peuvent également être qualifiées de « minerais » à condition que l'uranium puisse y être facilement séparé des autres éléments et soit économiquement recouvrable.

Les réserves correspondent à environ une centaine d'années dans des réacteurs à neutrons lents.

Cependant, 0,7% seulement de l'Uranium naturel est actuellement utilisé, dans nos réacteurs de type REP (Réacteur à eau pressurisée ou PWR). Or il est possible d'utiliser la presque totalité de l'uranium, ce qui porterait à **10.000 ans la disponibilité de combustible nucléaire**. En effet, lors des réactions nucléaires dans les réacteurs actuels, une part de l'uranium 238 (^{238}U) non radioactif capte un neutron, ce qui produit la transmutation en plutonium (^{239}Pu). Celui-ci est radioactif. Au lieu de traiter ce plutonium comme un déchet, en France, il est utilisé comme combustible, dans le MOx, mélangé à 7% avec de l'Uranium 238 (^{238}U), déchet de l'enrichissement (250 t en France). Dans les réacteurs nucléaires alimentés par du MOx, l'uranium 238, non radioactif, se transforme aussi en plutonium radioactif en captant un neutron. C'est ce qu'on appelle la surgénération. 20 REP utilisent 30% de MOx et l'EPR est conçu pour fonctionner avec 100% de MOx.

La France a également conçu un réacteur surgénérateur (Super-Phoenix) refroidi au sodium, pour fonctionner exclusivement avec du MOx et capable de consommer ainsi 100% de l'uranium, sans créer de déchets de fusion (transuraniens). Mais il a été arrêté, pour des raisons non techniques, après avoir fonctionné de façon satisfaisante et ininterrompue pendant 9 mois. D'autres types de surgénérateurs à sels d'uranium liquide (UF_4) seraient une autre filière prometteuse de surgénérateurs. Encore faudrait-il en construire.

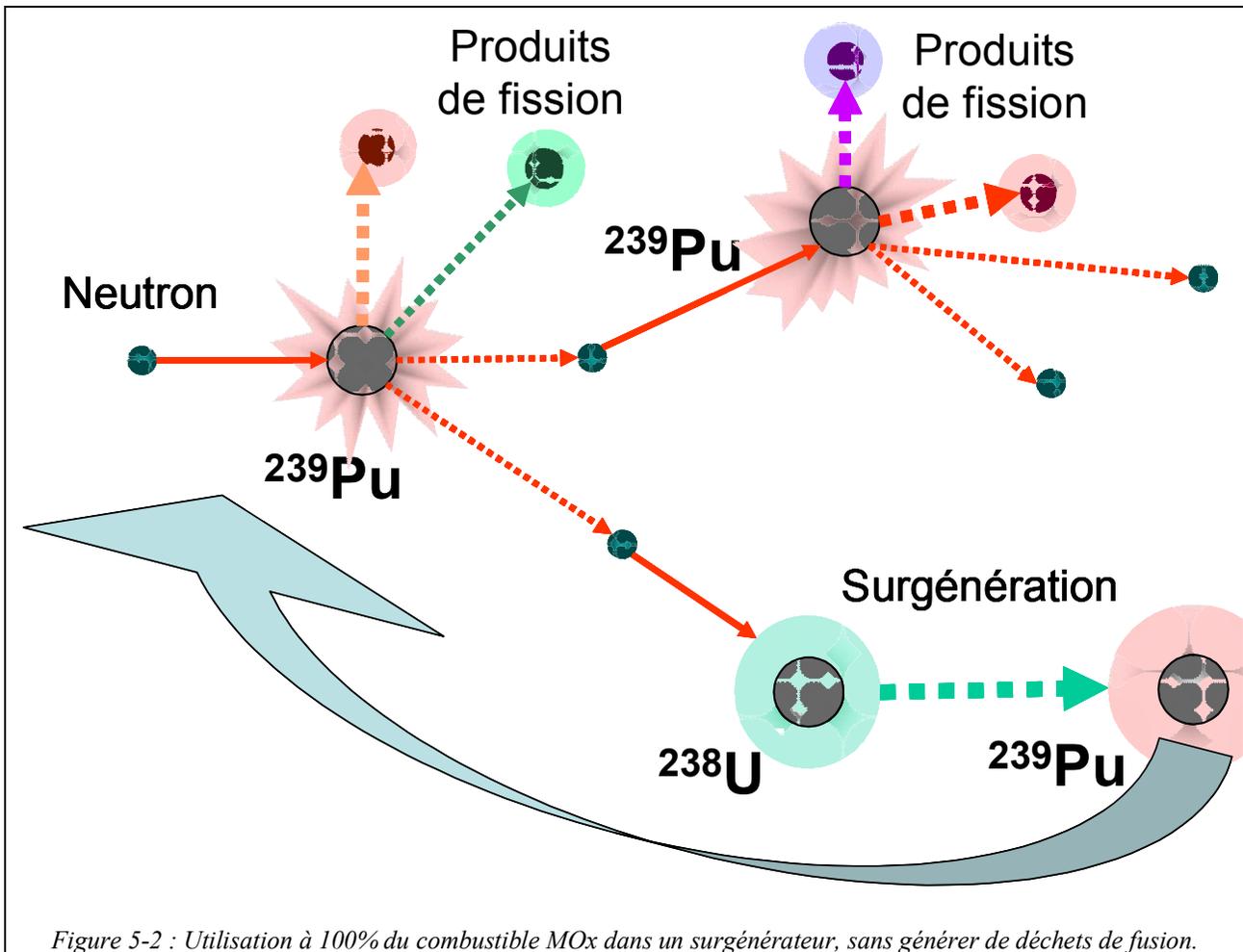


Figure 5-2 : Utilisation à 100% du combustible MOx dans un surgénérateur, sans générer de déchets de fusion.

6. L'énergie éternelle de fusion

Cette énergie est celle qui existe dans les étoiles. Elle a créé à partir des atomes d'hydrogène primaire tous les éléments que nous connaissons, d'un poids atomique allant de celui de l'hélium jusqu'à celui du fer. Si les conditions de très forte température de leur constitution existent, ils se constituent et la masse de ces éléments étant inférieure à la somme des masses des éléments qui les ont constitués, la combinaison qui les crée génère plus d'énergie qu'elle en absorbe et s'autoalimente. C'est l'énergie des étoiles.

La matière première de cette réaction est de l'hydrogène, élément constitutif de l'eau, que l'on peut considérer comme inépuisable à l'échelle de temps de l'humanité et même de la terre.

La difficulté réside dans le fait qu'il est extrêmement difficile d'enclencher une réaction de fusion nucléaire, à 150 M°C (millions de degrés) et encore plus de la maintenir tout en la maîtrisant.

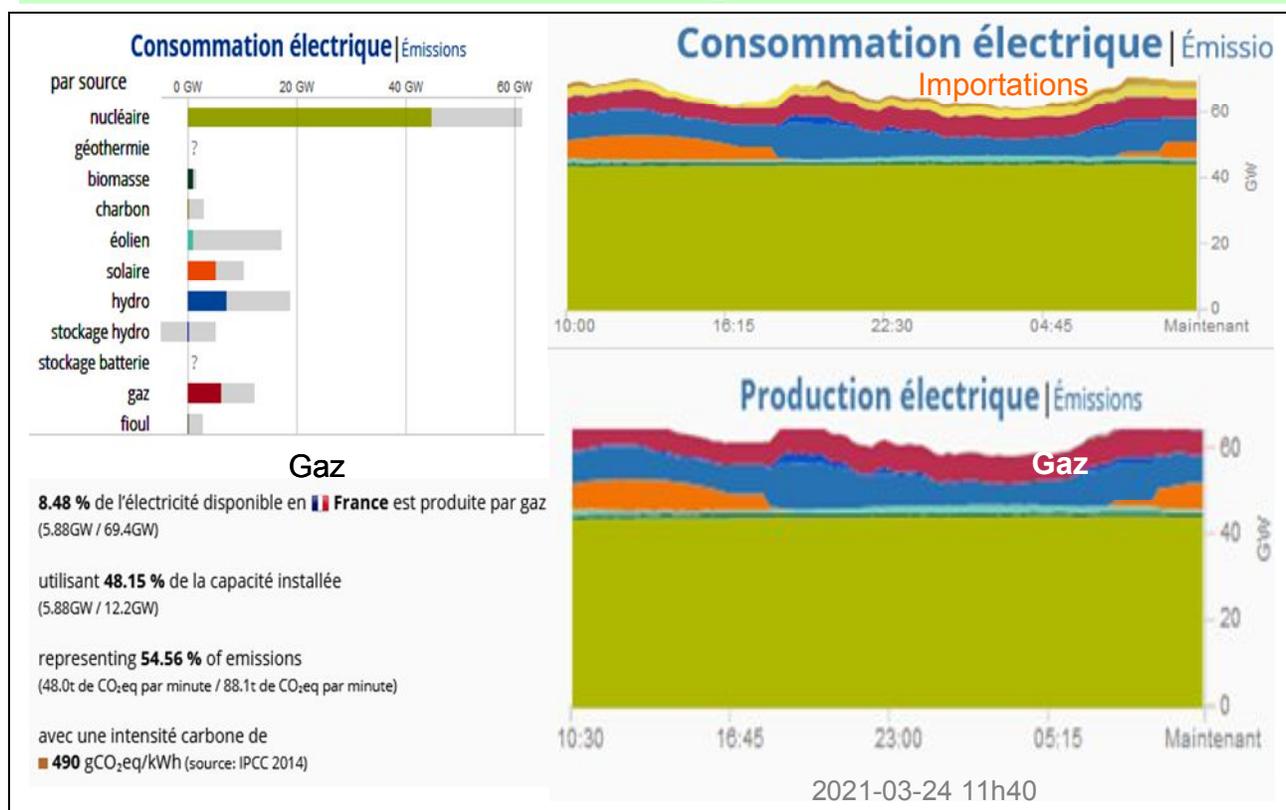
Des prototypes de réacteurs (appelé Tokamac) sont en construction :

- ⇒ Européen ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), à Cadarache,
- ⇒ Américain SPARC par « Commonwealth Fusion Systems », start-up financée par le MIT,
- ⇒ Chinois.

Une équipe de chercheurs internationaux travaille ainsi à Cadarache sur la réalisation d'un prototype de réacteur réalisant cette fusion d'éléments. Le début de fonctionnement du prototype est prévu pour 2025. La réalisation d'un modèle expérimental à échelle réelle est prévue pour la deuxième moitié du siècle.

La fusion sera donc la source d'énergie de la fin du siècle. La réaction en soi ne génère pas de déchet radioactif, mais peut en créer dans l'environnement qui reçoit des neutrons.

7. Comment limiter l'épuisement des combustibles et l'émission de CO₂



Le site danois electricitymap.org montre que depuis 2020 la puissance électrique décarbonée disponible en France est insuffisante pour éviter d'utiliser de l'énergie carbonée (gaz et charbon). Ceci est dû à l'arrivée à l'âge de 40 ans de 2 à 3 réacteurs par an, à l'arrêt des 2 réacteurs de Fessenheim et

retard de démarrage de l'EPR de Flamanville. Donc tout développement d'utilisation d'énergie électrique ne pourra donc être en moyenne fourni qu'avec du gaz. Il faudrait naturellement éviter cela. Il faut donc changer de paradigme politique nationale sur l'énergie ! (horizon 2022 ?) :

- ⇒ Abolir la limite de 63 GW, soit 43 GW disponible sur 61 GW) et la stratégie de la Loi sur la Transition Énergétique et la Croissance Verte ;
- ⇒ Développer l'énergie décarbonnée maîtrisable : + 20 GW de centrales nucléaires (horizon 10 ans) ;
- ⇒ Rétablir le subventionnement de réacteurs à neutrons rapides pour recycler les déchets nucléaires en combustible MOx ;
- ⇒ Développer un plan batterie fabriquées en France (ou en Suède), pour stocker l'énergie aléatoirement surabondante des éoliennes dans des batteries au sodium par exemple ;
- ⇒ Développer alors la circulation des véhicules électriques ;
- ⇒ Se chauffer avec des climatiseurs, à installer notamment dans les bâtiments neufs ;
- ⇒ Continuer à subventionner les recherches sur des tokamaks (l'énergie à l'hydrogène),
- ⇒ Poursuivre les recherches pour stocker l'énergie plus économiquement, sous forme d'hydrogène utilisable pour les transports.

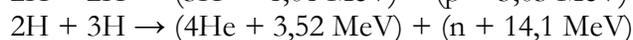
8. Conclusion

L'énergie nucléaire de fission et dans le futur l'énergie de fusion garantissent à l'humanité une source d'énergie électrique pratiquement inépuisable, n'émettant pas de CO₂.

Donc, à condition de vouloir l'exploiter, l'humanité de n'a pas à craindre de pénurie d'énergie, mais seulement l'abus dans un avenir proche d'utilisation des combustibles carbonés pour en générer.

9. Annexe

Les réactions types de fusion à partir de l'Hydrogène pour donner de l'Hélium sont :



2H = atome de deutérium avec 1 neutron (N) + 1 proton (P) (Masse 2,014101777(99) u)

He : 4,002602 ± 0,000002 u

Selon la formule $E=MC^2$, elles génère une énergie énorme : **1,0 MeV= 1,61×10⁻¹³J.**
