

Comment éviter le dérèglement climatique

1	Le dérèglement climatique est dû au réchauffement.....	3
1.1	Le réchauffement	3
1.2	Stabilité et instabilité dues aux GES	3
1.3	Les effets mondiaux de l'accroissement de la température	4
1.4	Conclusion sur le dérèglement climatique.....	6
2	Rappels sur les Gaz à Effet de Serre (GES)	7
2.1	Les gaz et aérosols participant à l'effet de serre	7
2.2	Les émissions de CO ₂	9
2.3	Les émissions de méthane.....	10
2.4	Les émissions de Protoxyde d'azote	10
2.5	Évolution des concentrations de G.E.S.....	11
3	Les émissions de CO₂.....	11
3.1	Les émissions de CO ₂ par l'électricité	12
3.2	Les niveaux d'émissions de CO ₂	13
3.3	Absorption du CO ₂ par la forêt	25
4	Les objectifs du plan Climat Air Energie de la Métropole	26
4.1	Les objectifs du plan actuel.....	26
4.2	Les objectifs du plan futur	26
4.3	La neutralité carbone, un objectif ambitieux	27
4.4	L'augmentation de l'efficacité énergétique	27
4.5	Les relations économiques travail, capital et énergie.	28
4.6	Relation forte de « cointégration » entre énergie et PIB.....	29
5	Changer de paradigme pour réduire le ratio GES / énergie.....	32
5.1	La stratégie primordiale pour atteindre les objectifs.....	32
5.2	Prendre en compte les remarques de la Cour des Comptes	33
5.3	Les limites physiques des renouvelables	33
5.4	Les retombées économiques nulles de l'accroissement des renouvelables	37
5.5	Le coût excessif du recours aux renouvelables.....	37
5.6	Le coût désastreusement élevé du soutien	43
5.7	En conclusion.....	45
6	Quels leviers d'action pour atteindre le facteur 6.....	45
6.1	Rappel de la stratégie	45
6.2	Conclusion	48

Synthèse

De multiples phénomènes naturels influencent le climat et la température de la terre, comme le montrent (cf. notre étude précédente) la géologie et l'analyse des glaces du pôle sud et du Groenland sur des centaines de millénaires. Cependant, la presque totalité ont une reproduction cyclique prévisible, hormis le volcanisme. Les prédictions montrent que la température moyenne aurait dû rester stable, hors influence humaine, sauf un réchauffement faible (+0,3°) jusqu'en 2030 imputable à la variation des taches solaires. Or, la température a cru de 1°C depuis le début de l'ère industrielle et les simulations du GIEC prévoient une augmentation de 1° supplémentaire pour 2050. Au-delà, le réchauffement s'emballerait, à cause du méthane emmagasiné dans la terre et l'océan.

La seule hypothèse du réchauffement climatique actuel, explicable scientifiquement repose sur nos émissions de gaz à effet de serre supérieures à la capacité d'absorption de la planète, 80% dû au CO₂, le reste partagé essentiellement entre le méthane (généré par l'élevage de ruminants) et le protoxyde d'azote (généré par les engrais agricoles). Les émissions de CO₂ sont dues à la combustion du charbon, du pétrole et du gaz pour fabriquer de l'électricité, des biens et pour le chauffage et la mobilité. Il faudrait que les états développés en émettent aujourd'hui 6 fois (pour la France) à 12 fois (pour les USA) moins, pour qu'il soit absorbé par les plantes et l'océan. La France utilise des sources d'énergie peu émettrices des CO₂ : l'hydraulique (4 à 12g/kWh), le nucléaire (6 à 12g/kWh) et les énergies renouvelables, si leurs composants proviennent de pays sobres en carbone (France, Suède, Suisse, Norvège). Se développe aussi la biomasse, malgré sa capacité de généralisation limitée.

Le développement des renouvelables comme l'éolien et le photovoltaïque sont-ils la solution pour obtenir une énergie sans carbone ? A cause de leur caractère aléatoire et fatal (il faut obligatoirement les consommer), la Cour des Comptes a montré, à juste titre, dans ses rapports que techniquement, cette stratégie devrait rester bien plus limitée que la loi ne l'envisage et qu'elle est économiquement catastrophique. D'abord, la durée de vie limitée annoncée pour les installations (20ans) rend ces solutions 3 fois plus coûteuses que les sources maîtrisables traditionnelles (charbon, hydraulique ou nucléaire). Leur intermittence, leur raccordement au réseau, l'équilibre de celui-ci et les installations de secours rendent leur coût complet 10 fois plus élevé que celui des sources maîtrisables et bien plus encore dès qu'on doit les stocker. Il faut majoritairement consommer à perte les productions aléatoires quand on n'en a pas besoin, voire à des coûts négatifs. De plus l'énergie solaire n'est jamais disponible lors de la pointe du soir et l'énergie éolienne 4 fois sur 5, est absente. Toutes les centrales nucléaires doivent rester opérationnelles. Les centrales de secours, généralement au gaz, accroissent nos émissions de CO₂ au lieu de les réduire.

La capacité des énergies renouvelables aléatoires va prochainement atteindre en France le minimum de la consommation du réseau, ce qui va rendre encore plus nécessaire de savoir stocker l'énergie. Le stockage par pompage de l'eau dans une succession de barrage (STEP) double le coût de l'électricité et n'est envisageable qu'à faible dose. Le stockage électrique en batteries (au Li) serait abominablement plus coûteux (rapport 5/jour de stockage) dans l'état actuel de la technologie. Le stockage chimique (fabrication d'hydrogène) est prometteur à terme, mais son coût élevé actuel et son faible rendement (30 à 50%) ne sert qu'à utiliser l'énergie éolienne surabondante. Des progrès techniques immenses sont nécessaires pour abaisser coûts ou rendements et seront hélas trop tardifs.

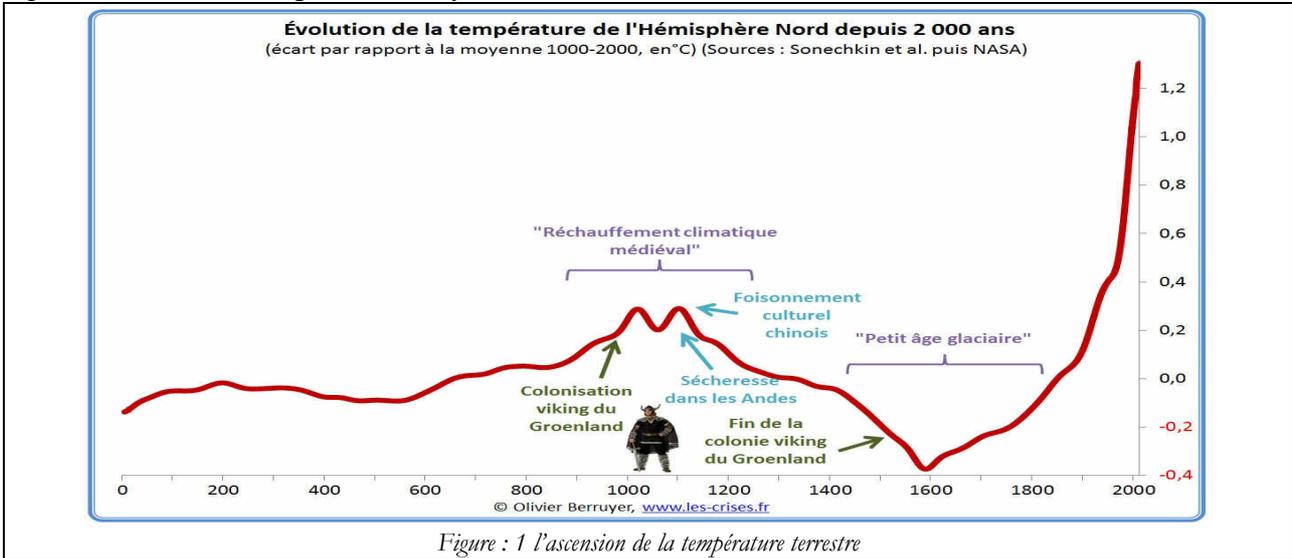
Comme le démontre le « Shift Project » la seule stratégie politiquement acceptable à la fois pour réduire nos émissions et pour conserver un niveau de vie acceptable par les populations est **de recourir massivement à l'énergie électrique aux sources décarbonnées pour nos modes de transport et pour un chauffage par climatisation** (hydraulique et nucléaire). Cependant, la technologie actuelle n'offre pas d'alternative au recours à davantage d'énergie électrique nucléaire pour remplacer toute nos énergies combustibles, en France et surtout à l'étranger.

En plus du tram et du métro, les solutions urbaines devront faire coexister **des transports électriques variés et innovants** : télécabines, véhicules suspendus autonomes et intelligents, navettes fluviales, voiturettes électriques bientôt autonomes, trolleybus électriques à autonomie électrique, vélos électriques ou non, trottinettes ou autres EDP et aussi les voitures électriques ou hybrides.

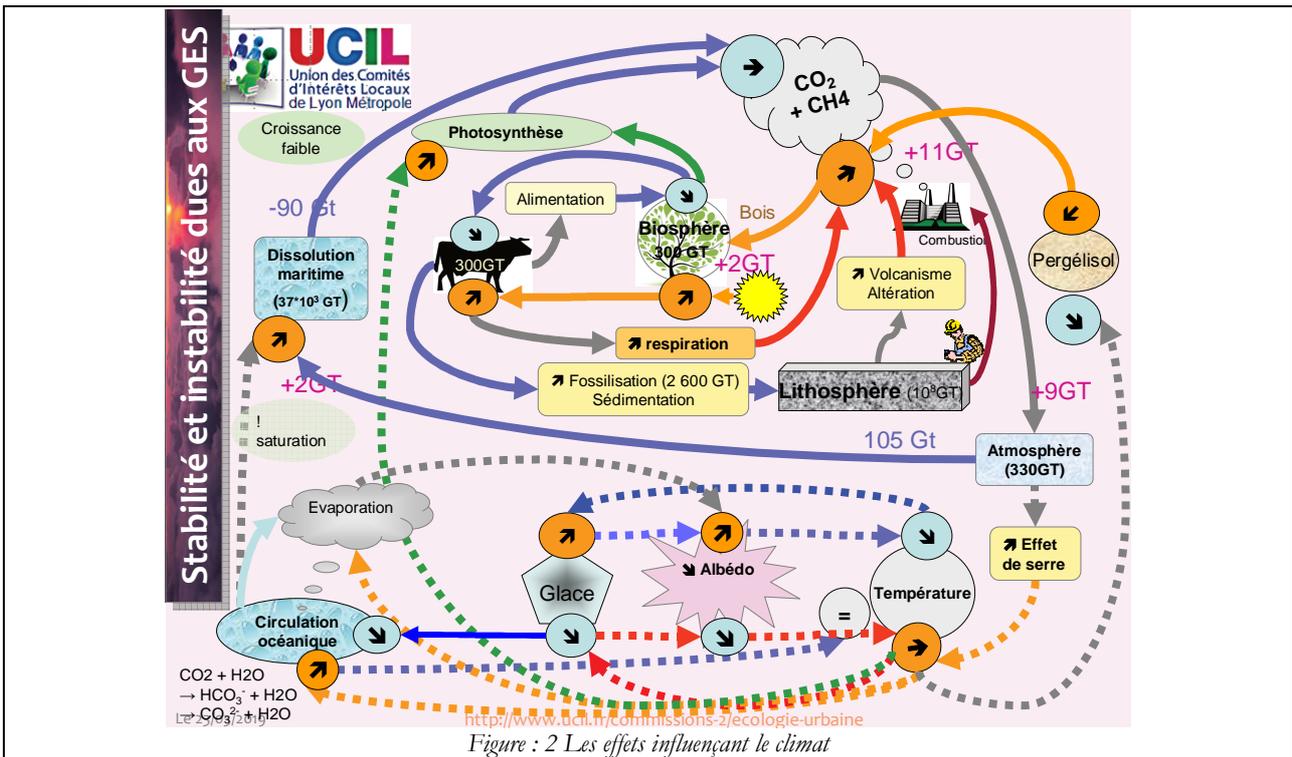
1 Le dérèglement climatique est dû au réchauffement

1.1 Le réchauffement

Le dérèglement climatique est dû à des causes humaines et se traduit entre autres par une forte augmentation de la température moyenne sur terre.



1.2 Stabilité et instabilité dues aux GES



La température terrestre a beaucoup varié au cours des millénaires et elle est due à un équilibre fragile entre de nombreux phénomènes, plus ou moins bien pris en compte dans les divers modèles.

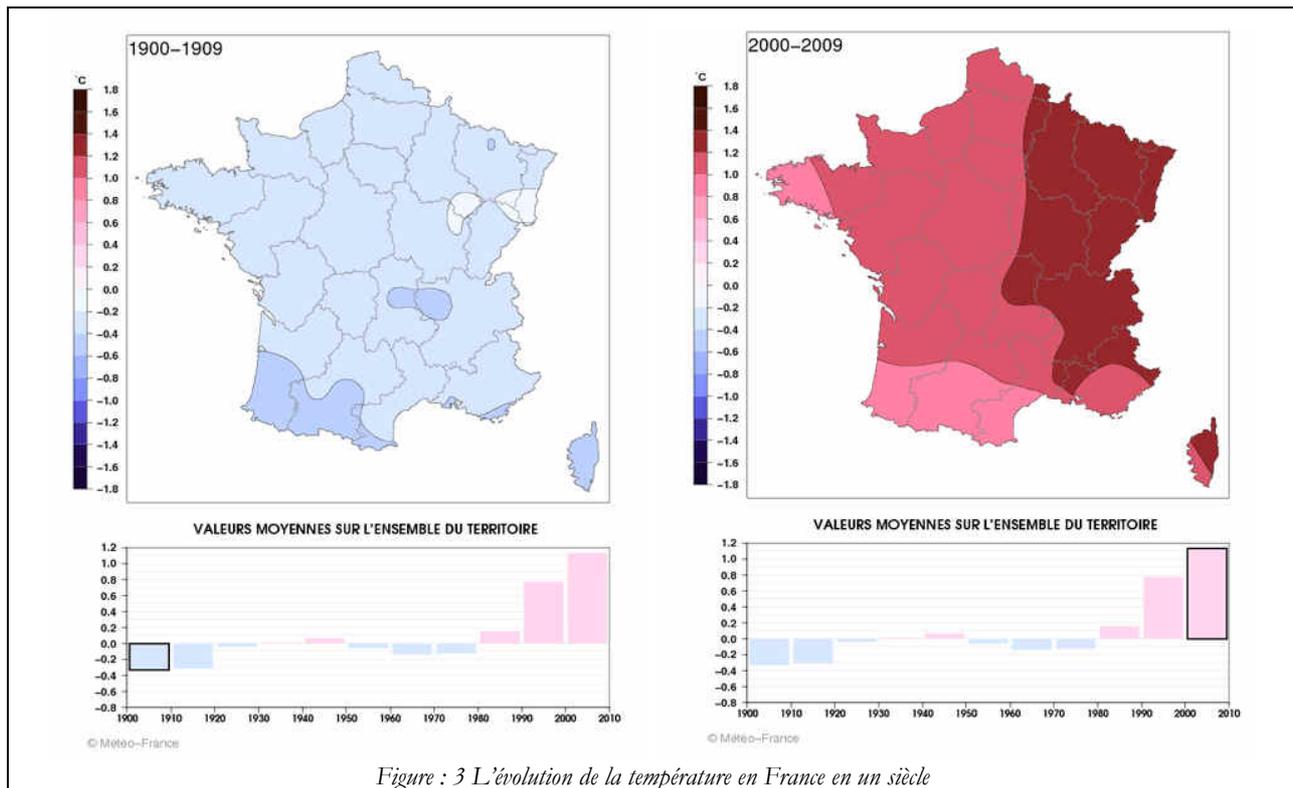


Figure : 3 L'évolution de la température en France en un siècle

1. 3 Les effets mondiaux de l'accroissement de la température

1. 3. 1. La fonte de la banquise

Depuis 1980, la couche de glace permanente de l'Arctique perd environ les 10 ans. (NASA, 2003), soit 5,26 Mkm², en août 2007, pour 7,5 Mkm² en 1978 (National Snow and Ice Data Center, 08/2007). Elle a perdu 40% de son épaisseur. En antarctique, les températures moyennes ont augmenté 2 fois plus rapidement qu'ailleurs (ACIA, 11/2004). Les modèles prévoient sa disparition d'ici quelques décennies, ce qui sera lourd de [conséquence sur le climat en Europe](#). Or sa fonte d'été s'est accélérée bien au-delà des prévisions.

En France, Le réchauffement depuis 1900 s'accélère depuis 30 ans. La fonte des glaciers en est la preuve la plus évidente.

1. 3. 2. La fonte des glaciers

La fonte des glaciers est un parfait témoin de l'accroissement de la température moyenne en France.



Figure : 4 Glacier du dôme de la Lauze (3200m-3600m) est en cours de disparition. On n'a pas pu y skier en Août 2017.

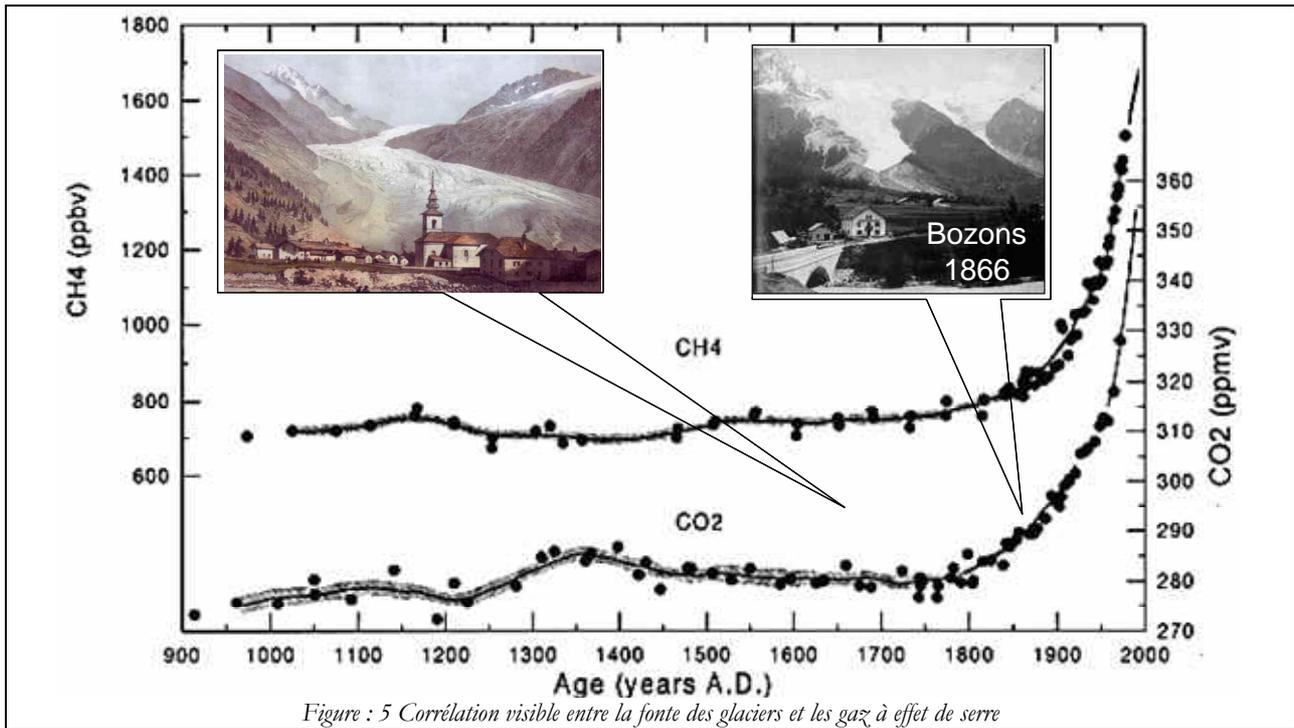


Figure : 5 Corrélation visible entre la fonte des glaciers et les gaz à effet de serre

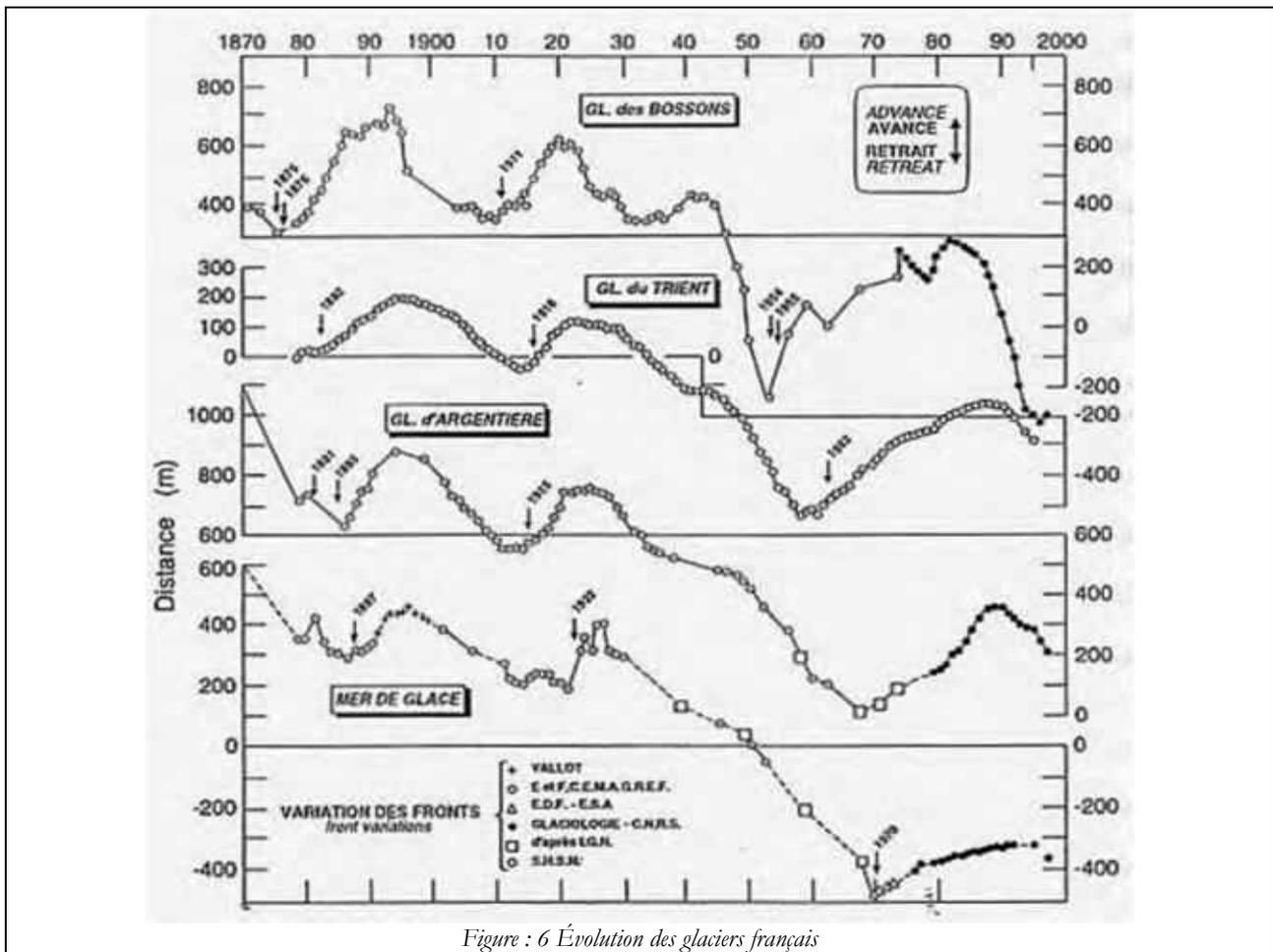


Figure : 6 Évolution des glaciers français

Concernant les précipitations :

- ⇒ la hausse des précipitations, pendant l'hiver,
- ⇒ la baisse des précipitations pendant l'été et l'allongement des sécheresses.

Une mauvaise distribution des précipitations provoquant l'expansion des zones arides, perturbe le régime des cours d'eau.

La fonte partielle des calottes glaciaires, et la hausse de température provoquent une élévation du niveau de la mer, avec inondations des basses terres des régions côtières.

La fonte des calottes polaires et des glaciers continentaux s'accélère.

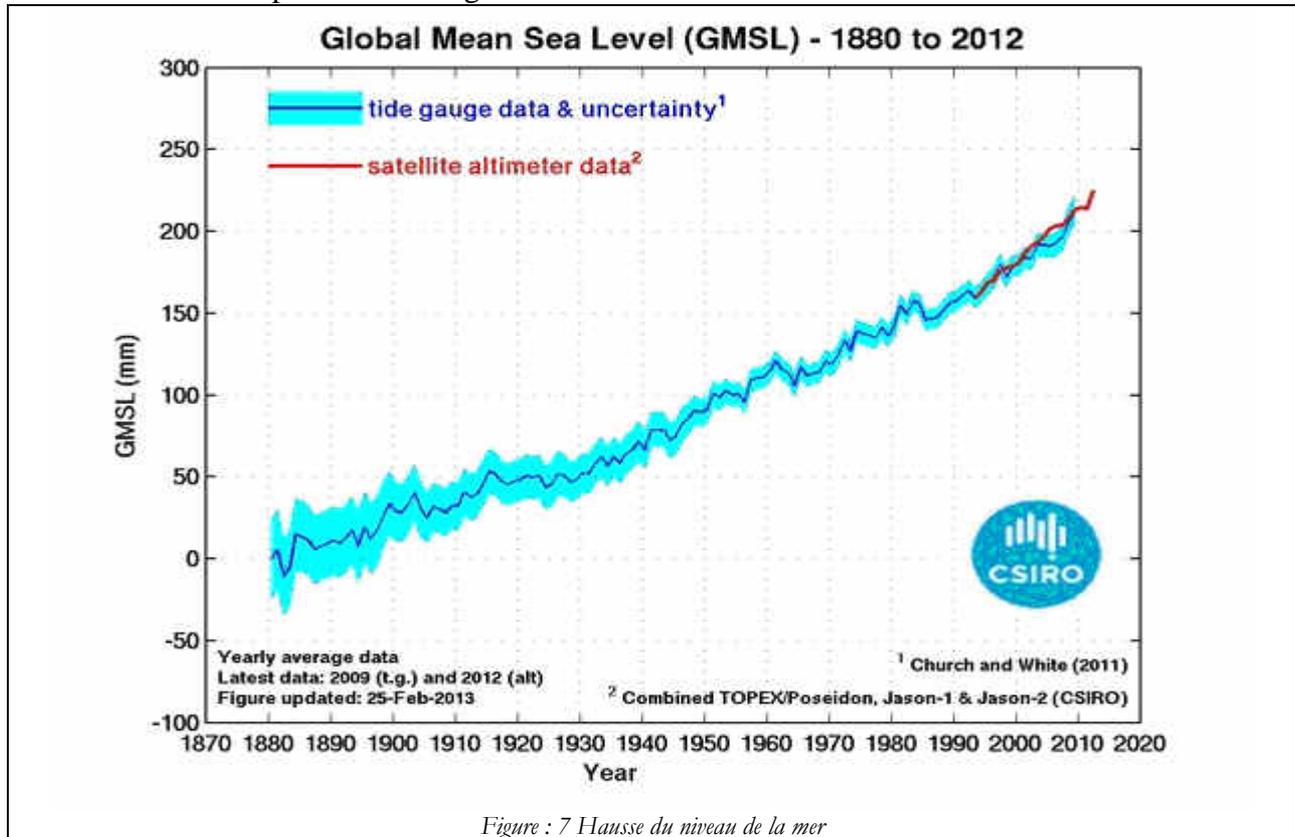


Figure : 7 Hausse du niveau de la mer

1. 3. 3. Conséquences hydrologiques du dérèglement climatique

Le niveau moyen des océans s'est élevé au rythme le plus rapide depuis près de 3000 ans,

- ⇒ moitié à cause de la fonte des calottes polaires et des glaciers,
- ⇒ moitié à cause de la dilatation thermique de l'eau.

Le niveau a augmenté (A. Cazenave, La Recherche, 07/2006) :

- ⇒ depuis 1880 de 17 cm,
- ⇒ durant le XX^{ème} siècle de 14 cm, soit 2 mm par an,
- ⇒ de 1990 à 2003 de près 3 mm par an,
- ⇒ depuis 2003, de 3,27 mm/an.

Mais la dilatation thermique voit sa contribution diminuer (0,4 mm/an).

1. 3. 4. Conséquences sociologiques du dérèglement climatique

Ce dérèglement climatique risque fortement de déclencher d'énormes catastrophes humanitaires : ⇒

- Famines,
- ⇒ Épidémies,
- ⇒ Révolutions,
- ⇒ Guerres,
- ⇒ Exterminations ethniques...

1. 4 Conclusion sur le dérèglement climatique

Les émissions de GES induisent l'élévation de température. Les océans jouent le rôle de ralentisseur.

La saturation océanique entraîne un réchauffement rapide d'où :

- ⇒ la fonte des glaces,
- ⇒ l'élévation du niveau des océans,
- ⇒ la perturbation des courants (el Niño, Gulf Stream),
- ⇒ la destruction de la biodiversité qui sera catastrophique pour l'humanité,
- ⇒ la fonte du CH₄ dans le pergélisol qui risque d'emballer les phénomènes.

Pour éviter la catastrophe, le GIEC estime qu'il faut limiter le réchauffement à moins de 2°C
L'épuisement des nappes de pétrole, puis des mines de charbon arrivera trop tard.

2 Rappels sur les Gaz à Effet de Serre (GES)

2.1 Les gaz et aérosols participant à l'effet de serre

Les rayons solaires et notamment les gaz infrarouges qui nous réchauffent traversent les couches de l'atmosphère. Une partie du rayonnement notamment certaines fréquences d'infrarouge, est renvoyée notamment par les glaciers et la banquise. C'est l'effet d'Albédo. L'effet de serre est provoqué par la réverbération de certaines de ces fréquences de rayonnement infrarouge, par certains gaz (à effet de serre) qui composent la haute atmosphère.

On note qu'en revanche, les poussières et gouttelettes dites aérosol ont un effet inverse, car elles filtrent l'entrée des rayons provenant de l'extérieur. C'est, par exemple, le cas des traces de vapeur d'eau émises par les avions à réacteur et des cirrostratus.

L'effet de serre existe naturellement. Sans effet de serre, la température de l'atmosphère de la terre serait d'environ -18° au lieu de 15°. Les participations naturelles sont représentées ci-dessous.

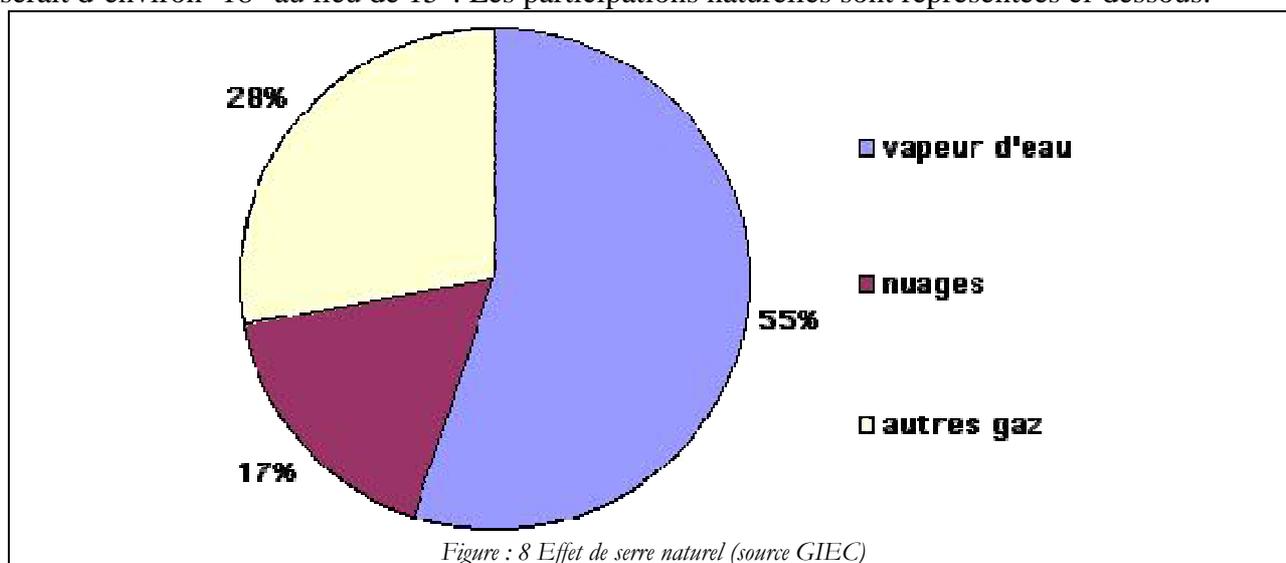
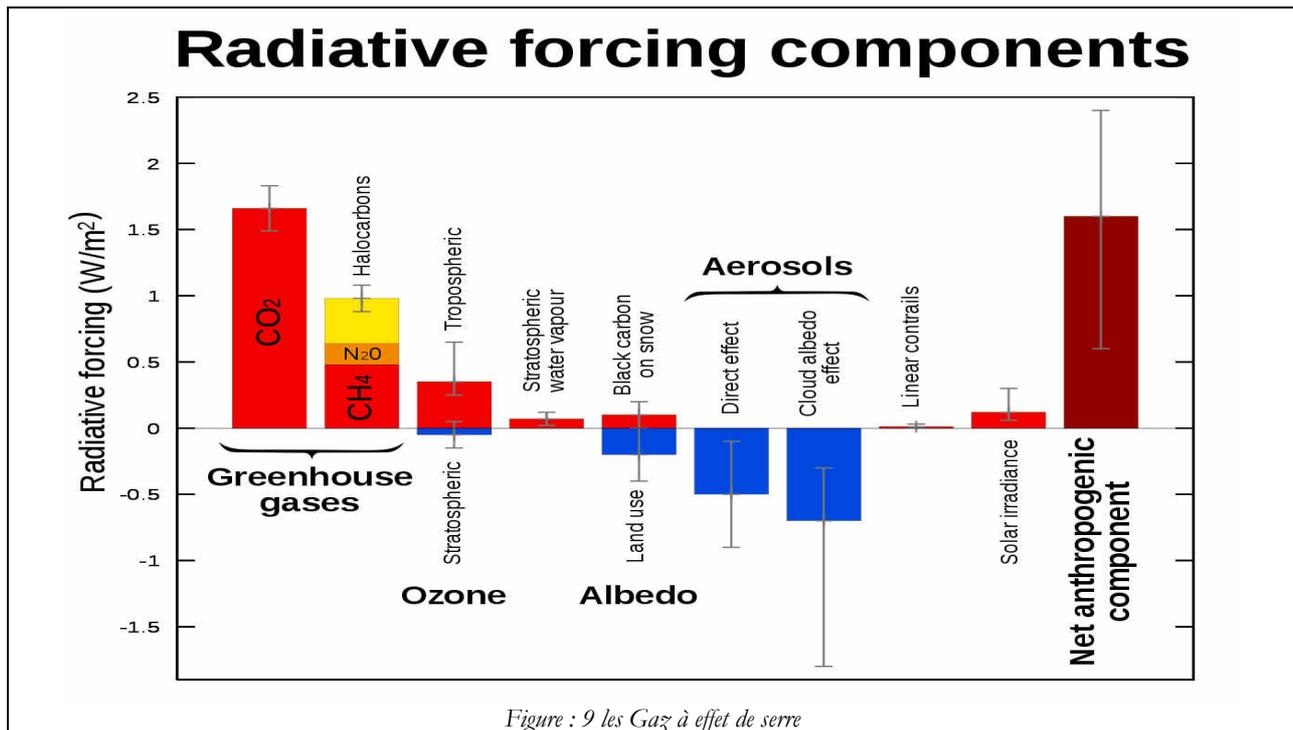


Figure : 8 Effet de serre naturel (source GIEC)

A cet effet naturel se rajoute des effets provoqués par l'homme.

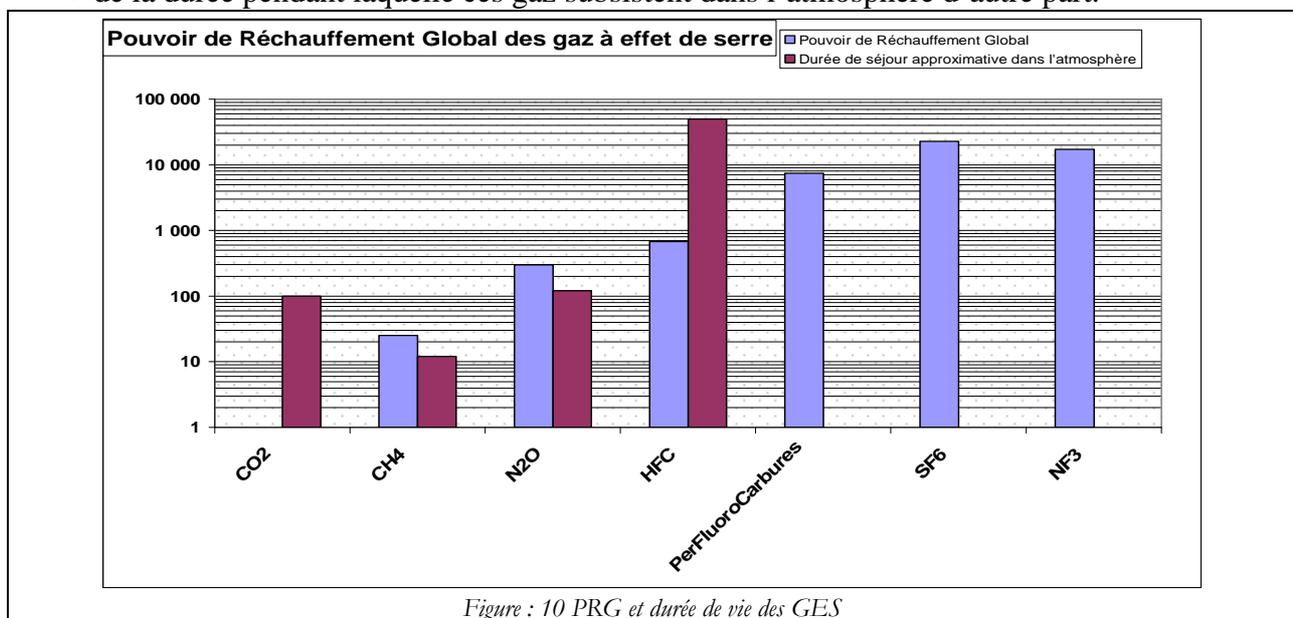


La figure 9 donne la liste des principaux gaz et aérosols présents dans l'atmosphère et qui ont un effet de serre.

Les gaz à effet de serre ayant un effet significatif sont essentiellement le dioxyde de carbone (CO₂) et quelques d'autres (méthane, protoxyde d'azote, etc.) et les frigorigènes, qui ont une présence faible, mais un effet, le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) important.

Le PRG dépend :

- ⇒ du taux de réflexion d'une part et
- ⇒ de la durée pendant laquelle ces gaz subsistent dans l'atmosphère d'autre part.



Certains, comme la vapeur d'eau ont une durée de quelques jours, d'autres comme le CO₂ une durée de centaines d'années. On exprime cette durée par la durée de vie, au bout de laquelle 50% du gaz initialement émis a disparu.

Pour réduire la hausse des températures, il faut modérer nos émissions de GES.

2. 2 Les émissions de CO2

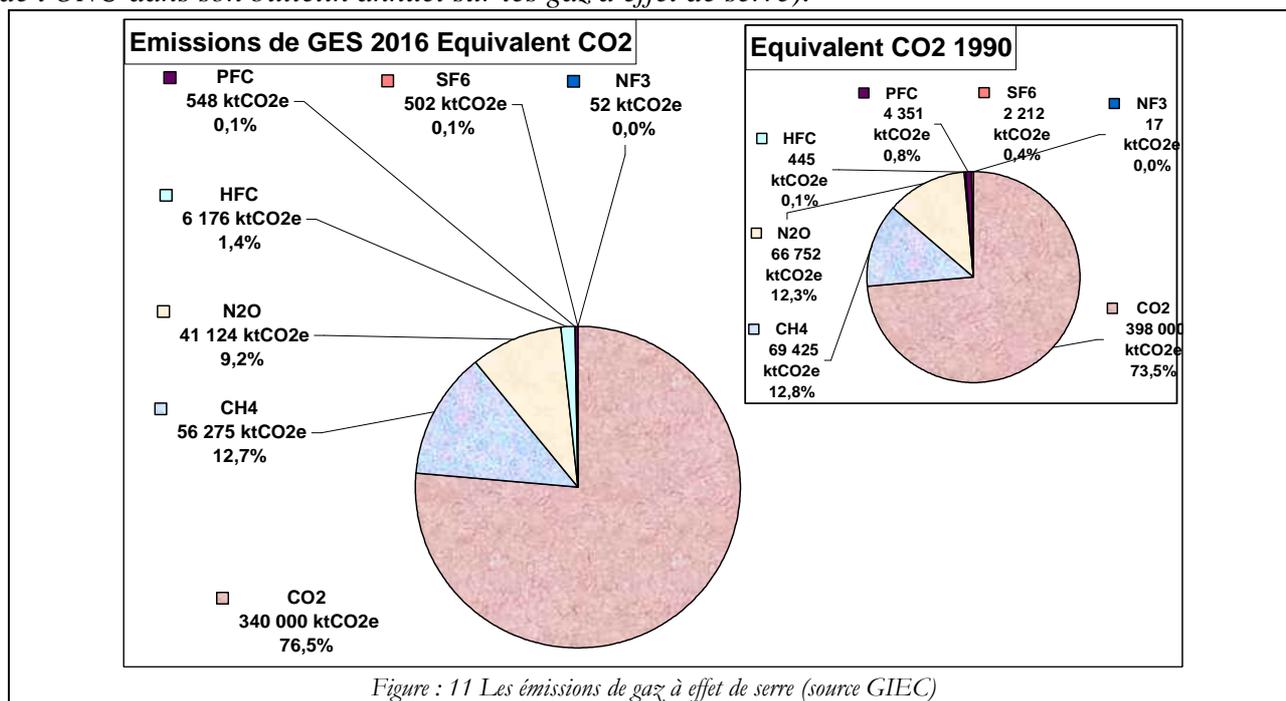
La concentration dans l'atmosphère du dioxyde de carbone (CO2), responsable du réchauffement climatique, atteint 403 ppm en 2016 (400ppm en 2015), vaut 145 % de ce qu'elle était à l'époque préindustrielle (avant 1750) : 280ppm.

Cette « montée en flèche » du niveau de CO2 est due à « la conjonction :

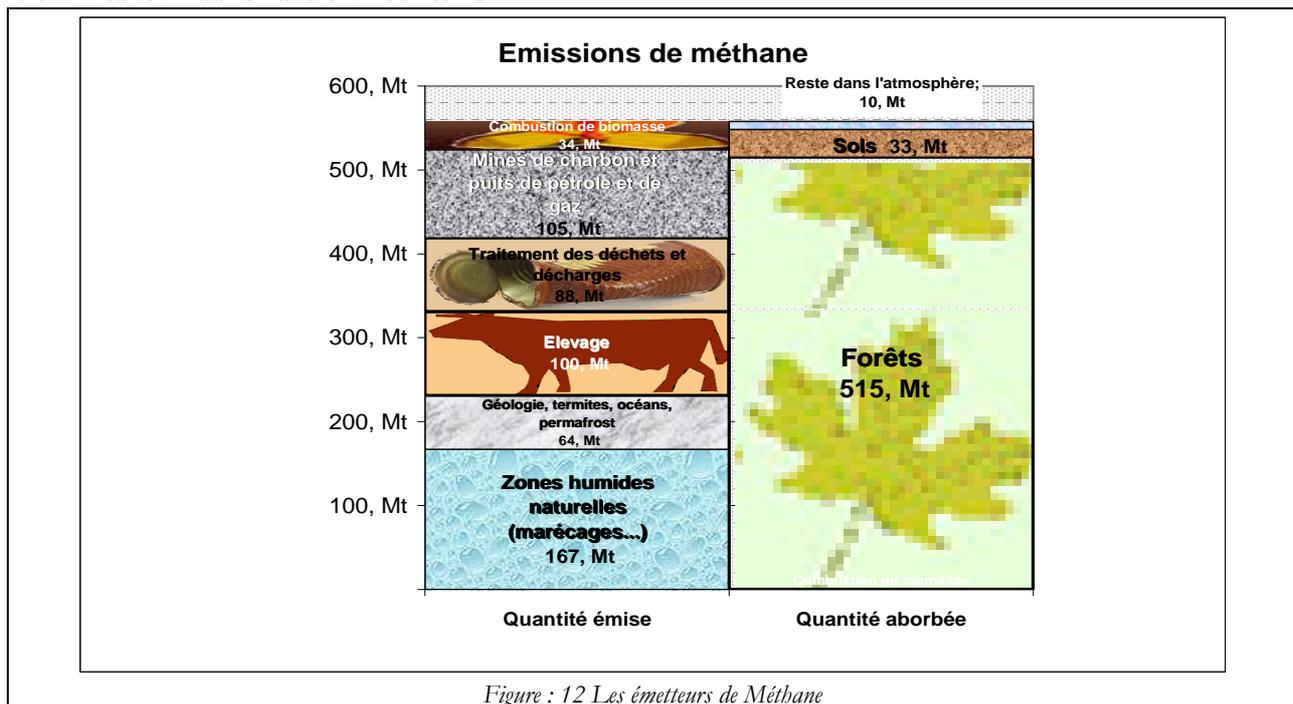
- ⇒ des activités humaines et
- ⇒ d'un puissant épisode El Niño » qui apparaît tous les 4 ou 5 ans et se traduit par une hausse de la température de l'océan Pacifique, ce qui provoque des sécheresses et de fortes précipitations.

Selon le dernier rapport de l'Organisation météorologique mondiale (OMM),

Ce niveau de CO2 avait été atteint il y a 800ka et de 3 à 5 Ma, lorsque la température était de 2 à 3°C plus élevée et le niveau de la mer était > 10 à 20m, en raison de la fonte des glaciers. (Selon l'agence de l'ONU dans son bulletin annuel sur les gaz à effet de serre).



2.3 Les émissions de méthane



Les sources naturelles créent 36% des émissions de méthane et incluent notamment :

- ⇒ les zones marécageuses,
- ⇒ les termites et
- ⇒ les océans.

Les sources humaines créent 64% des émissions. Ce sont :

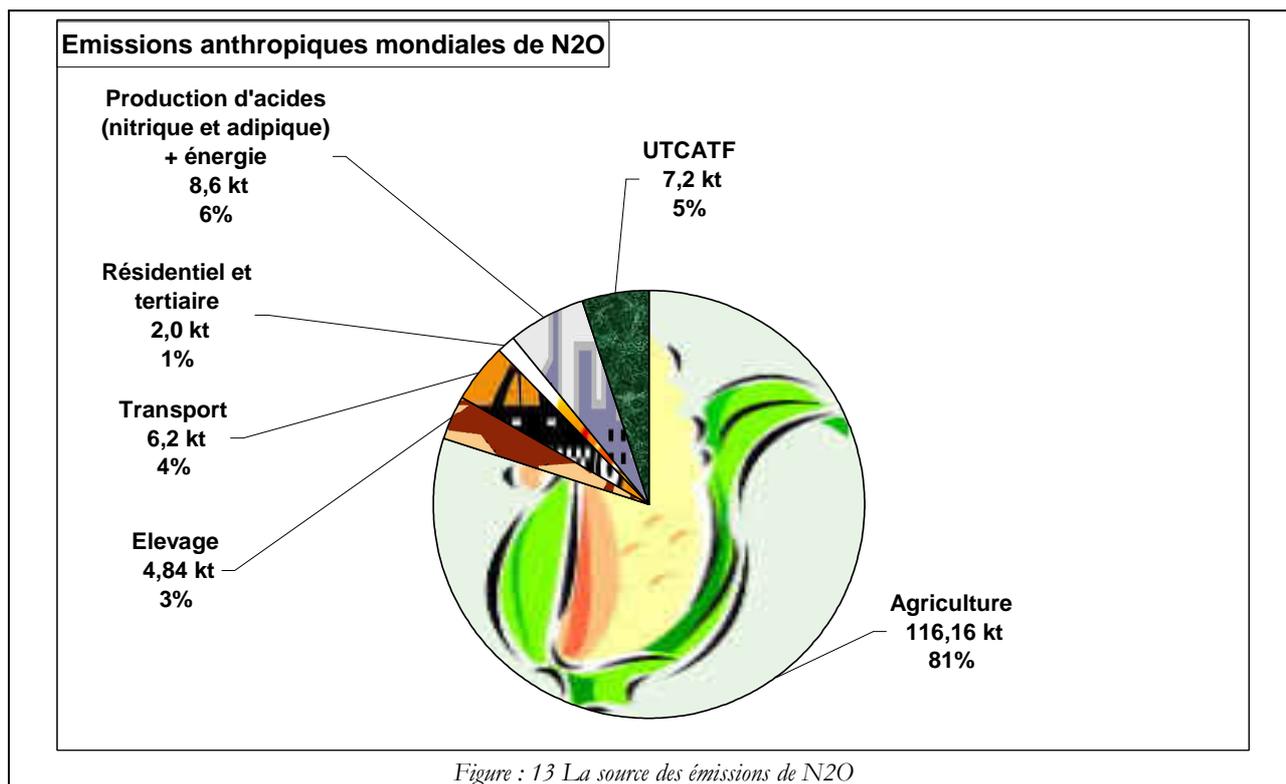
- ⇒ les décharges,
- ⇒ l'élevage qui compte pour 20% ainsi que
- ⇒ la production, le transport et l'utilisation des énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz).

Au cours des 800 000 dernières années, les concentrations en méthane ont varié entre 400 et 700 ppb. Depuis la Révolution Industrielle, les niveaux de méthane ont augmenté dans un rapport 2,5. Un risque majeur serait l'emballement de la fonte des quantités importantes de méthane contenues dans le permafrost.

Cependant, le méthane est réabsorbé, notamment par les végétaux. Cependant 2% environ est réabsorbé par l'atmosphère. Comme sa durée de vie est limitée à 10ans, les mesures adoptées porteront rapidement leurs effets.

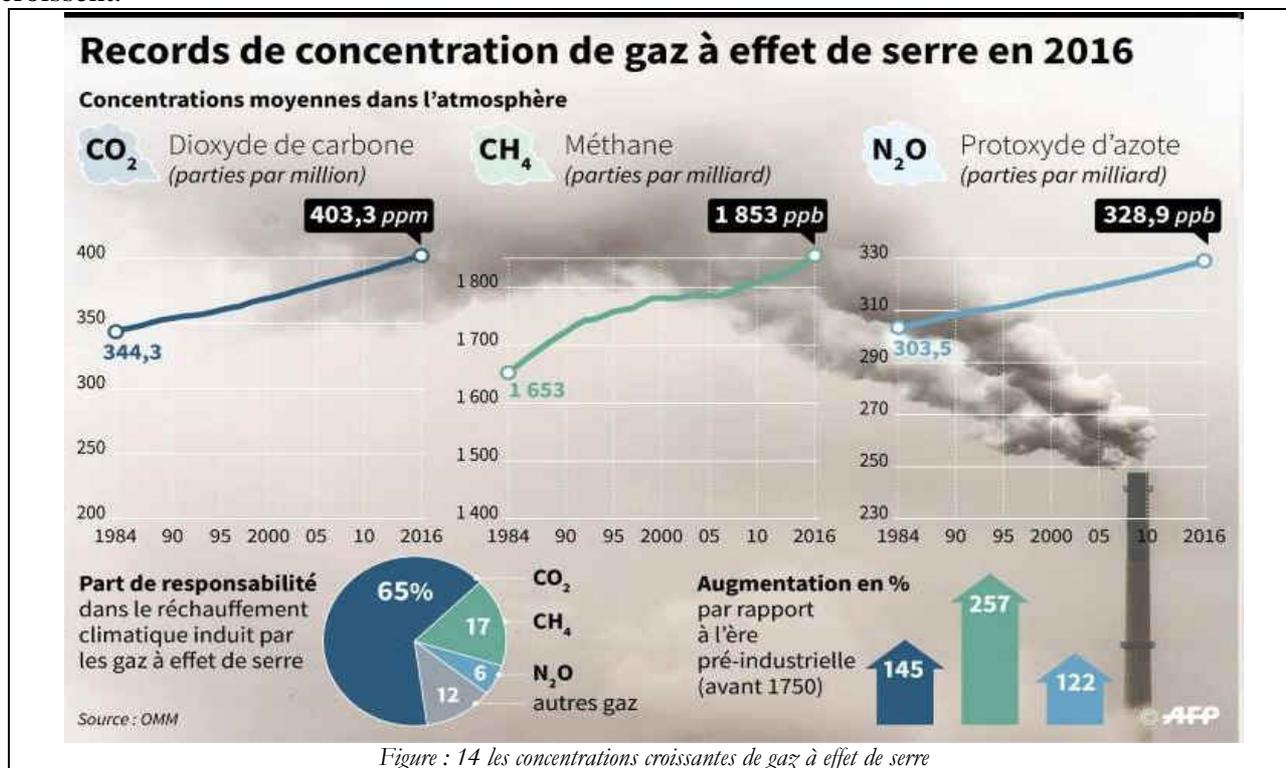
2.4 Les émissions de Protoxyde d'azote

Le protoxyde d'azote est essentiellement émis par l'agriculture. Plus d'un tiers du N₂O de l'atmosphère provient de l'épandage de lisier et d'engrais azotés.



2.5 Évolution des concentrations de G.E.S.

Même si les émissions ont tendance à baisser, à cause de la durée d'accumulation, les concentrations croissent.



3 Les émissions de CO₂

Le CO₂ est émis par la combustion pour obtenir de la chaleur ou de l'électricité.

3.1 Les émissions de CO₂ par l'électricité

Le taux de CO₂ émis dépend du combustible.

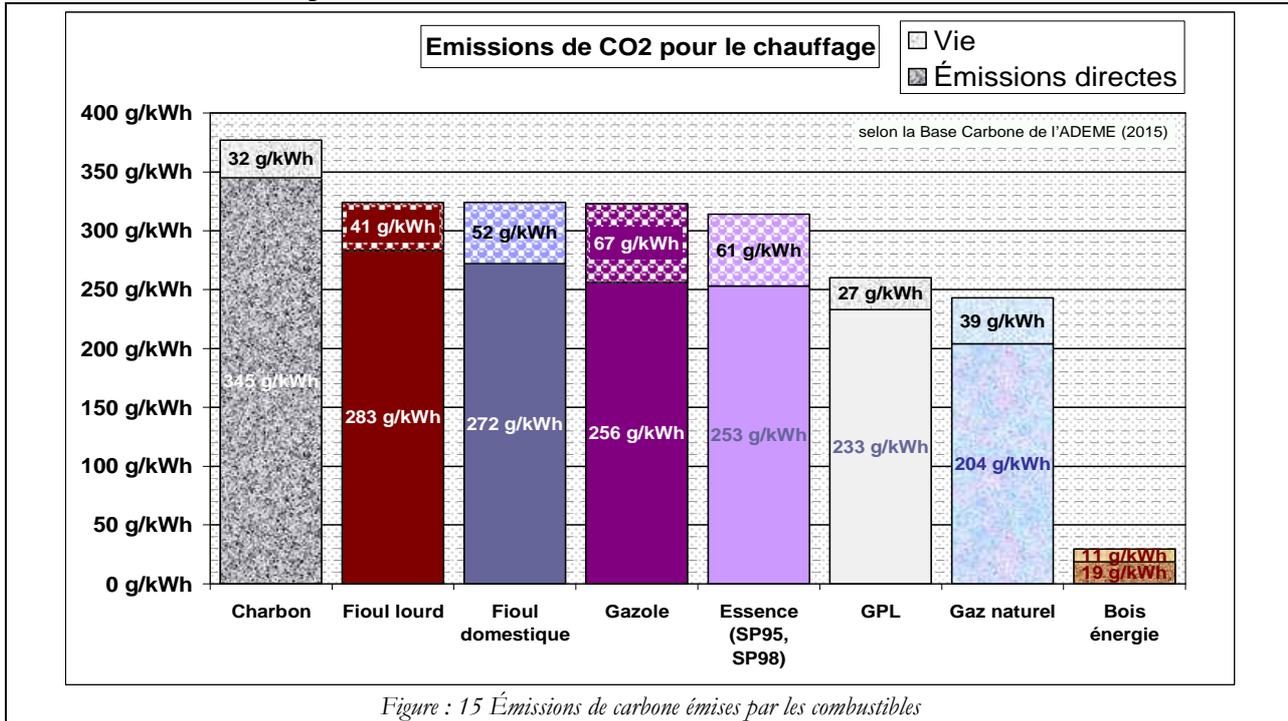


Figure : 15 Émissions de carbone émises par les combustibles

Pour la fabrication d'électricité, les quantités émises par kWh sont fonction du rendement des centrales.

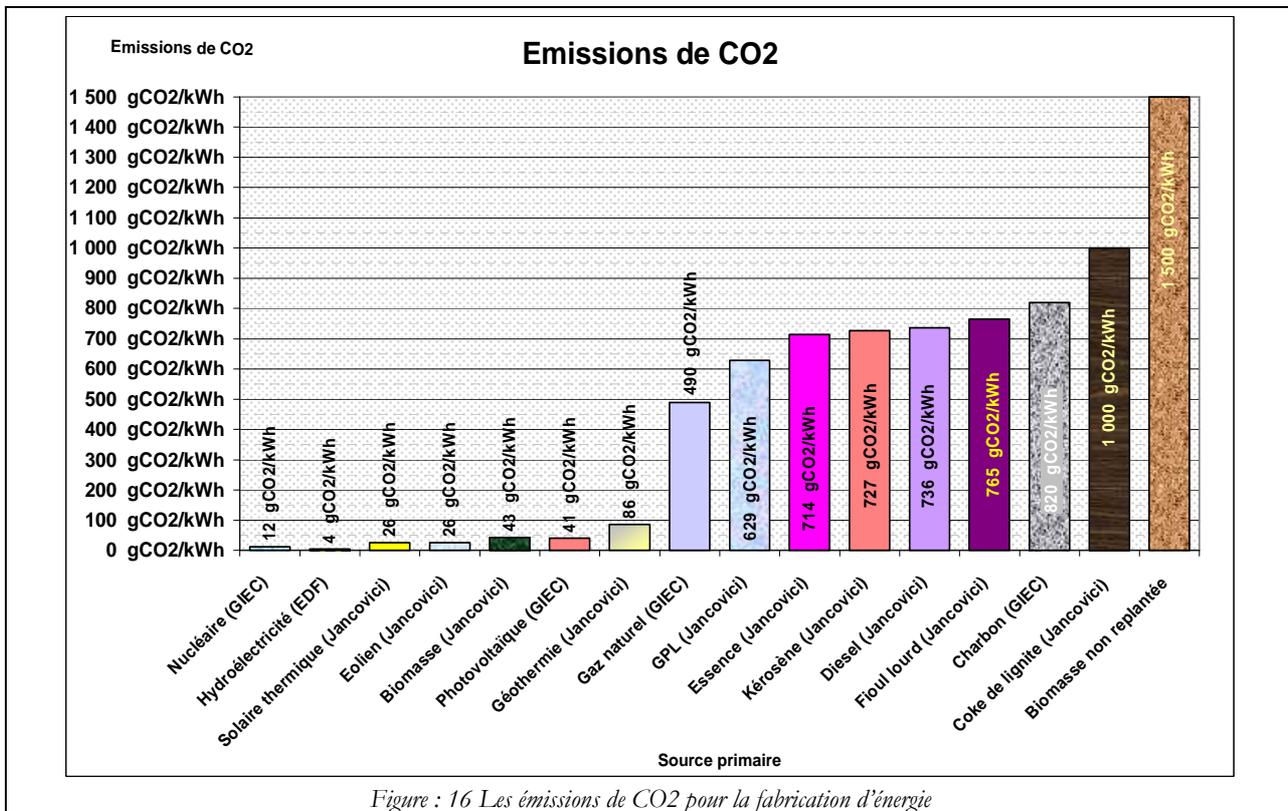
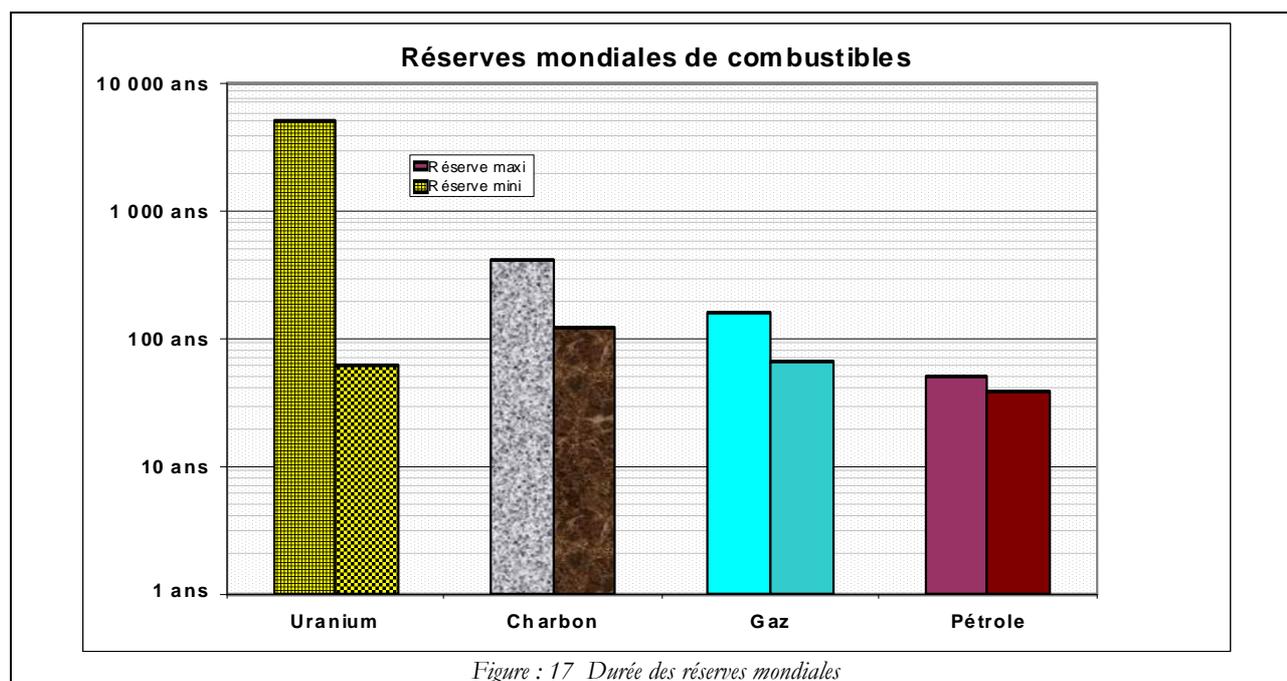


Figure : 16 Les émissions de CO₂ pour la fabrication d'énergie

Cependant, ces émissions cesseront un jour, à cause de l'épuisement d'une partie des combustibles. Le diagramme de la figure 17 indique les délais d'épuisement des diverses familles de combustibles. Ce sera très bien pour faire cesser l'accroissement de la température. Ce sera néanmoins une catastrophe pour notre civilisation, si nous n'avons pas trouvé de solution de rechange. Il est grandement temps de s'en occuper.



Concernant l'uranium, il faut distinguer 2 scénarios. Le plutonium et plus généralement certains actinides (Curium...) peuvent être considérés soit comme un déchet, soit comme un nouveau combustible fissile à utiliser. Le plutonium (^{239}Pu) est obtenu par la transmutation d'un atome d'uranium 238 (^{238}U) par captage d'un neutron supplémentaire dans les réacteurs à neutrons refroidis par eau. Le plutonium, mélangé à 91,5% d'uranium appauvri (^{238}U) ou recyclé constitue un excellent combustible, le MOx, utilisé à 30% dans 22 des réacteurs REP français et à 100% dans les EPR. L'uranium appauvri du mélange se transmutant lui-même en ^{239}Pu prolonge la radioactivité du mélange. Dans réacteurs à neutron lents, la réutilisation cesse lorsque le taux d'actinides non fissiles augmente. Pour utiliser le plutonium complètement, il convient d'utiliser des réacteurs à neutrons rapides comme le Super-Phoenix de Cray-Malville ou le futur ASTRID.

3.2 Les niveaux d'émissions de CO₂

Analysons les émissions au niveau Mondial, Européen, Français, Rhône Alpin, Métropolitain.

3.2.1. Les émissions mondiales de CO₂

La figure 18 montre les émissions mondiales de CO₂.

L'Union européenne pèse seulement 10% dans ces émissions. Ces émissions n'ont cessé de croître depuis le début de l'ère industrielle. Cette augmentation a cessé actuellement en Europe, mais est maintenant due aux pays émergents.

Or cette augmentation n'est plus suffisamment absorbée par les océans et donc s'accumule dans l'atmosphère et ne s'élimine que très lentement. Même si ces émissions cessent, leur taux va se stabiliser à un niveau plus ou moins haut, selon la somme des quantités qui aura été émises. Divers scénarios ont été étudiés par le GIEC.

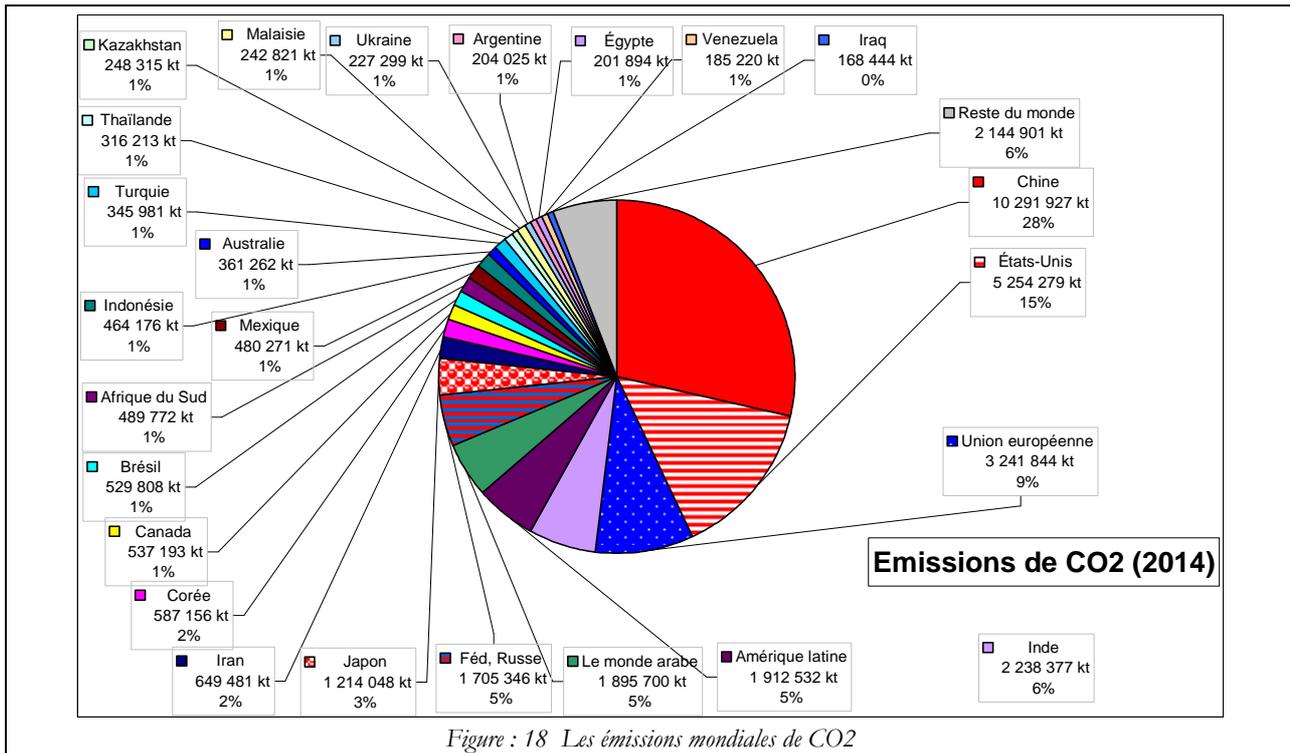


Figure : 18 Les émissions mondiales de CO2

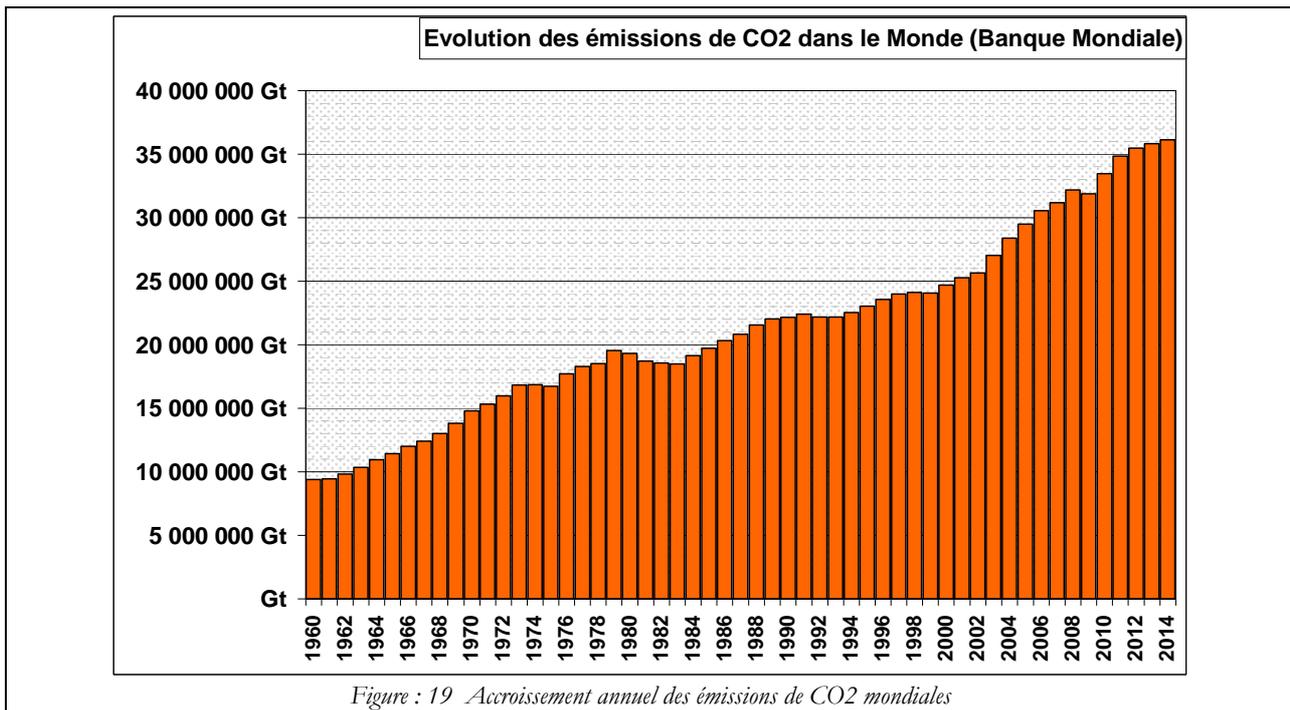
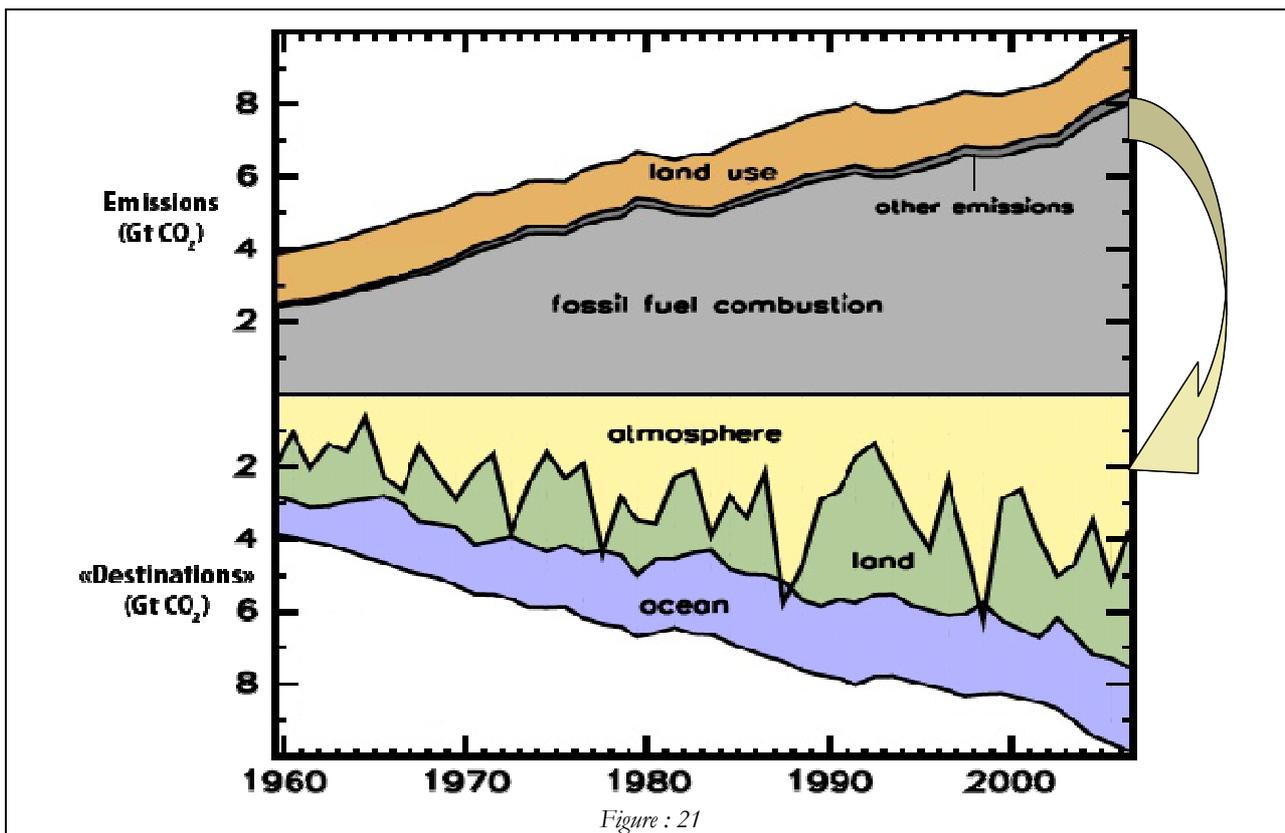
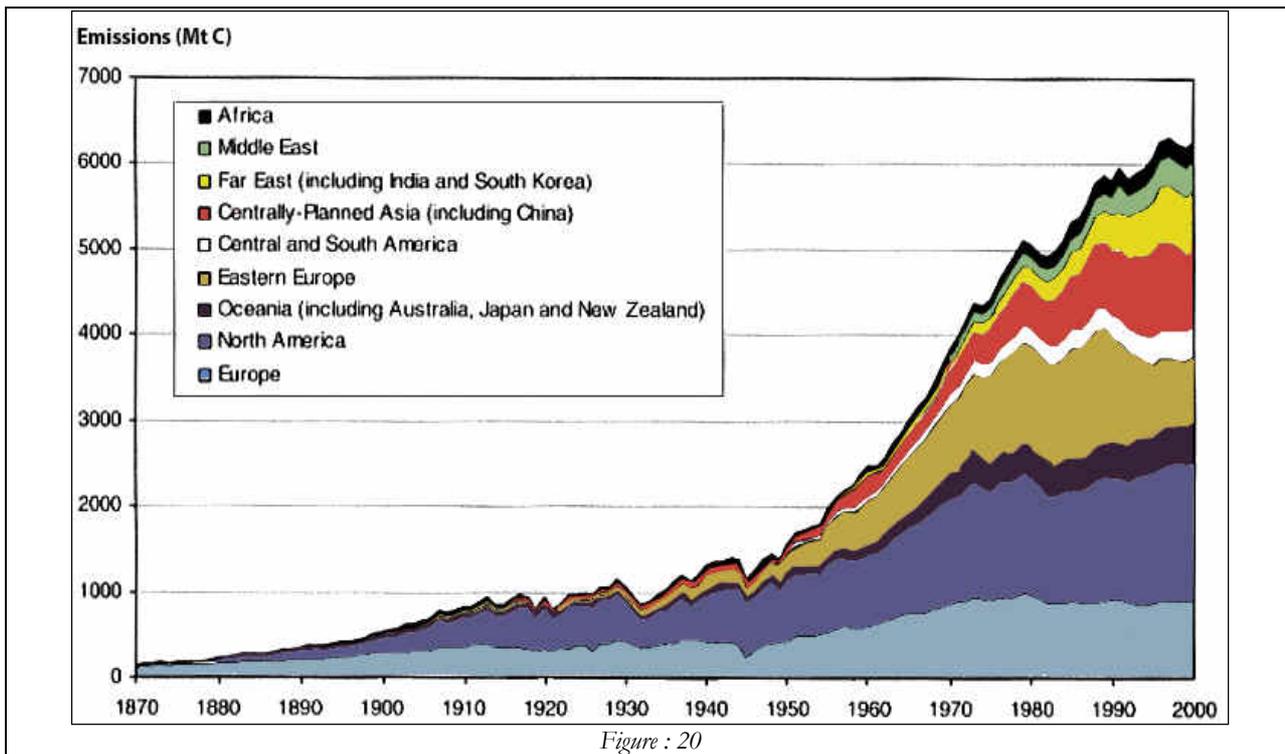


Figure : 19 Accroissement annuel des émissions de CO2 mondiales



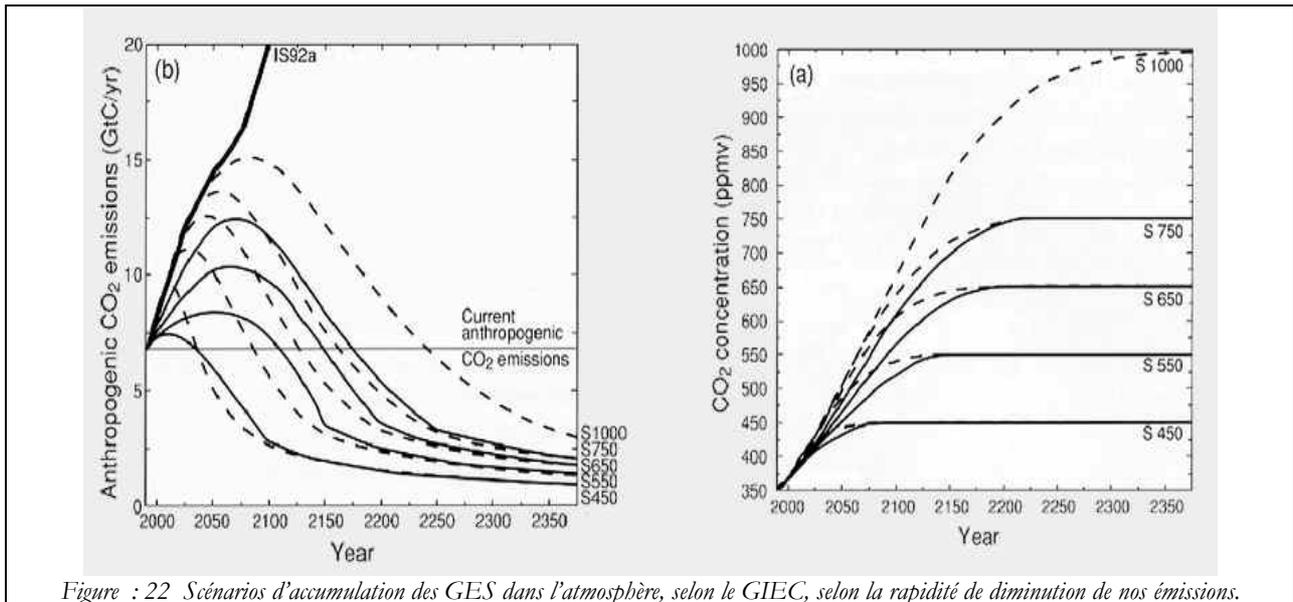


Figure : 22 Scénarios d'accumulation des GES dans l'atmosphère, selon le GIEC, selon la rapidité de diminution de nos émissions.

La figure suivante montre les émissions par habitant d'un certain nombre de pays en 2007 comparativement à 1990. Peu de pays ont baissé leurs émissions, comme l'ont fait la Suède, la Suisse et la France. Ces émissions sont très disparates. Elles dépendent du niveau de vie des pays, mais aussi des sources d'énergies qu'ils utilisent (hydraulique, nucléaire essentiellement).

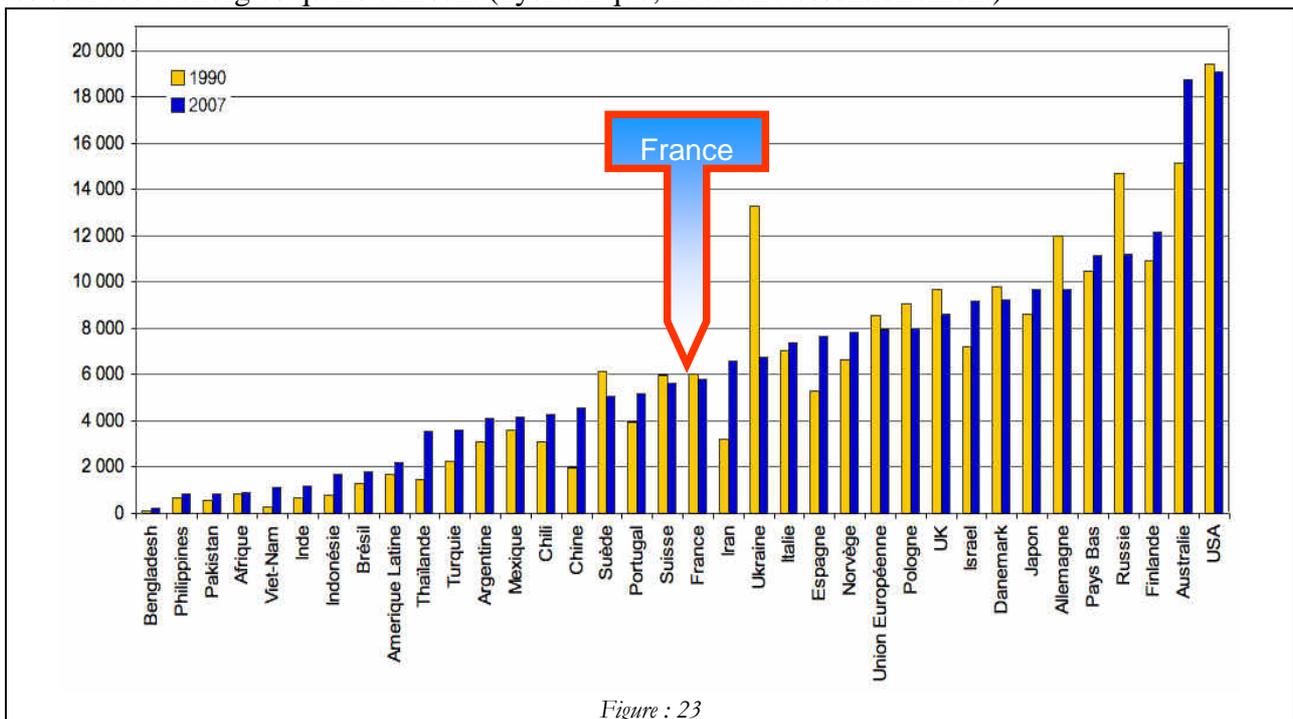


Figure : 23

Les activités qui émettent des gaz à effet de serre sont synthétisées par le diagramme suivant.

On note la part non négligeable des transports internationaux qui ne sont pas comptés dans les émissions nationales.

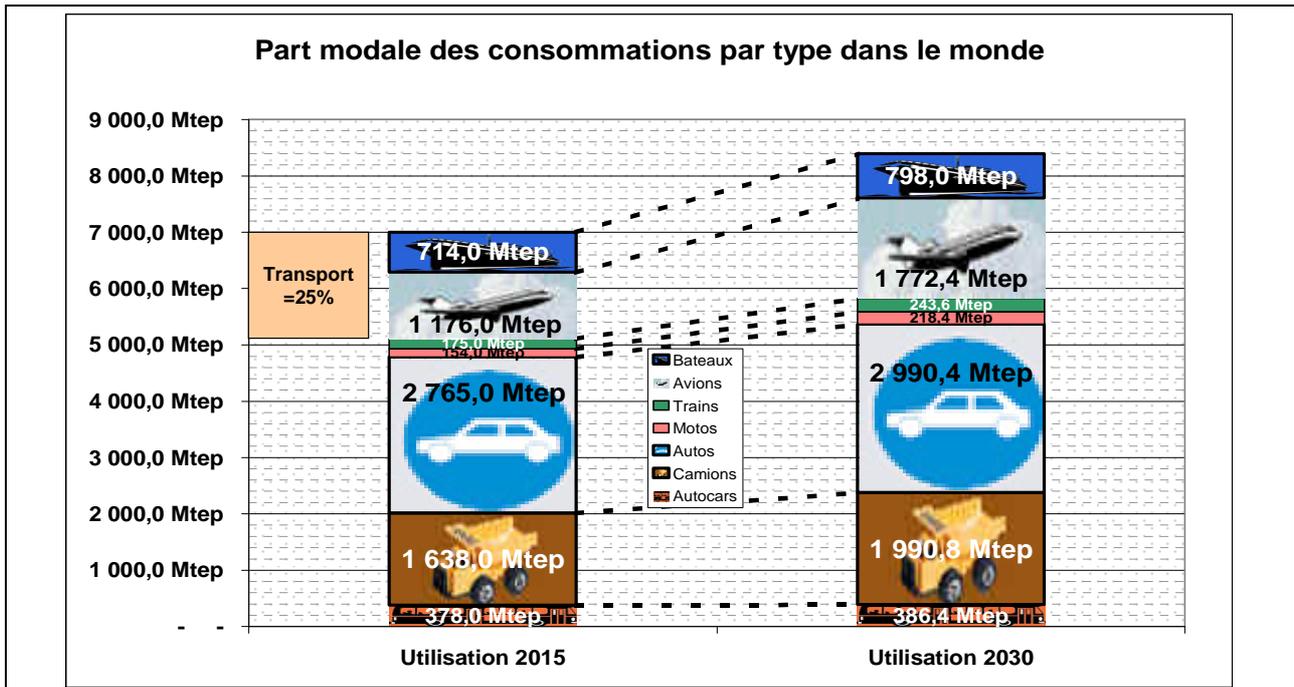


Figure : 24 Les secteurs émetteurs

Les transports internationaux représentent environ un quart des émissions des transports.

3. 2. 2. Les émissions européennes de CO₂

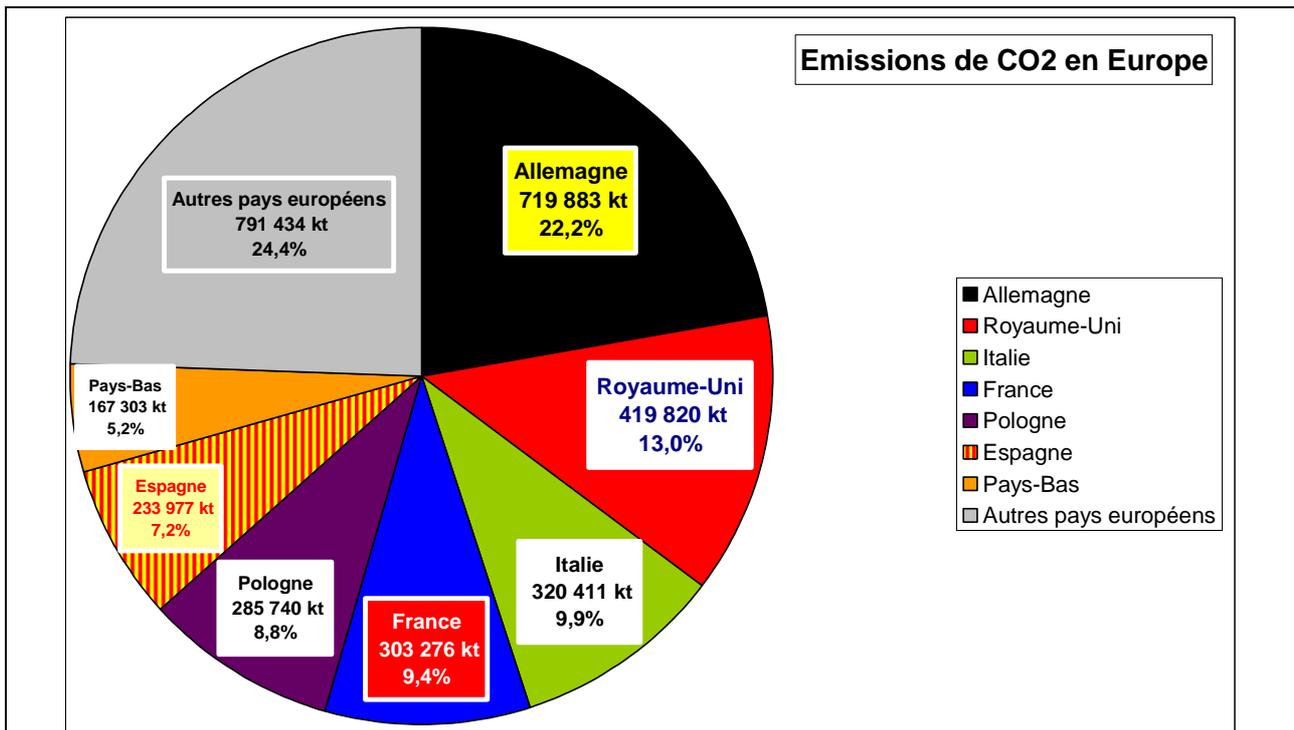


Figure : 25 Les émissions européennes de CO₂

Les émissions de la France ne représentent que 10% des émissions de l'Europe.

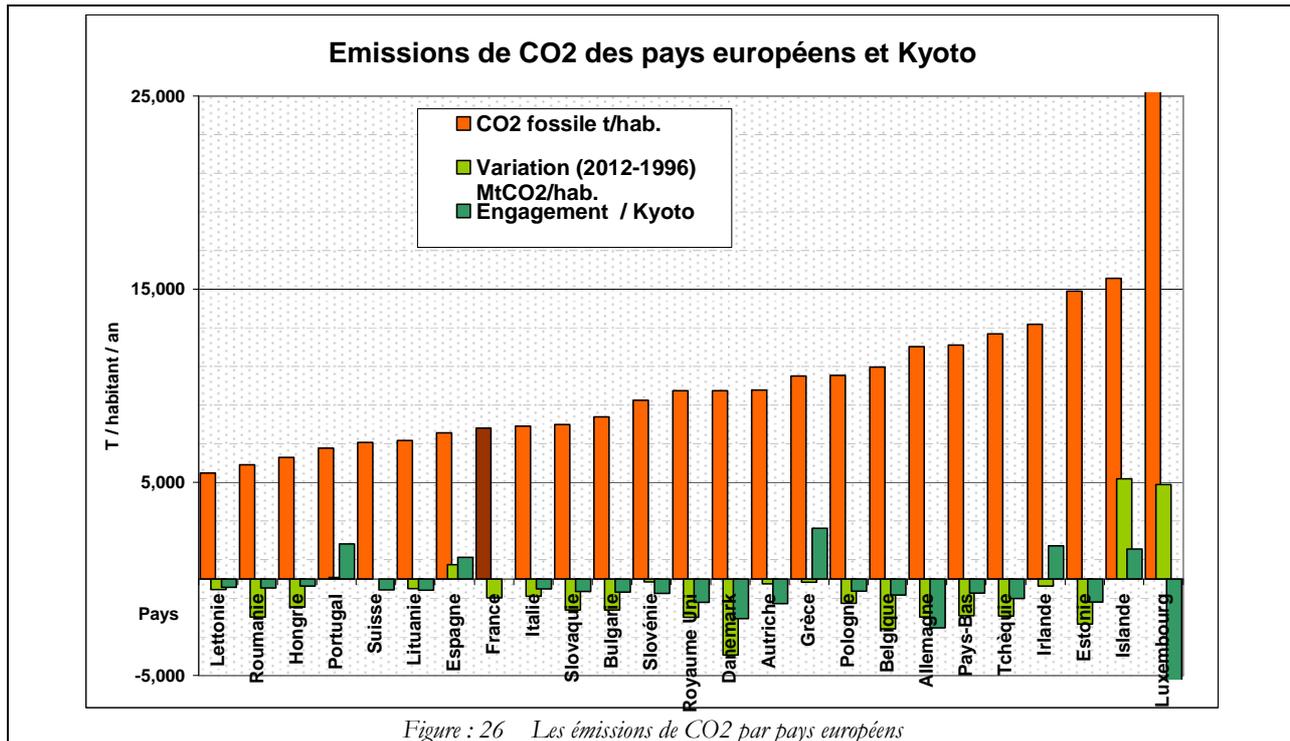


Figure : 26 Les émissions de CO2 par pays européens

Les différences de niveau d'émission s'expliquent par les écarts de niveau de vie entre les pays, de l'ENTSO¹ et aussi beaucoup par la source primaire pour produire de l'énergie électrique.

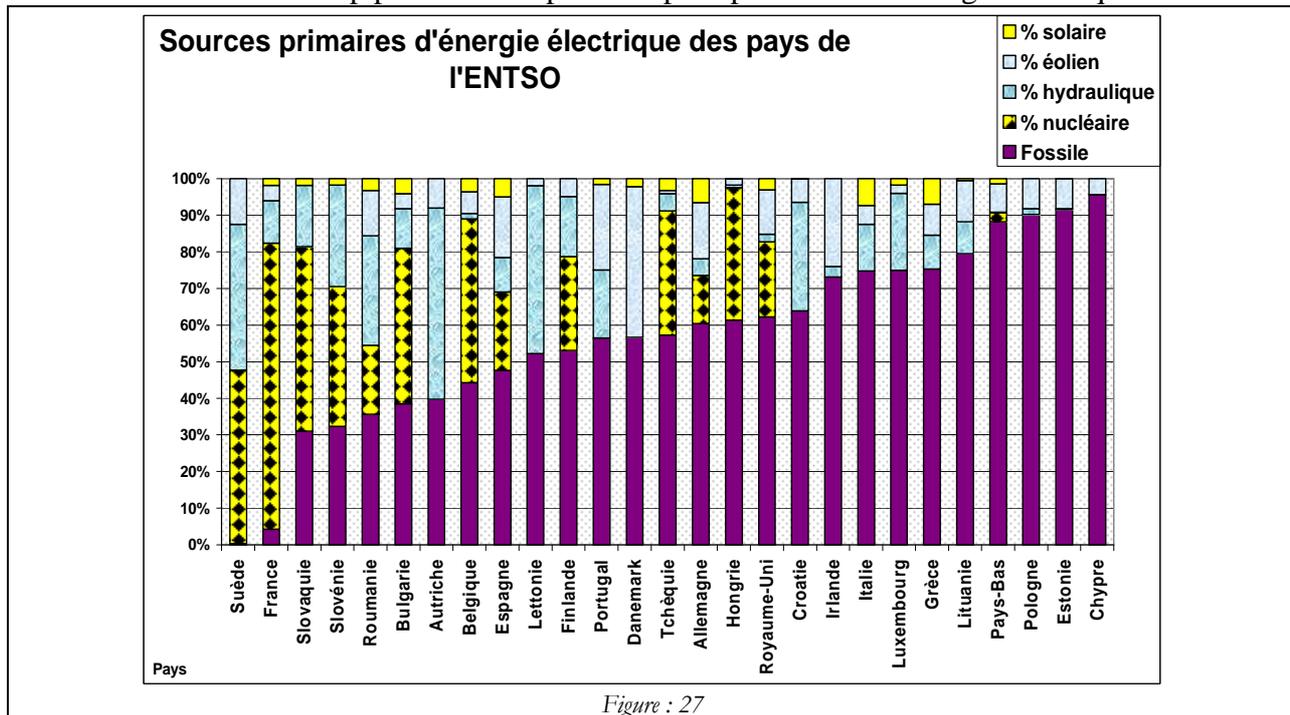


Figure : 27

La France et la Suède utilisent des sources primaires d'énergie très peu émettrices de CO₂.

¹ENTSO : association représentant 41 gestionnaires de réseau de transport d'électricité de 34 pays à travers l'Europe, dépassant ainsi les frontières de l'Union européenne.

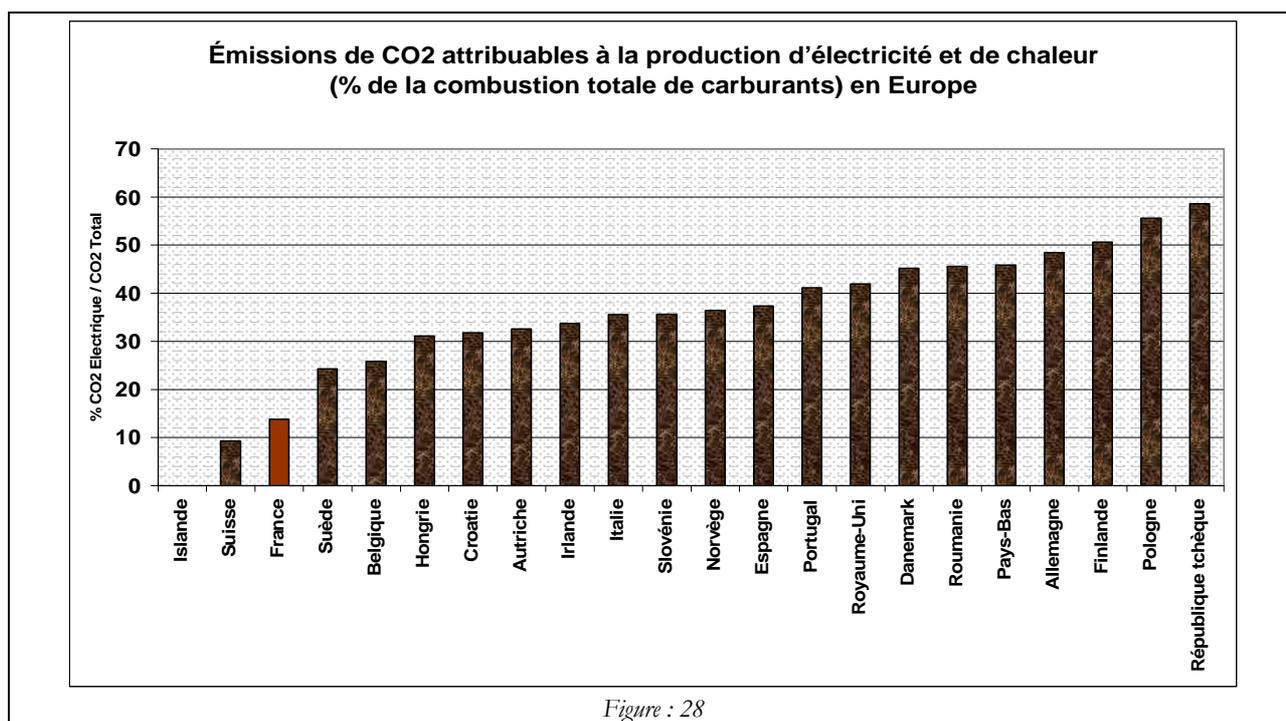


Figure : 28

La comparaison des émissions de CO2 attribuables à la production d'électricité et de chaleur montre en effet que La France fait partie avec la Suisse des pays les plus vertueux.

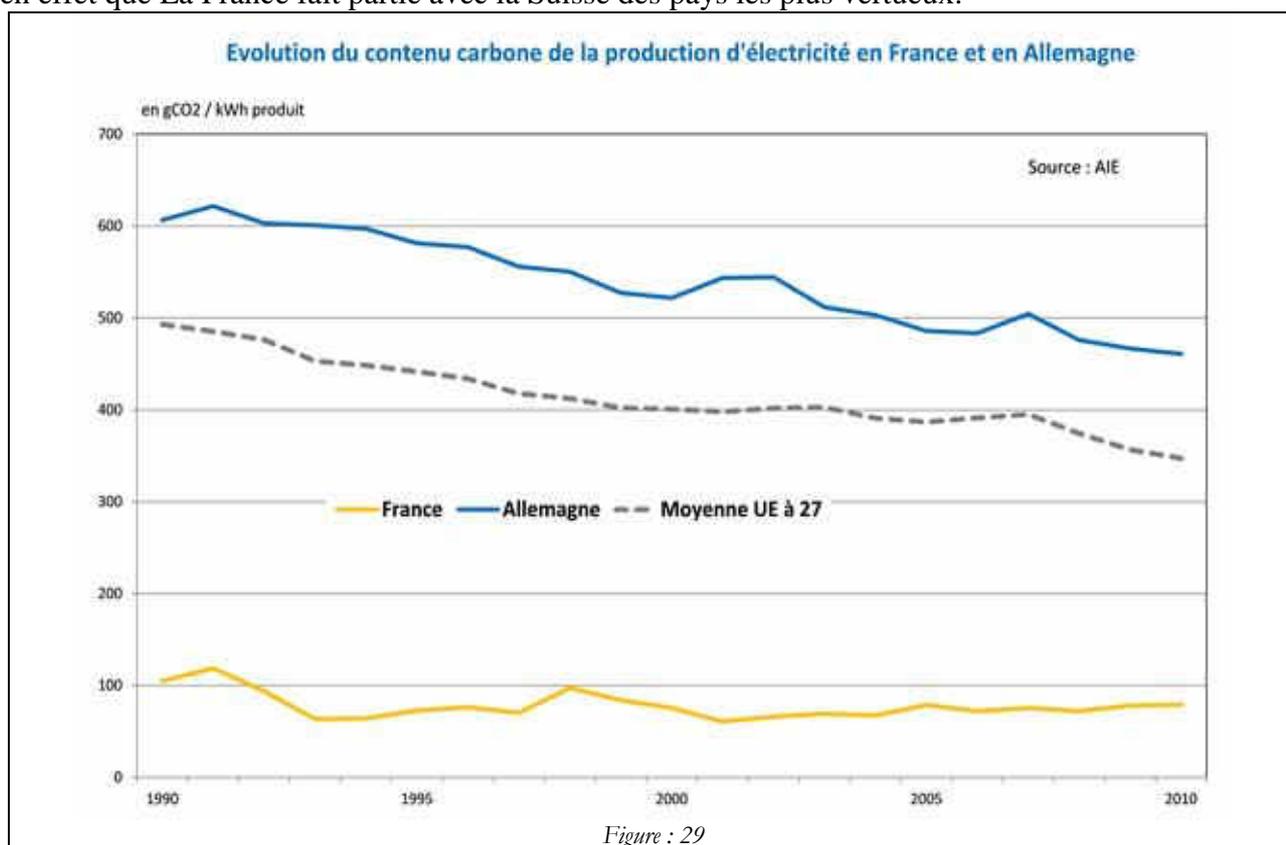


Figure : 29

La comparaison des contenus carbone de la production électrique entre la France et l'Allemagne et aussi la moyenne de l'Europe illustre bien cette différence.

3. 2. 3. Les émissions de CO₂ en France

Depuis 1990, les émissions de CO₂ en France, comme en Europe, ont diminué respectivement de 10% et 20%. C'est naturellement mieux que l'accroissement des émissions mondiales, mais tout à fait insuffisant.

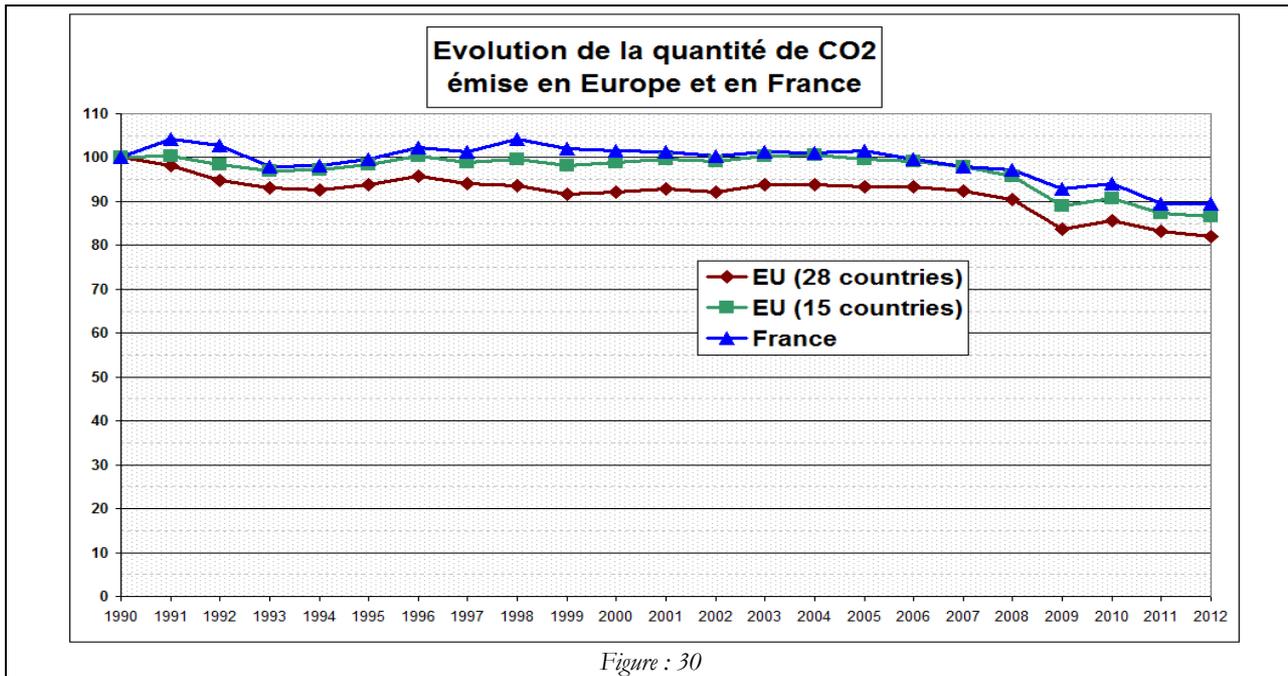


Figure : 30

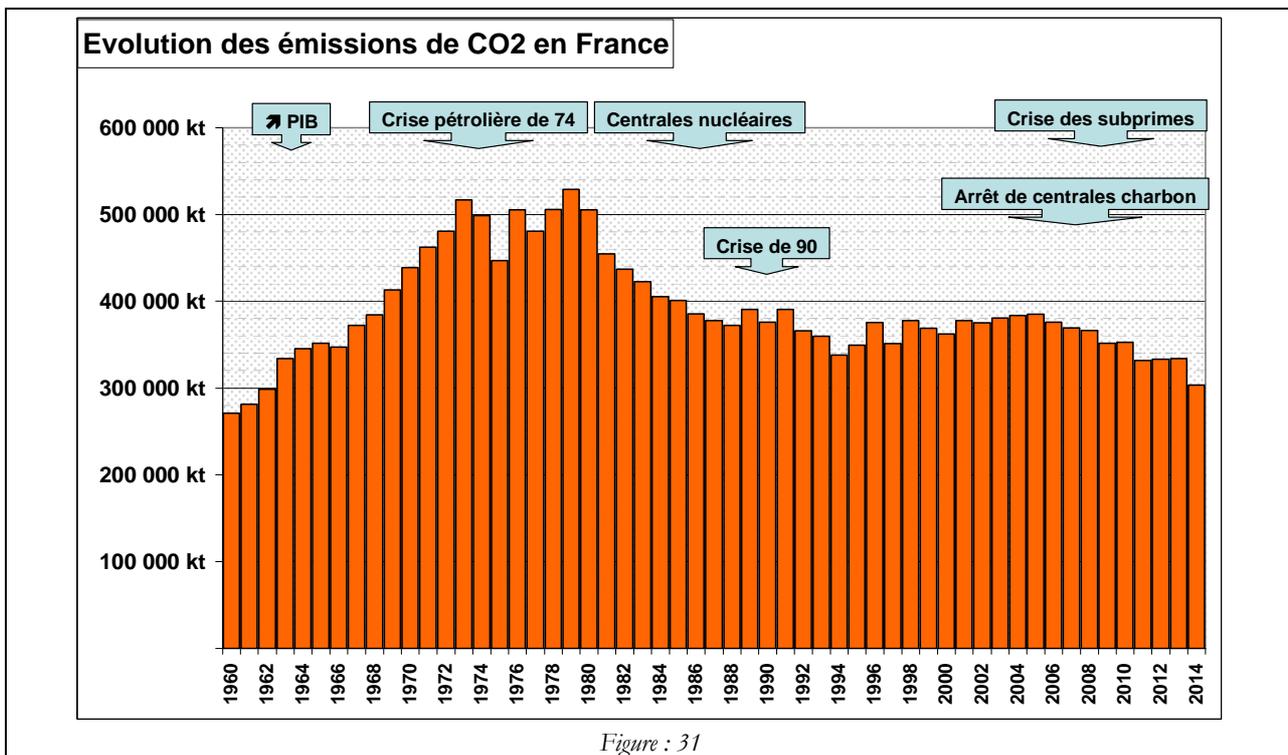


Figure : 31

Le diagramme de la figure 31 montre que la diminution a été importante surtout de 1979 à 1994, lors du remplacement des centrales thermiques par des centrales nucléaires, puis a repris son accroissement, avec le développement des transports routiers. La baisse a repris avec la diminution de la consommation par km des véhicules, la crise des « subprimes » et l'arrêt en 2014 de quelques centrales à charbon.

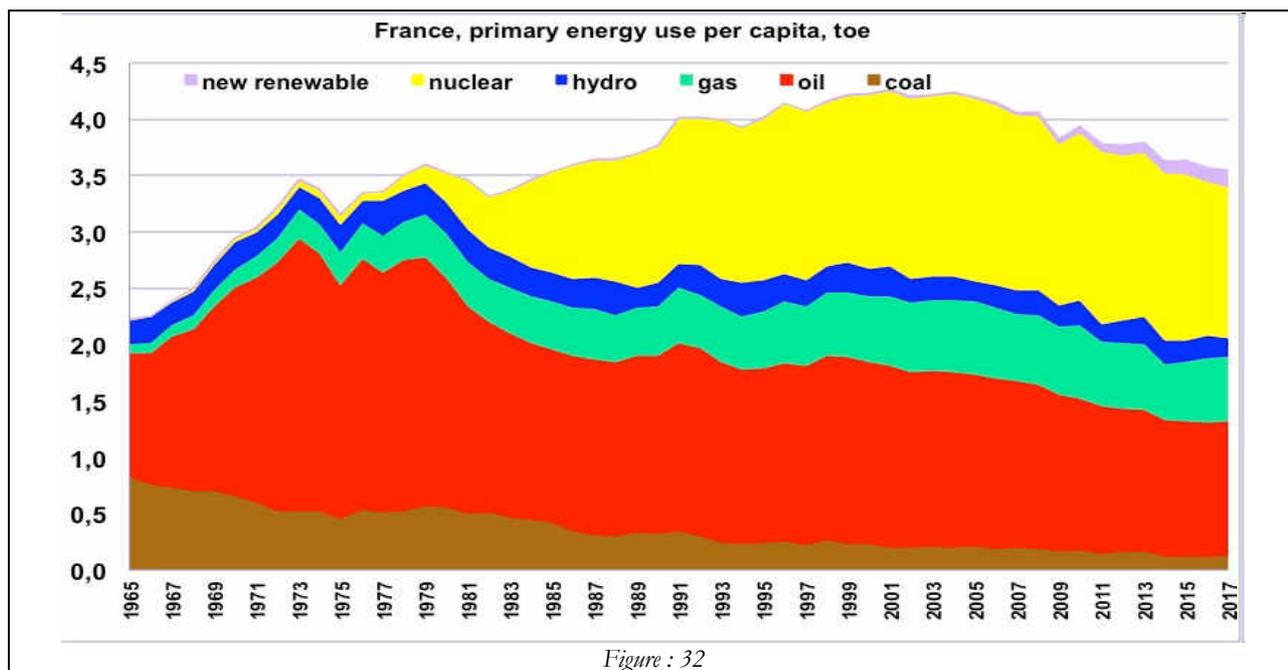


Figure : 32

La diminution des émissions de CO2 a été possible grâce à l'accroissement de l'utilisation de l'énergie nucléaire. Cependant, depuis 2001, la consommation énergétique est en diminution, (de 20% par décennie) grâce à l'augmentation de l'efficacité énergétique.

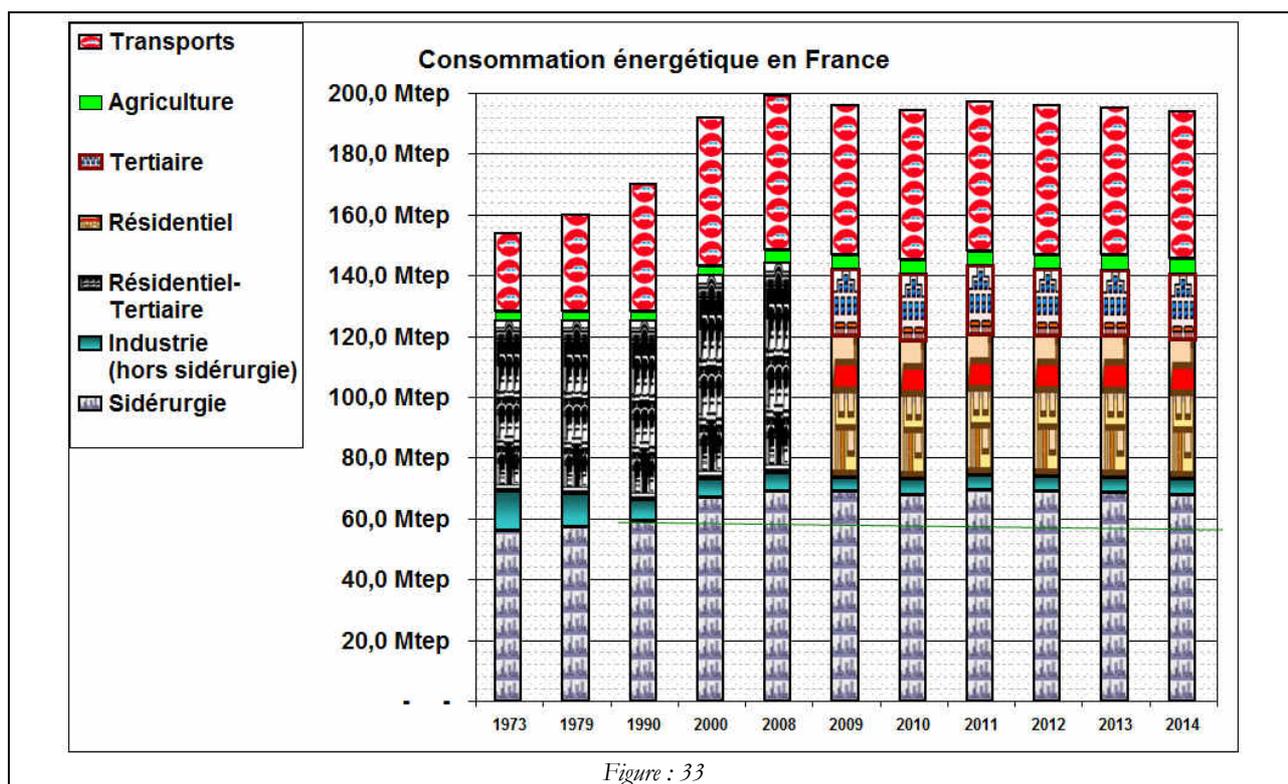
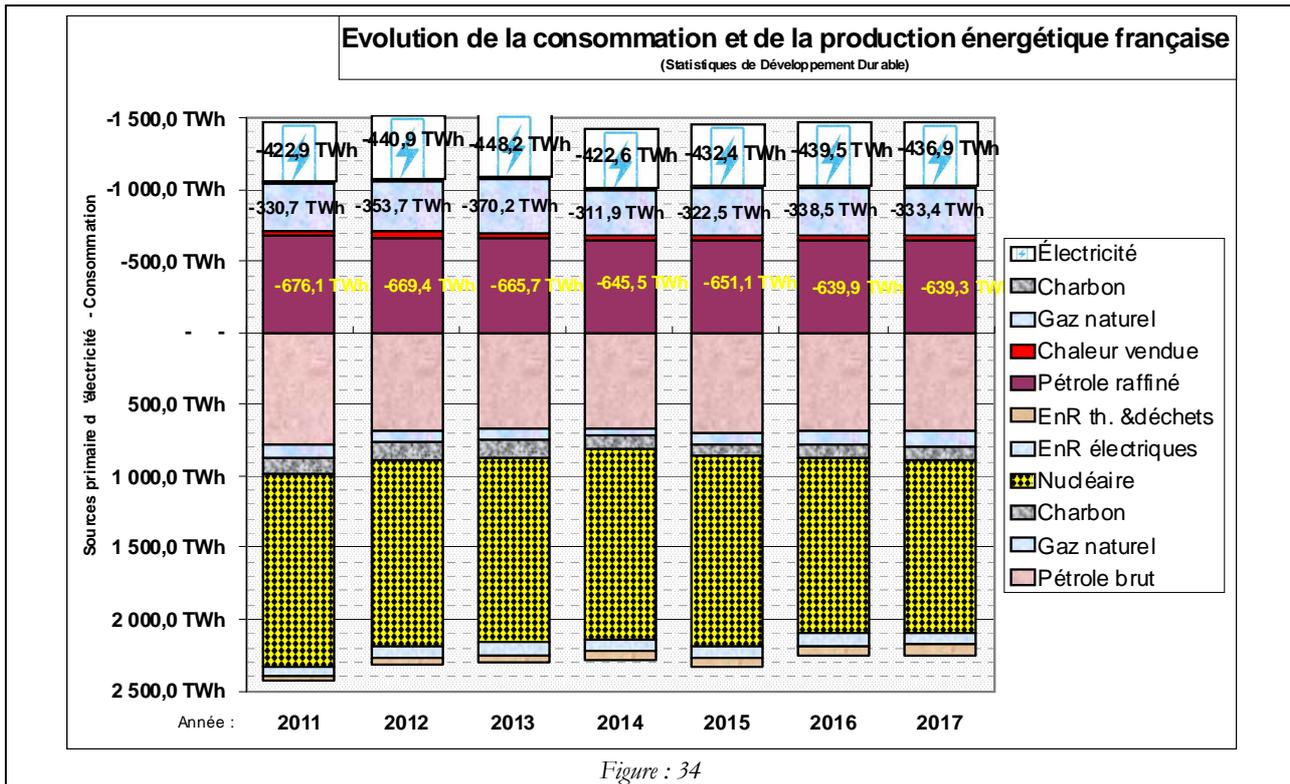


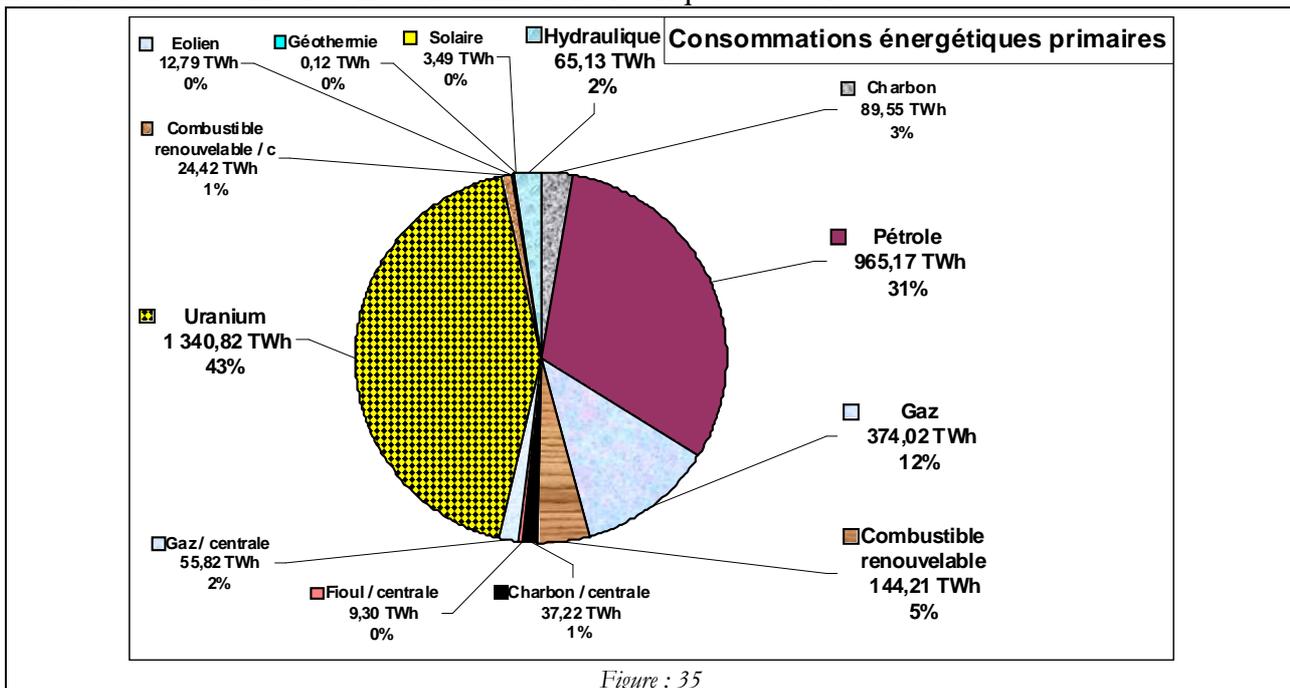
Figure : 33

L'évolution de la consommation énergétique en France montre que la diminution est due essentiellement à la diminution de la consommation industrielle parallèlement, d'ailleurs, avec la diminution de l'implantation industrielle.



Ce diagramme présente (vers le bas) l'énergie générée par la consommation de sources primaires et (vers le haut) l'énergie disponible à la consommation de sources secondaires. Cependant, l'énergie électrique secondaire (obtenue à partir de sources primaires, avec un rendement de l'ordre de 30%) est transformable en énergie mécanique, avec un rendement excellent, alors que les carburants ne génèrent de l'énergie mécanique qu'avec un très mauvais rendement.

La diminution des énergies secondaires ne concerne guère que les produits pétroliers utilisés comme carburant. Le diagramme d'évolution de la consommation énergétique montre une faible diminution : (moins de 10% en 7 ans). Cette diminution s'expliquant certainement par les progrès dans la motorisation des véhicules. La consommation électrique est stable.



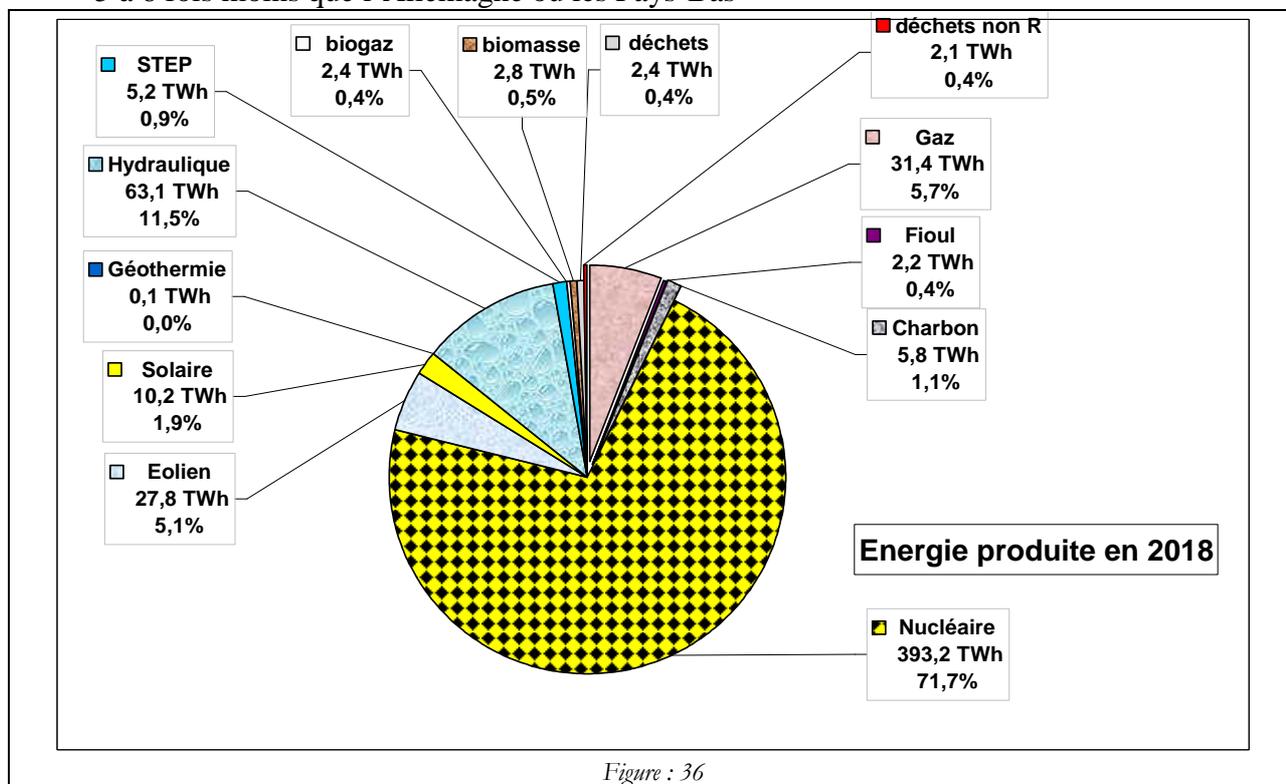
L'uranium est en France la source essentielle d'énergie, convertie en électricité.

L'utilisation de sources d'énergies renouvelables reste faible (4%), à cause de leur caractère intermittent.

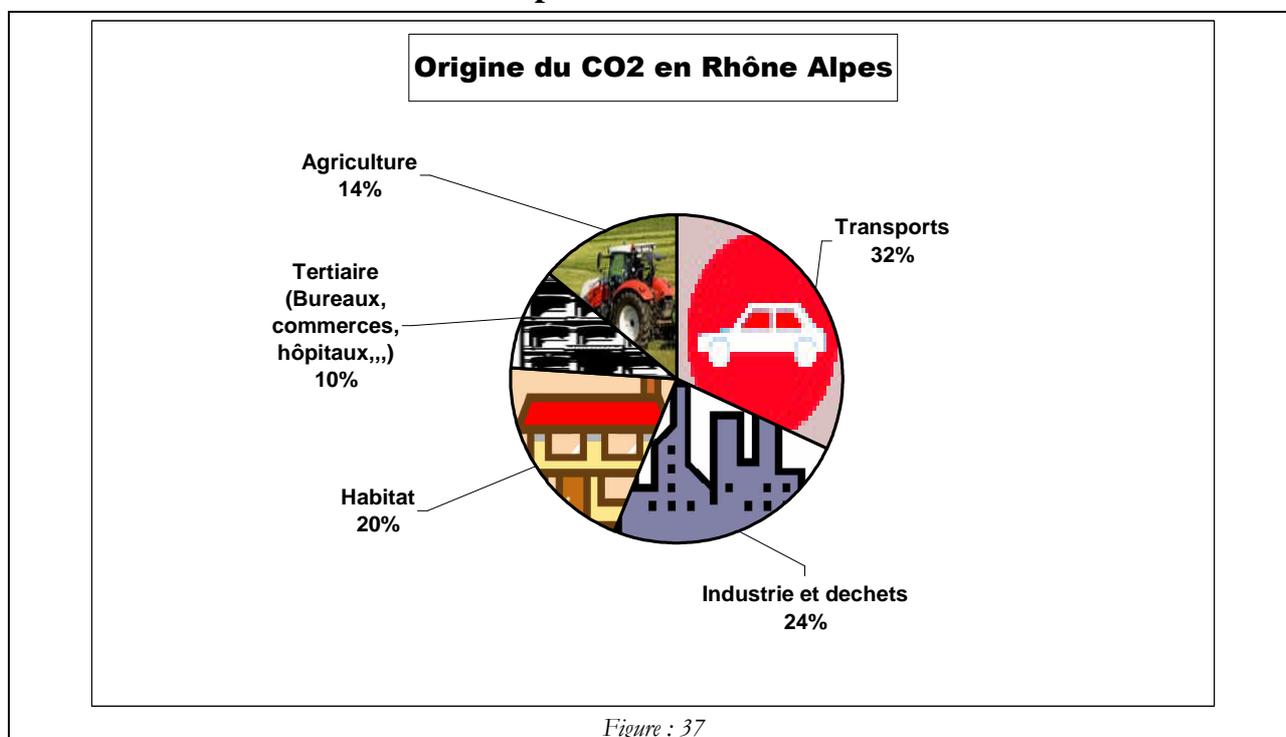
Grâce au nucléaire, la France émet 25 à 70 gCO₂ /kWh électrique produit,

⇒ plus de 90 % à partir de sources non-émettrices de CO₂,

⇒ 5 à 6 fois moins que l'Allemagne ou les Pays-Bas



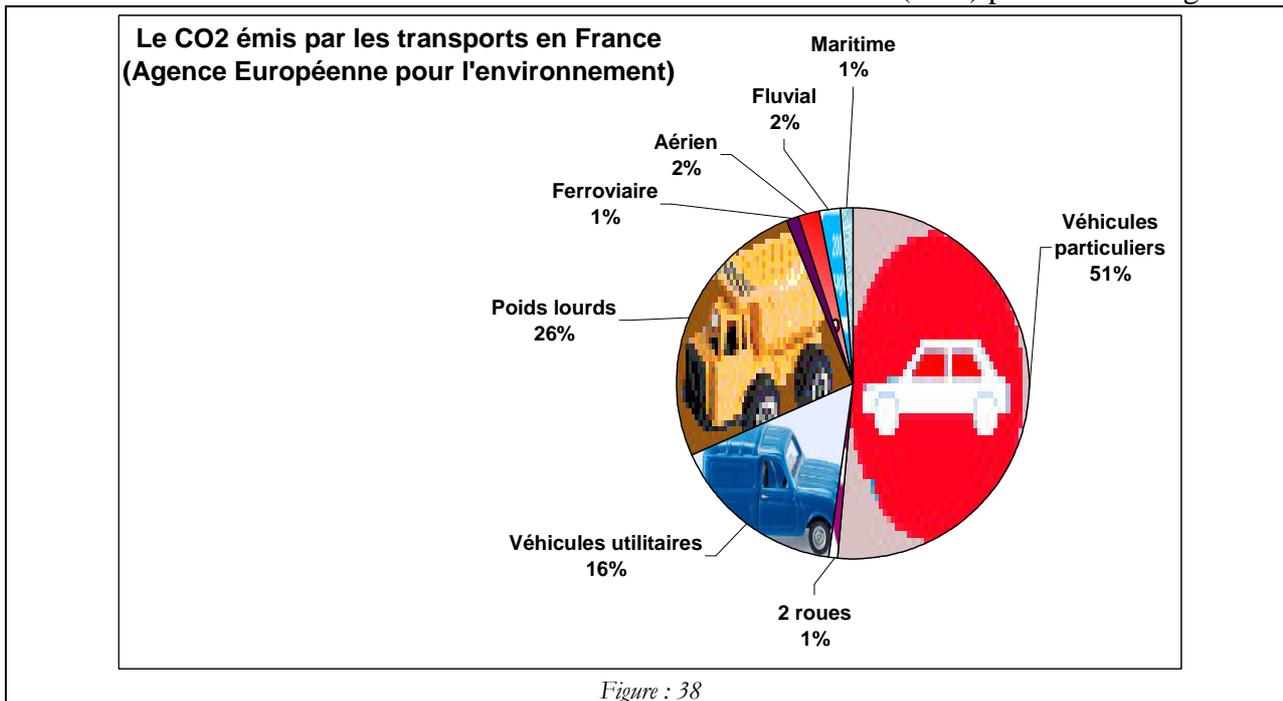
3. 2. 4. Sources d'émission de CO₂ par secteur en France



En Rhône-Alpes par exemple, le CO₂ est émis par les combustibles utilisés par :

- ⇒ les transports,
- ⇒ le résidentiel et le tertiaire et
- ⇒ par l'industrie et l'agriculture.

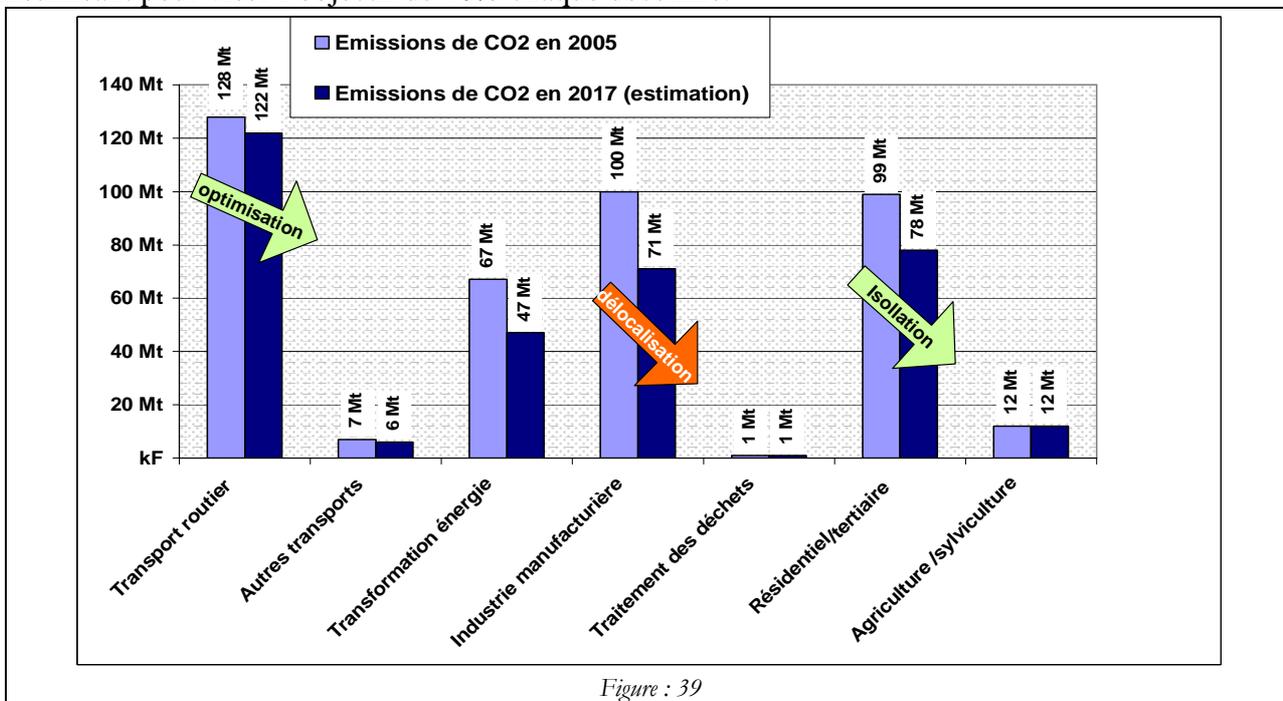
Le résidentiel et le tertiaire utilisent des combustibles essentiellement (60%) pour le chauffage.



Les émissions pour le transport se répartissent pour la moitié entre les véhicules particuliers et pour une petite moitié les véhicules professionnels, dont un quart pour les poids lourds.

Le CO2 émis par le transport est du pour environ la moitié par les voitures et pour près de l'autre moitié, par les véhicules utilitaires et poids lourds. N'entrent pas dans cette statistique les transports internationaux maritimes et aériens.

Toutes les sources de CO2 sont en diminution. Cependant, le rythme de ces diminutions est insuffisant pour viser l'objectif de 40% chaque décennie.



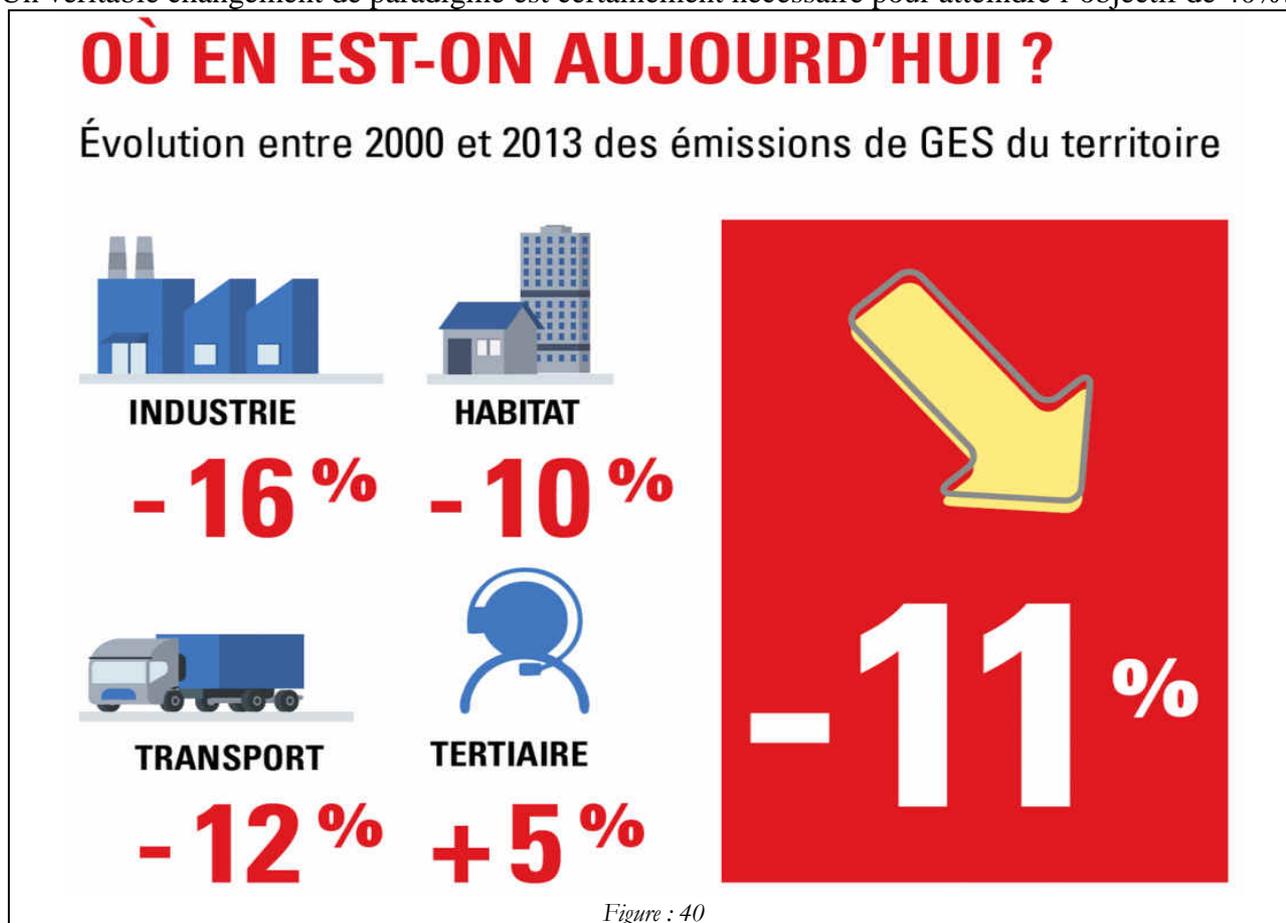
3. 2. 5. Emissions de CO2 en Rhône Alpes

L'étude préalable au PCAET de la Métropole a permis de faire un point sur l'évolution durant le précédent PCAET.

Les émissions sont en diminution, mais pas autant qu'il serait nécessaire et pas toujours pour des raisons intéressantes :

- ⇒ l'industrie se délocalise,
- ⇒ les dépenses de chauffage dans l'habitat baissent lentement, grâce aux isolations, aux constructions d'immeubles BBC, à l'abandon du chauffage au fioul, mais aussi en raison du réchauffement climatique lui-même,
- ⇒ les émissions atmosphériques des transports baissent, mais surtout grâce aux efforts des motoristes, alors que le nombre de km de déplacements effectués en périphérie de Lyon est en croissance (sans doute pour éviter les contraintes du centre ville).
- ⇒ les émissions du tertiaires croissent, ce qui n'est guère étonnant, avec le développement des tours et donc des ascenseurs et aussi du numérique.

Un véritable changement de paradigme est certainement nécessaire pour atteindre l'objectif de 40%.



3.3 Absorption du CO₂ par la forêt

Le bilan carbone repose sur la différence entre les émissions et l'absorption par la nature et notamment la forêt. L'évolution de la forêt varie, notamment en fonction des incidents climatiques, comme la tempête de 2009.

Selon l'ONF, l'absorption par la forêt a été :

- ⇒ en 2004 : le cumul de carbone équivalait à 9,2 GtCO₂ absorbé,
- ⇒ de 2000 à 2004, **les arbres et les sols ont permis de séquestrer 89 MtCO₂/an**,
soit 6,18 tCO₂/ha/an * 14.5 Mha,
- ⇒ de 2005 à 2011 (suite à la tempête de 2009), seulement **62MtCO₂/an**,
soit de 3,83tCO₂/ha/an.

Cependant, les documents de préparation pour la révision de la stratégie nationale bas carbone en 2018 tablent sur des captages à 85 MtCO₂ par an.

Nicolas Hulot a proposé la réduction d'un facteur 6 = 380 / 85.

4 Les objectifs du plan Climat Air Energie de la Métropole

4.1 Les objectifs du plan actuel

Les objectifs du plan actuel à l'horizon 2020, par rapport à 1990 sont :

- ⇒ - 20% d'émissions de gaz à effet de serre (actuellement : -14 % d'émission en France) ;
227 tCO₂ (en 2009) → 210 tCO₂ (actuellement),
- ⇒ + 20% consommation d'énergies renouvelables (EnR) (actuellement : 23 % en France) ;
- ⇒ + 20% d'efficacité énergétique (non contraignant).

Ces objectifs sont conformes à ceux préconisés par le **paquet climat-énergie** établi par l'Union Européenne.

La diminution d'un Facteur 4 était proposée précédemment par le Conseil général du Développement Durable avec la progression suivante :

- ⇒ **-25% de 1990 à 2020 (-0,8%/an = 7,7% par décennie seulement)**,
En 28 ans, on a diminué de 380 à 300Mt soit -21%,
- ⇒ **-20% de 2020 à 2030 (-2,5% par an)**,
- ⇒ **-33% de 2030 à 2040 (-4% par an)**,
- ⇒ **-50% de 2040 à 2050 (-6% par an)**.

Ce qui clochait dans ce programme, c'est qu'il prévoit une accélération des diminution alors que plus on aura diminué, plus ce sera difficile de trouver des gisements de diminution !

4.2 Les objectifs du plan futur

Les objectifs du futur plan climat-Air-Energie pour la prochaine décennie seront les suivants :

- ⇒ Diminution du CO₂ de 42%,
- ⇒ Accroissement du taux d'énergie renouvelable de 20%,
- ⇒ Diminution de la quantité d'énergie consommée de 20%.

Ce dernier objectif est considéré comme facultatif par les préconisations Climat de l'Union Européenne.

Nous notons qu'il n'y a encore **aucun objectif concernant la qualité de l'air**, alors que la pollution de l'air (en oxydes d'azote notamment) dépasse encore les seuils imposés par l'Union Européenne et est le double de la pollution maximale recommandée par l'OMS².

En revanche, le **plan de diminution du CO₂ légitimement plus volontariste**, ne repousse pas les efforts à la prochaine décennie.

Les diminutions proposées par le plan **facteur 6 prévu correspond à une diminution plus**

- régulière** (proposée par Nicolas Hulot) : **-40% par décennie (0,8% par an)**, pour obtenir :
 - ⇒ $60\%^3 = 21,6\%$ de nos émissions actuelles après 3 décennies,
 - ⇒ soit une diminution d'un **facteur d'environ 5 de maintenant à 2050**,
 - ⇒ soit un **facteur 6 de 1990 à 2050**.

La suite de notre étude, démontrera cependant que, dans les vingt prochaines années, les 2 premiers objectifs : **neutralité carbone et augmentation des énergies renouvelables risquent fort d'être incompatibles**.

² Organisation Mondiale pour la Santé

4.3 La neutralité carbone, un objectif ambitieux

La neutralité carbone consiste à réduire nos émissions à 460 kg de carbone par an.

Cet objectif est-il ambitieux ?

Avec les technologies actuelles, 460kg de carbone permet **au choix** (selon J.M. Jancovici) :

- ⇒ Parcourir 5.000 km à Lyon ou 10.000 km sur route,
- ⇒ Faire un aller-retour de Paris à New York (en avion),
- ⇒ Consommer 3.000 kWh d'électricité aux USA, mais 18.000 kWh en France, alors que la consommation annuelle par Français est de l'ordre de 8.000 kWh, (*dont 50% nous est « contenue » dans nos achats*).
- ⇒ Acheter 50 à 500 kg de produits manufacturés, soit 2000 à 6000 € de dépenses (pour des produits)
- ⇒ Acheter 1 à 2 micro-ordinateurs à écran plat,
- ⇒ Construire 4 à 5 m² de logement béton,
- ⇒ Chauffer au gaz, quelques mois un logement (7.000 kWh).

Aujourd'hui la plupart d'entre nous font tout cela et sans doute plus.

En 2050, que choisirons les lyonnais ?

Pour que cette liste soit acceptable, il va falloir :

- ⇒ soit se passer de la plupart des ces émissions de CO₂, mais je vois mal un homme politique se faire élire en nous les proposant,
- ⇒ soit effectuer la plupart de ces opérations en émettant bien moins de CO₂ qu'aujourd'hui.

C'est l'hypothèse de diminution de CO₂ sans privation qui nous semble la plus réaliste, bien que très ambitieuse, que nous allons détailler.

Nous allons montrer comment y arriver.

4.4 L'augmentation de l'efficacité énergétique

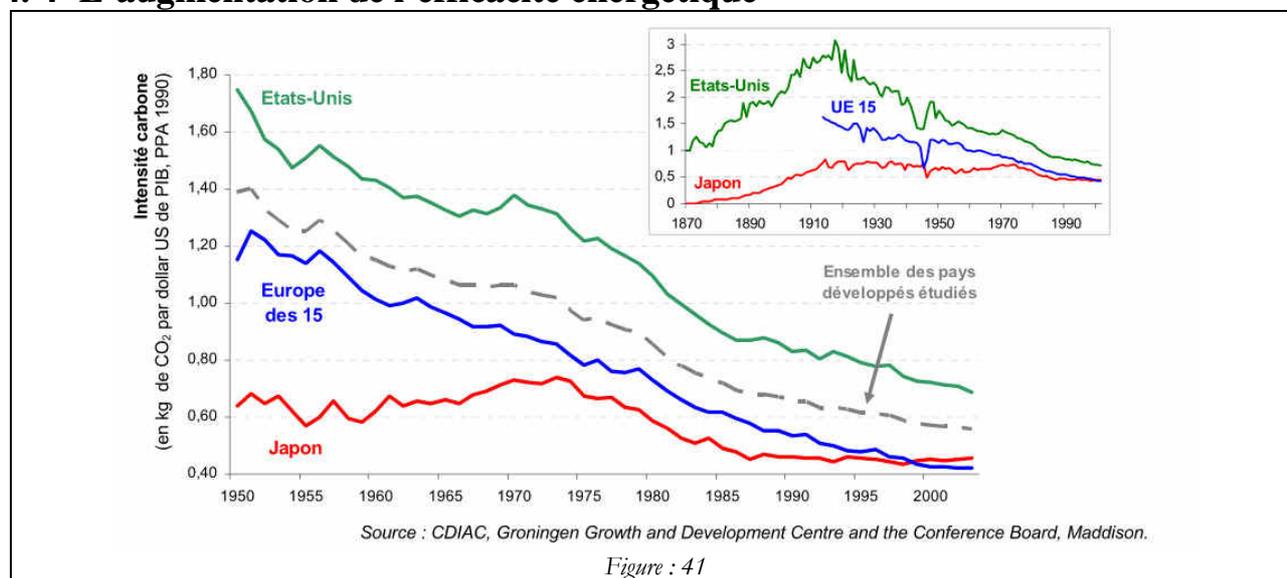
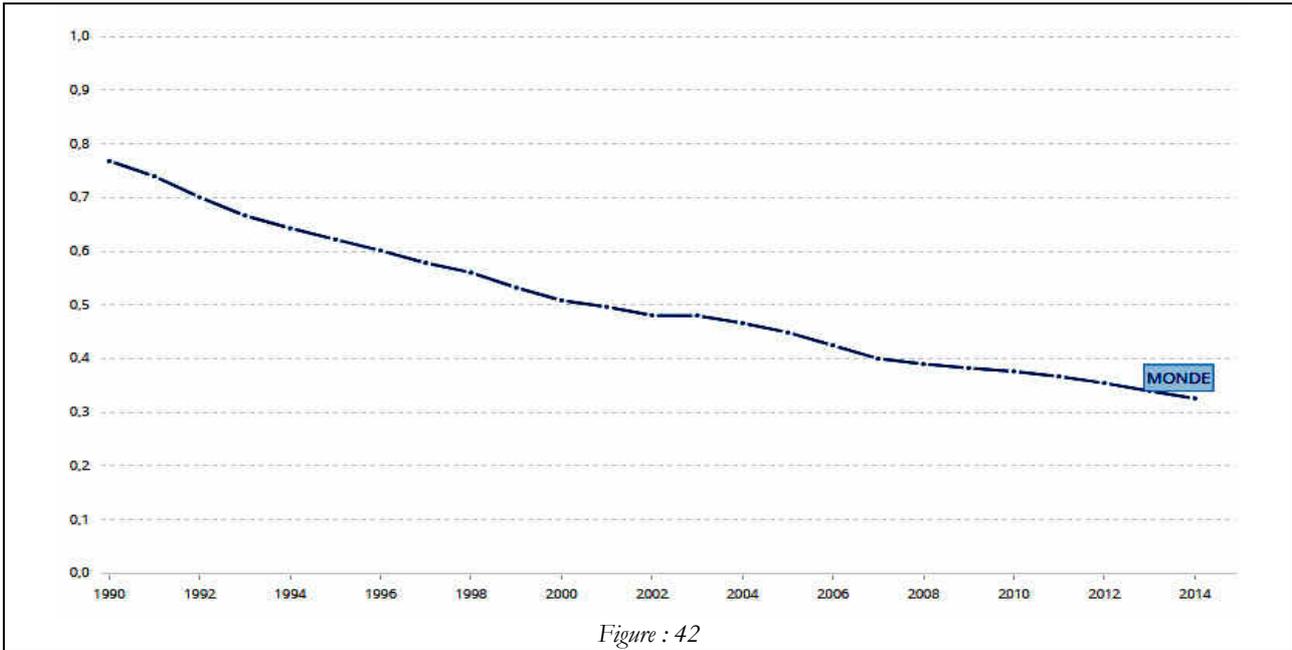


Figure : 41

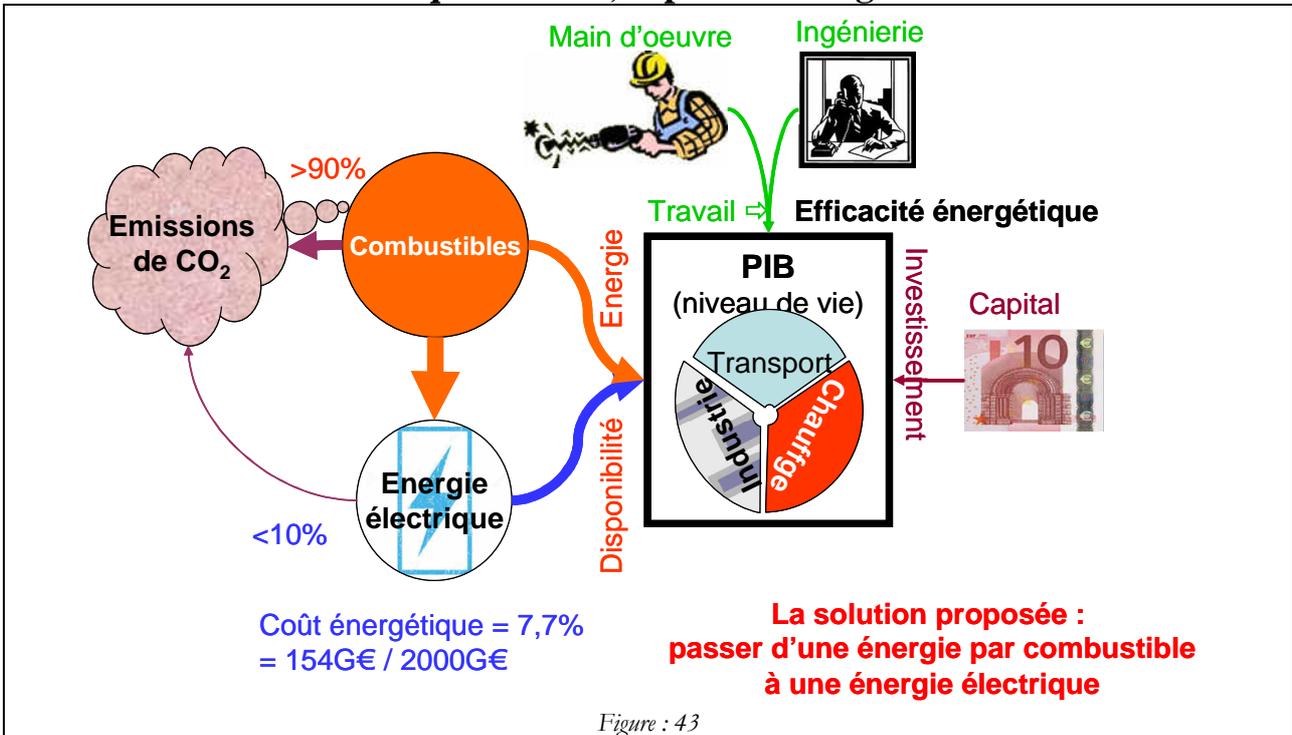
Les économistes ont constaté une diminution du ratio (émissions de CO₂)/PIB dans la plupart des pays développés, comme le montre la Figure : 41. Selon les données de la Banque Mondiale, l'évolution de ce ratio (émissions de CO₂)/(\$ de PIB) est donné par la courbe de la Figure : 42.



Donc, l'objectif de 20% (non contraignant) d'amélioration de l'efficacité énergétique, c'est-à-dire de la diminution des énergies consommées à PIB constant est-elle simplement **l'insertion dans les plans d'une constatation économique générale**. Par exemple l'amélioration des rendements des moteurs thermiques qui a permis à nos véhicules de consommer moins de carburants. L'industrie de son côté fait ses améliorations, pour des raisons économiques, en recourant notamment à plus de numérisation.

L'accroissement de l'efficacité énergétique concourt pour un tiers à atteindre l'objectif de 60%, mais sera loin d'y suffire. Il faut trouver les 40% restants

4.5 Les relations économiques travail, capital et énergie.



Les économistes (comme Marx notamment) ont travaillé sur les relations entre travail et capital. Mais aucun jusqu'à présent n'avait inclus l'énergie dans leurs réflexions. En effet, le charbon, le pétrole, le gaz ont été produits sur la planète sans que personne n'ait à payer pour leur fabrication. Ce que nous payons, c'est l'extraction, l'affinage, voire des redevances aux pays producteurs. C'est l'objet des études des chercheurs du « Shift Project », sous la direction de Jean-Marc Jancovici. En effet, la disponibilité des ressources énergétiques n'est pas éternelle. Le maximum de la production de pétrole a été franchi et nous nous dirigeons lentement vers la pénurie qui est prévue pour dans 50 ans. Pour le gaz c'est un peu plus. Pour le charbon, c'est dans 120 ans. Une question essentielle est : que deviendra le PIB, c'est-à-dire notre civilisation, lorsque cette pénurie sera présente.

L'idée de cette correspondance est née de l'observation des courbes mondiales de consommation énergétique (pétrole notamment) d'une part et du PIB d'autre part.

4.6 Relation forte de « cointégration » entre énergie et PIB

L'analyse des variations du PIB (GDP en anglais), de la consommation d'énergie et de pétrole montre une correspondance frappante, mise en évidence par J.M. Jancovici (Figure : 44).

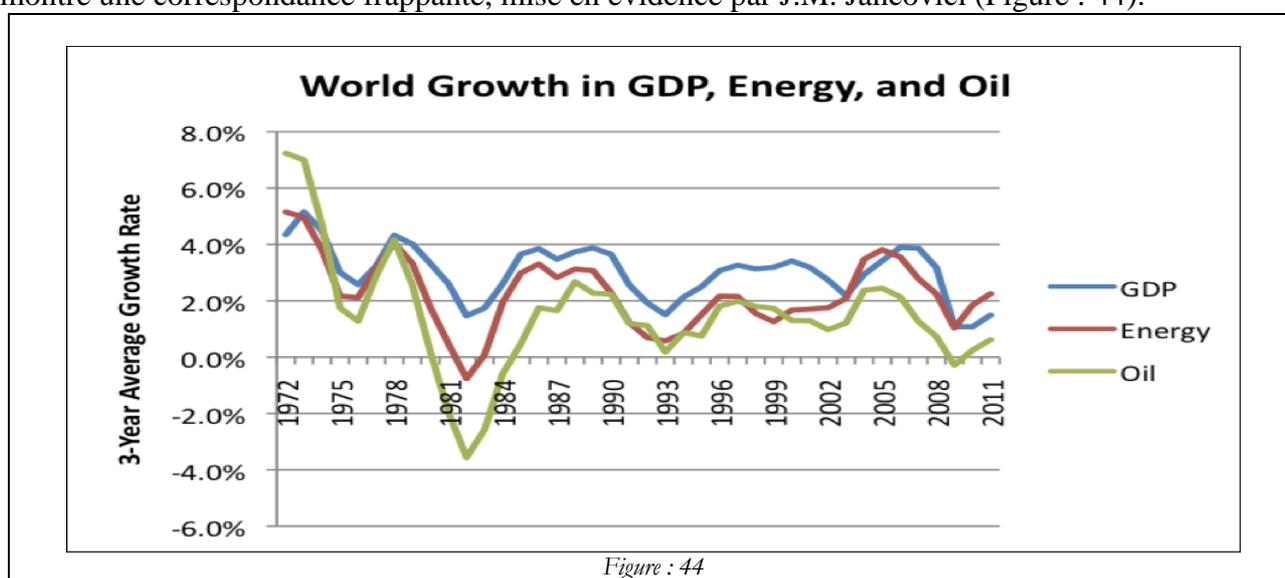


Figure : 44

Cette relation est dite de cointégration, ce qui signifie que les 2 courbes ont tendance à ne pas s'écarter longtemps l'une de l'autre, même si instantanément elles peuvent évoluer différemment.

Le Shift-Project s'est penché sur l'importance de l'énergie dans cette évolution.

Naturellement, on peut écrire : $GES = GES/Energie \times Energie/PIB \times PIB/actifs \times Actifs$: avec :

⇒ GES/Energie qui est le taux de gaz à effet de serre émis par la consommation d'énergie.

⇒ PIB/actifs qui représente le niveau de vie du pays³.

³ La relation entre PIB et l'énergie a été exprimée par la loi de Kaya : $\Delta(PIB) = \Delta(NRJ * PIB / NRJ)$.

NRJ est l'énergie. EFF est l'efficacité énergétique PIB/NRJ

Soit en transformant la multiplication en addition grâce à l'application de logarithmes :

$\Delta L_n(PIB) = v * \Delta L_n[NRJ] + \pi * \Delta L_n[EFF] + \kappa * \Delta L_n[K] + \epsilon$.

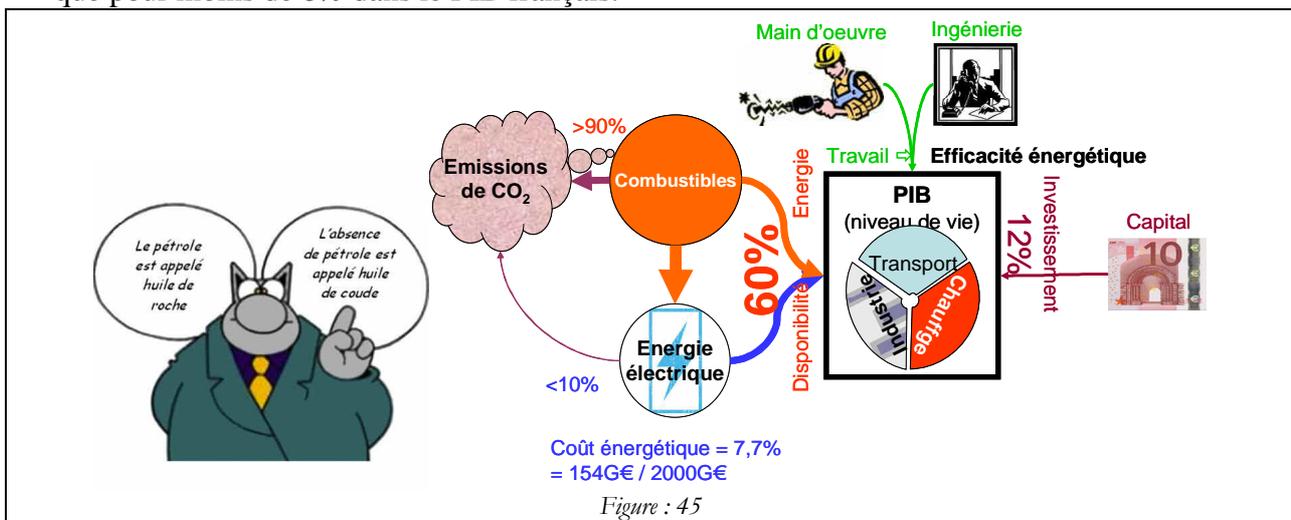
Si l'on s'intéresse aux variations, on a donc approximativement : $\Delta(PIB) = v * \Delta[NRJ] + \pi * \Delta[EFF] + \kappa * \Delta[K] + \epsilon$ où ϵ représente les écarts dus aux influences ignorées dans la loi.

Naturellement, il serait utile et probablement nécessaire de diminuer les effets climatiques de la civilisation en contrôlant le nombre d'actifs autrement dit : Population * Actifs/population modulable par la démographie. Ceci a d'ailleurs eu lieu en Chine. C'est le rôle de la politique de la natalité, qui est du ressort de chaque état. Actif/population dépend de divers facteurs : l'âge de la retraite, le chômage...

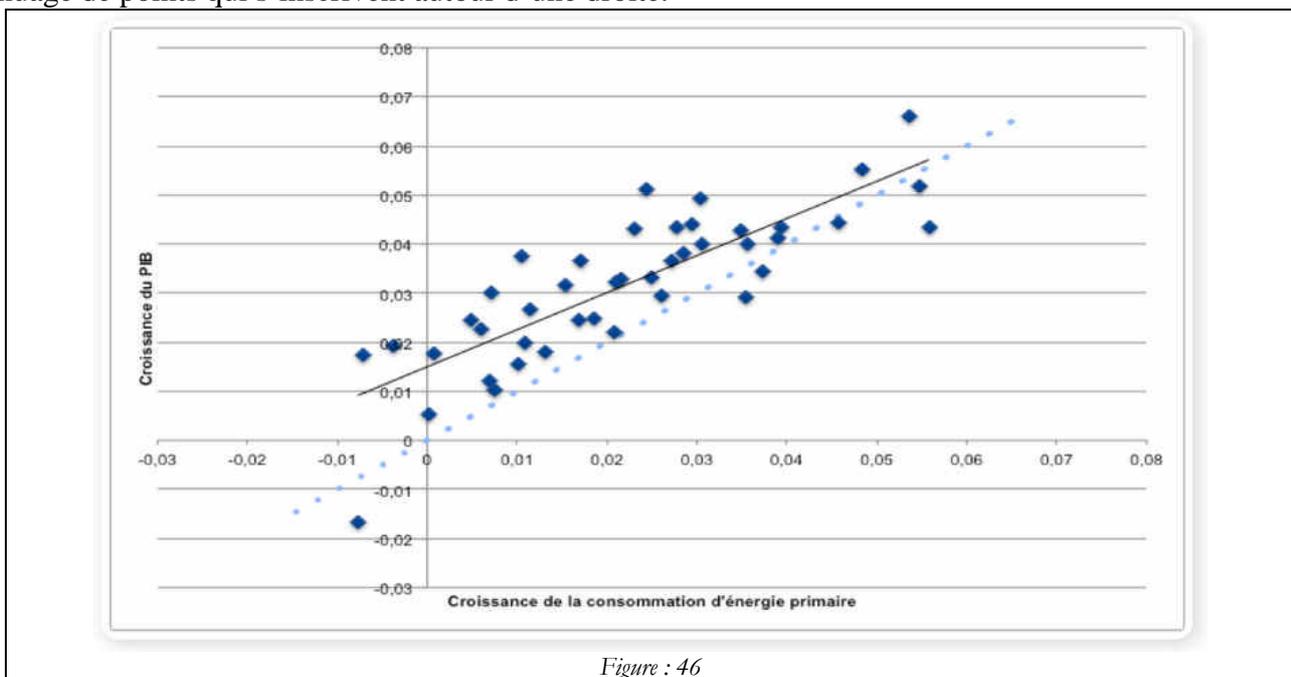
Quelle est l'impact de l'énergie consommée dans les émissions de GES : Energie/PIB ou de son inverse, l'efficacité énergétique $EFF=PIB/Energie$?

Les chercheurs du Shift-Project ont démontré l'influence dans le PIB de :

- ⇒ l'efficacité énergétique qui a une influence de $\eta = 28\%$,
- ⇒ l'ajout de capital qui a une influence de seulement $\kappa = 12\%$ sur le PIB,
- ⇒ l'énergie consommée qui a une influence primordiale de $v = 60\%$, alors qu'elle ne compte que pour moins de 8% dans le PIB français.



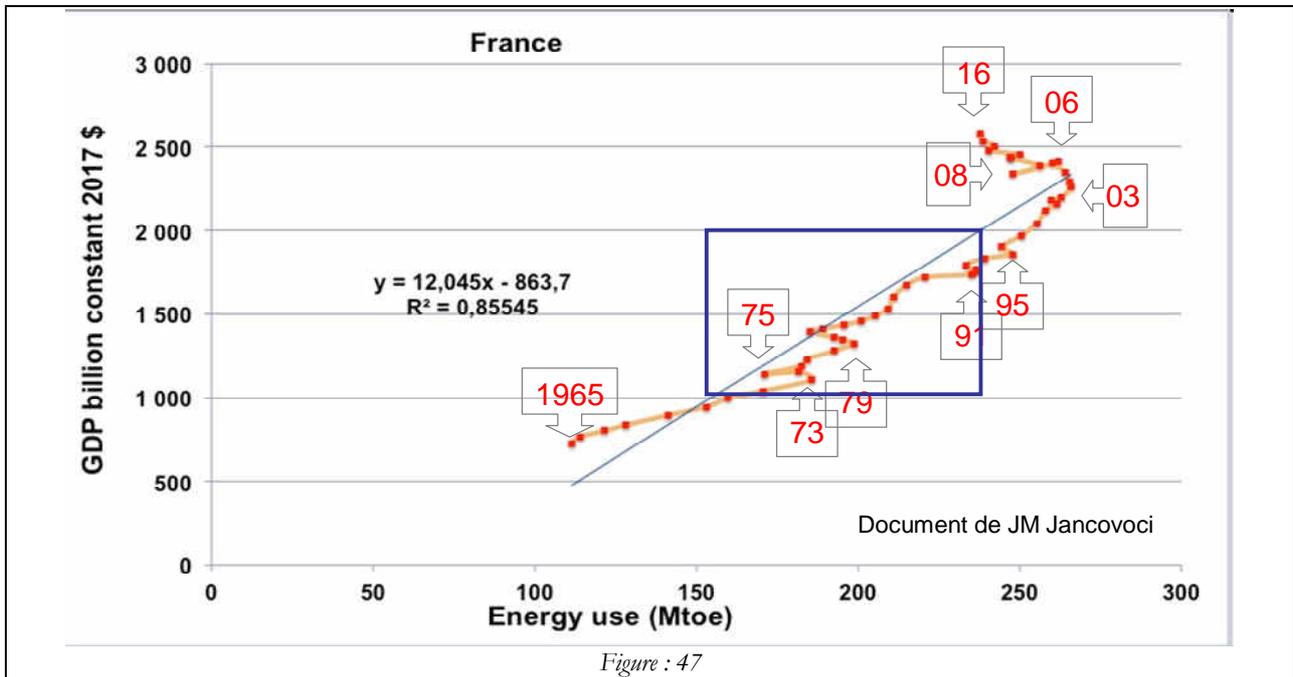
L'inscription sur un même graphique, pour plus de 45 états, de points représentant d'une part la variation de leur consommation de l'énergie primaire et d'autre part l'évolution du PIB donne un nuage de points qui s'inscrivent autour d'une droite.



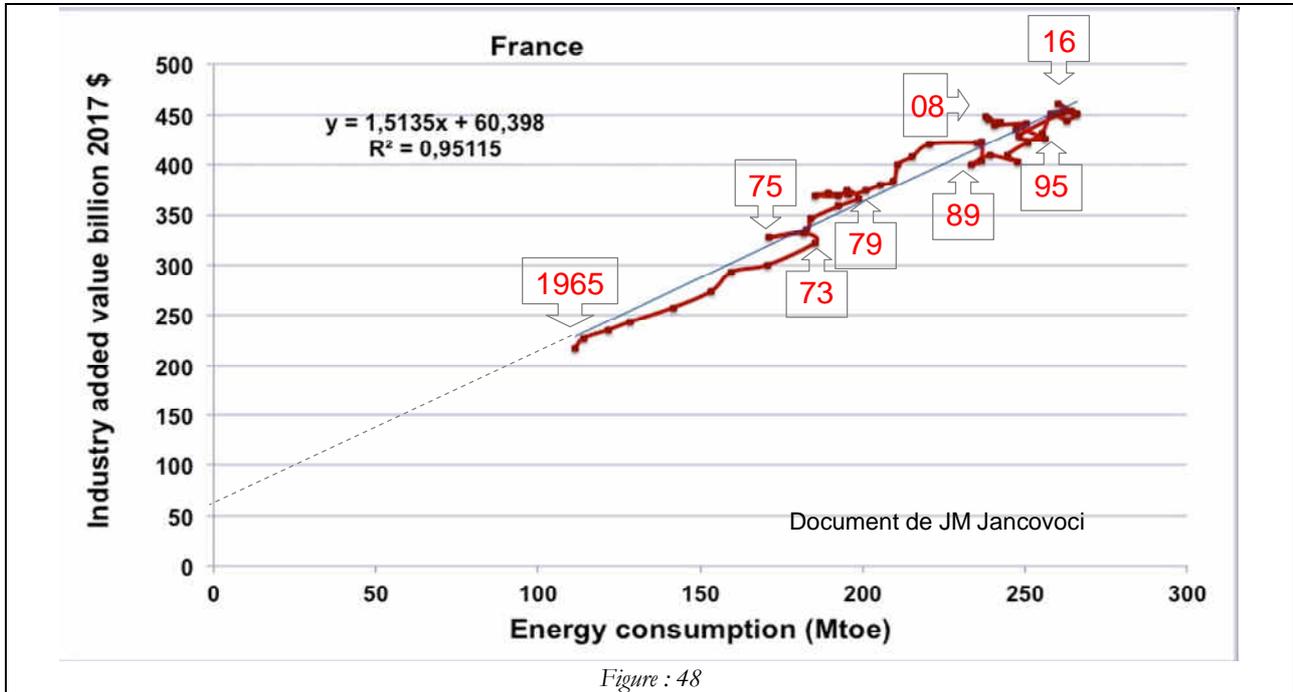
La droite qui représente le nuage de points coupe l'axe de la croissance de PIB au point 1,5%. Ceci montre que le PIB peut croître d'environ 1,5% par an, même en l'absence d'accroissement de la consommation d'énergie primaire, grâce à l'effet de la croissance de l'efficacité énergétique.

Cette analyse se vérifie pour la France, comme le montrent la Figure : 47, la Figure : 48 et la Figure : 49.

L'évolution du PIB et la valeur ajoutée nationale dépendent linéairement de la consommation d'énergie.



Ces dernières années, à cause certainement d'une part à la désindustrialisation et d'autre part de l'évolution vers le numérique de la valeur ajoutée, l'énergie consommée a eu tendance à baisser. Mais le PIB a continué à croître.



Ces courbes⁴ montrent, en effet, ce qui s'appelle **une hystérésis** :

- ⇒ une hausse de 1% du PIB/habitant augmente la consommation énergétique de 0,73%,
- ⇒ mais, chaque recul de 1% du PIB/habitant baisse ces émissions seulement de 0,43%⁵.

C'est ce qu'a démontré Richard York, professeur à l'université de l'Oregon

dans la revue *Nature Climate Change*, d'après une analyse portant sur 150 pays entre 1960 et 2008 (d'après les données de la Banque mondiale).

Ces graphiques montrent aussi qu'un moteur majeur de la croissance est l'augmentation de la croissance d'énergie primaire :

L'étude montre que 1% d'accroissement d'énergie génère 0,8% de croissance du PIB.

A l'inverse, on peut en déduire que (à l'hystérésis près) :

A ratio constant (GES émis) / énergie, l'objectif de diminution de 40% par décennie des émissions de GES, provoquerait une diminution de 32% de notre niveau de vie.

Cette diminution risquerait, de plus, de condamner les investissements qui s'imposeront pour la recherche nécessaire pour diminuer les émissions de CO₂ et pour améliorer les solutions technologiques.

C'est pourquoi, il semble irréaliste d'inscrire l'objectif de diminution de l'énergie consommée dans un programme politique.

Certes :

- ⇒ l'analyse du passé ne prédit le futur,
- ⇒ le PIB traduit plus ou moins parfaitement le niveau de vie des citoyens et leur satisfaction matérielle, mais on n'en a pas trouvé de meilleur.

5 Changer de paradigme pour réduire le ratio GES / énergie

5.1 La stratégie primordiale pour atteindre les objectifs

Pour réduire les émissions de CO₂, sans provoquer la catastrophe économique de réduction massive du PIB, nous préconisons une stratégie et une contrainte qui soient acceptable par la population.

Pour réduire nos émissions de CO₂, le changement de paradigme devrait viser à diminuer considérablement le ratio : (GES émis) / énergie.

Dit autrement, il s'agira donc :

- ⇒ de remplacer l'énergie carbonée par de l'énergie décarbonée, stockage inclus et
- ⇒ ne diminuer l'énergie consommée qu'en accroissant l'efficacité énergétique, pour un même résultat, sans augmentation d'autres moyens, en améliorant le rendement ou en réduisant les pertes...
- ⇒ maintenir le coût de l'énergie pour maintenir le PIB.

La contrainte consisterait à veiller à ne pas accroître le coût de production et de distribution de l'énergie.

⁴ Établies selon les données de la Banque mondiale portant sur 150 pays entre 1960 et 2008.

⁵ Cette relation a été montrée par Richard York dans la revue, professeur à l'université de l'Oregon dans la revue *Nature Climate Change* suite à une analyse sur 150 nations.

En effet, l'énergie concourt à produire tous les objets que nous achetons et tous les services que nous utilisons. Notre niveau de vie est donc inversement proportionnel au coût de l'énergie.

Concernant la pollution, l'objectif sera de viser des baisses au niveau des seuils de l'OMS.

Mais nous verrons que la stratégie de baisse du CO₂ permettra aussi d'atteindre cet objectif.

5.2 Prendre en compte les remarques de la Cour des Comptes

La Cour des comptes a été saisie par lettre du 19 décembre 2016 de la présidente de la commission des finances du Sénat d'une demande d'enquête portant sur les politiques publiques de soutien au développement des énergies renouvelables (EnR).

Cette demande a été acceptée par le Premier président le 11 janvier 2017

Dans son rapport « Le soutien aux énergies renouvelables » de 2018, la Cour des Comptes a analysé la politique énergétique de la France et en particulier l'incitation à utiliser les renouvelables.

Les erreurs stratégiques pour réduire les émissions de CO₂ ont été pointées par la Cour des Comptes.

Selon ce rapport, la Cour des Comptes indique que :

- ⇒ Des difficultés physiques et économiques empêchent d'atteindre les objectifs de la politique des 3 fois 20,
- ⇒ Les énergies renouvelables progressent, mais sans atteindre les objectifs fixés,
- ⇒ malgré des dispositions de financement qui se révèlent inefficaces.
- ⇒ Certains objectifs se confortent, par exemple, l'amélioration de l'efficacité énergétique contribue à la baisse des émissions.
- ⇒ À l'inverse, ces objectifs se contrarient lorsque **le développement des énergies renouvelables conduit à une « carbonation paradoxale »**.

La cause est une conjonction de difficultés :

- ⇒ des **limites physiques**,
- ⇒ des **retombées économiques** insuffisantes.
- ⇒ des **coûts de production élevés**,
- ⇒ des dispositifs de soutien complexes, instables et d'efficacité variable, *qui ont renchéri le coût de l'électricité de 30% (NDLR)*,
- ⇒ des conflits d'usage,
- ⇒ un coût trop élevé du soutien,
- ⇒ le besoin de choix de long terme soutenables,
- ⇒ peu d'évaluation de l'efficacité et du coût des mesures.

Nous verrons que la stratégie que nous suggérons permettrait de satisfaire les préconisations de la Cour des Comptes, alors que la stratégie française annoncée ne le permettra pas.

5.3 Les limites physiques des renouvelables

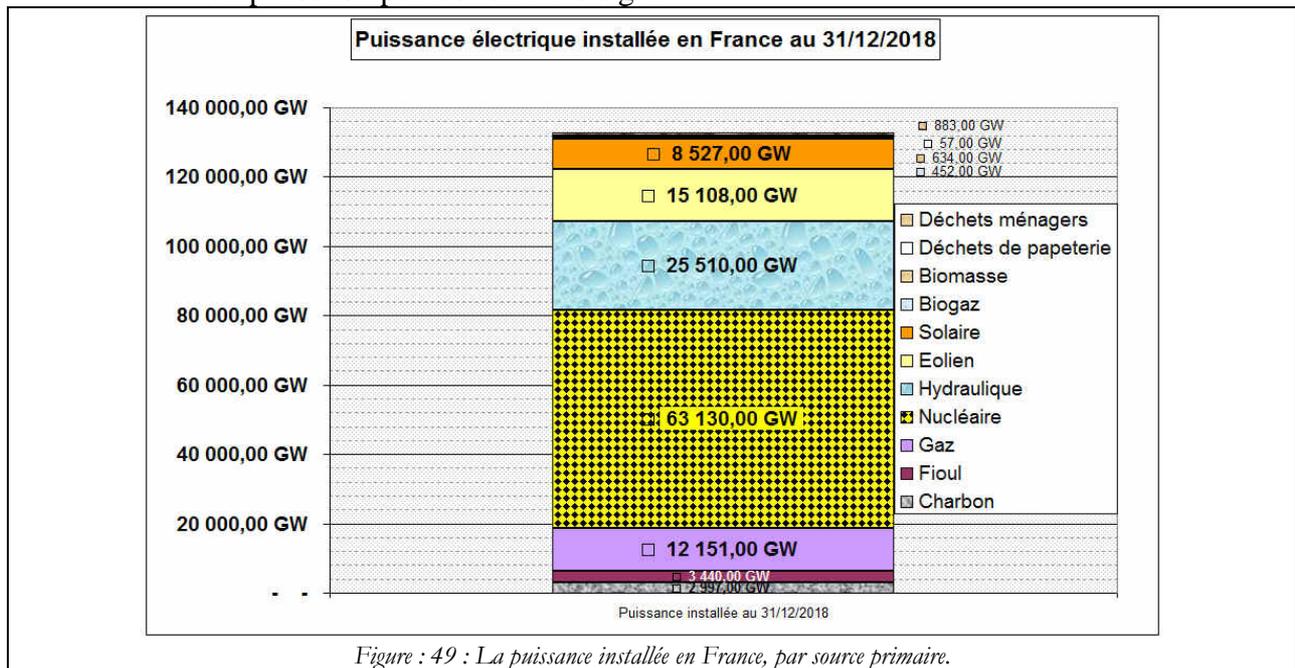
5.3.1. Principes d'équilibre du réseau électrique

La Loi sur la Transition énergétique ne prend pas en compte le réseau électrique qui impose :

Production (t) = Consommation (t), $\forall t$

Donc notamment, aux échanges internationaux près :

- ⇒ [Puissance installée maximale aléatoire] < [Consommation minimale]
30GW, alors qu'on atteint 23GW en 2018.
- ⇒ [Puissance maîtrisable installée disponible] > [Consommation maximale]
95GW dont 63GW nucléaire + 20 GW hydraulique, + thermique (gaz et charbon),
- ⇒ [Variation maximale de production maîtrisable]
= 30GW/h
> [Variation maximale de consommation]
+ [Variation maximale de production aléatoire], soit :
±70MW*58centrales nucléaires*85% disponibles,
+ compensation par l'hydro-électrique,
+ compensation par les centrales à gaz.



5.3.2. La capacité maximale du réseau juste limite

La consommation française varie de 30 GW à 100 GW

La capacité de production maximale est 132 GW,

dont 104 GW maîtrisables :

- ⇒ 63 GW nucléaires dont environ 60 GW disponibles,
- ⇒ 24 GW hydrauliques dont 13 GW au fil de l'eau,
- ⇒ 17 GW thermiques et
dont 24 GW aléatoires.

Le réseau électrique actuel est bien dimensionné. Sa capacité est juste suffisant pour assurer juste l'équilibre : Production (t) = Consommation (t), $\forall t$.

Mais à consommation constante, pour un réseau stable, RTE alerte :

On ne pourra pas assurer l'équilibre en toutes circonstances si la capacité nucléaire ou la capacité thermique était diminuée.

Si la capacité thermique est diminuée comme prévue, il sera risqué, pour l'équilibre du réseau français, de ne pas augmenter la capacité nucléaire au-delà des 63 GW (ce qui serait contraire à la loi actuelle), donc ne pas arrêter Fessenheim.

Les solutions de secours seraient alors :

- ⇒ d'acheter au prix fort de l'électricité étrangère (produite au charbon), à supposer que nos voisins ne soient pas eux-mêmes à court ou
- ⇒ de couper l'électricité aux industriels français qui ont choisi cette option d'effacement, (en supposant que les contrats d'effacement aient atteint 8% de la capacité).

Le besoin croissant de recharge des véhicules électriques devra être intelligent et nocturne pour éviter un accroissement de la capacité maîtrisable du réseau (nucléaire, hydraulique ou thermique).

5. 3. 3. La capacité maximale d'énergie aléatoire atteinte

La capacité de production aléatoire (éolien + photovoltaïque) 23GW est inférieure à la consommation minimale (30GW). Mais elle s'en approche dangereusement. En effet, il est risqué pour l'équilibre du réseau d'arrêter la production des centrales nucléaires.

Il ne faudrait donc pas que la capacité de production aléatoire augmente davantage, car alors, le réseau serait obligé pour assurer son équilibre de commander la mise en drapeau les pales des éoliennes les jours de faible consommation.

Or c'est ce que les députés ont mis dans la loi sur la transition énergétique !

5. 3. 4. L'équilibre dynamique du réseau

Il faut également que les centrales maîtrisables puissent compenser à la fois non seulement les variations de consommation, mais aussi les variations de production aléatoires.

Les variations actuelles de consommation sont représentées sur la. Elles sont de l'ordre de 4GW/h, voire un peu plus.

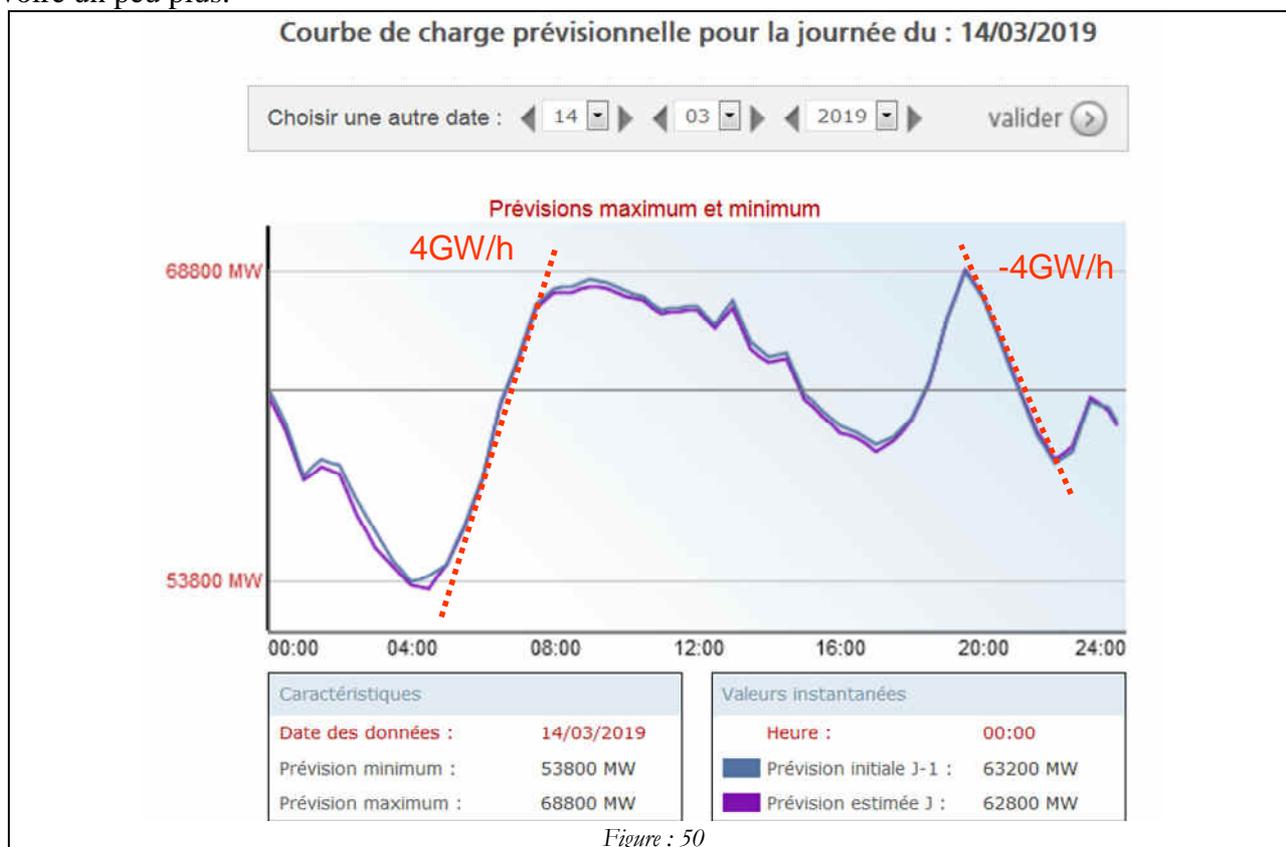


Figure : 50

Les éoliennes sont installées dans les zones de vent à régime différent qui sont :

- ⇒ la façade atlantique de Dunkerque à Royan,
- ⇒ la côte Méditerranéenne de Perpignan à Toulon et la vallée du Rhône.

Cependant, il y a une forte corrélation météorologique entre les vents de chacune de ces 2 régions. Le réseau doit donc pouvoir faire face à des variations pouvant aller jusqu'à 20GW/h, surtout si la baisse se produit en fin d'après midi, en même temps que la baisse de l'éclairement solaire ou inversement si la hausse se produit dans la matinée. Ces variations de production risquent donc d'être plus rapides et importantes que les variations de consommation.

Or les centrales nucléaires n'ont pas été conçues au départ pour avoir une forte réactivité. Ce n'est pas favorable à leur sécurité de les faire réagir trop vite.

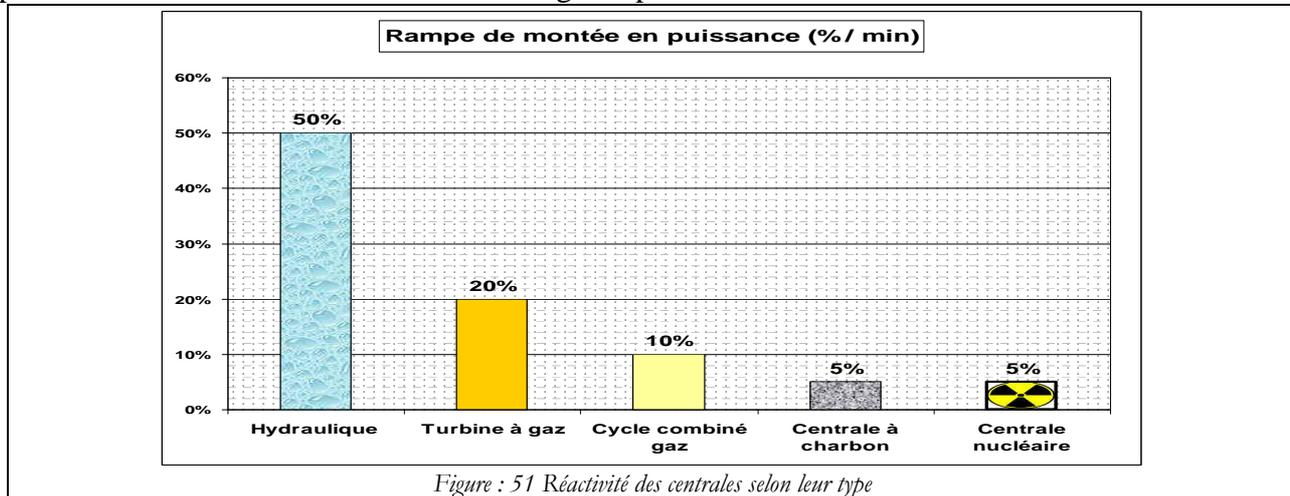


Figure : 51 Réactivité des centrales selon leur type

La réactivité standard de 85% des 58 centrales nucléaires (car 15% du parc a du carburant en fin de vie et n'est pas sollicité pour ces variations) est de 70MW autour de leur point de consigne, soit 3,5GW, pour la totalité du parc disponible ($3500 \text{ MW} = 70\text{MW} * 58 * 0,85$). De plus, le ralentissement rapide des centrales nécessite d'ingérer du bore, ce qui n'est pas gratuit. En revanche, **la réactivité des centrales à gaz est de 12 GW en 10mn.**

Ce sont donc les centrales à gaz qui sont utilisées pour assurer les ajustements rapides.

Si le vent tombe brusquement, pour assurer l'équilibre du réseau, il faut :

- ⇒ appeler 85% des centrales nucléaires à fournir davantage progressivement,
- ⇒ démarrer les centrales à gaz pour fournir rapidement 12 GW,
- ⇒ booster les centrales à charbon, si elles existent encore (+5GW).

Le reste doit être importé au prix fort via les interconnexions européennes (si c'est possible) ou effacé.

Les émissions de CO₂ ont baissé avec l'arrêt de quelques centrales à charbon. Cependant, le recours nécessaire aux centrales à gaz explique pourquoi une légère augmentation du recours aux renouvelables aléatoires dite vertes (~5%), conduit depuis 2014 à un presque doublement du CO₂ émis par le réseau électrique. C'est un paradoxe fatal.

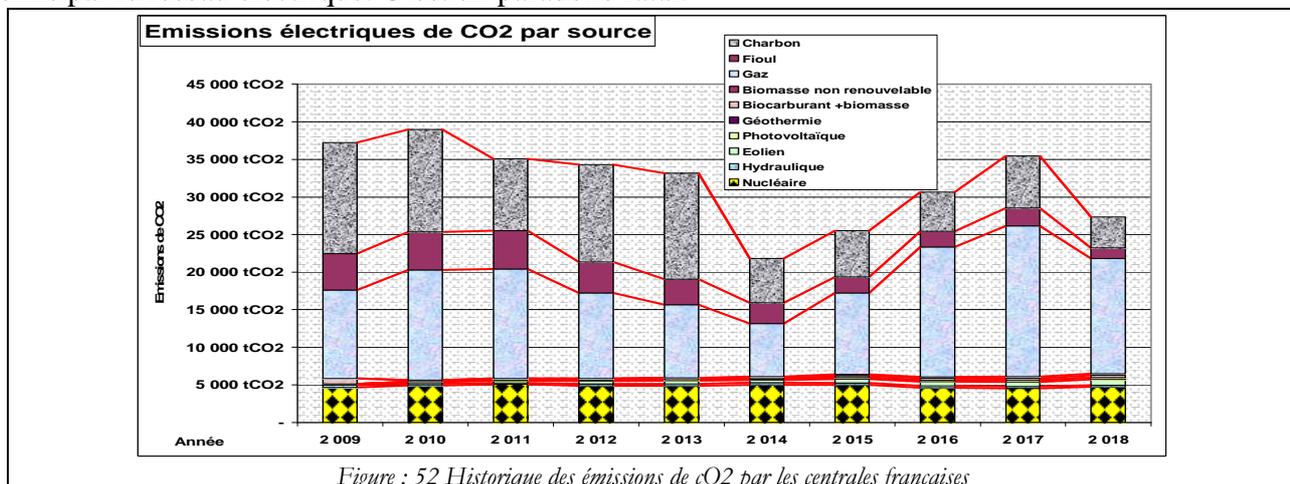


Figure : 52 Historique des émissions de CO₂ par les centrales françaises

5. 4 Les retombées économiques nulles de l'accroissement des renouvelables

On peut penser que les énergies renouvelables permettent d'économiser d'autres énergies. La vérité, c'est que c'est tout le contraire.

Certes lorsque les renouvelables produisent, il faut réduire la puissance des centrales nucléaires.

Cela économise un peu d'uranium. Même s'il a augmenté, le coût de l'uranium naturel est très inférieur à 1% du coût du nucléaire. L'économie de combustible est économiquement négligeable. Mais ces centrales ne pourront pas être arrêtées, ni momentanément, ni encore moins définitivement. Elles restent indispensables pour assurer l'équilibre du réseau électrique, lorsque le vent ne souffle pas ou que le soleil ne brille pas. En revanche, le coût de l'hydroélectrique et du nucléaire est le coût de l'amortissement actualisé des installations : barrage, centrale, usine d'enrichissement etc. Cela signifie que si le taux de charge de ces centrales baisse, autrement dit si elles produisent moins ou moins souvent, le coût d'amortissement ramené au kWh produit augmente en fonction de l'inverse du taux de charge.

Par exemple, si la production nucléaire passait de 75% à 50%, comme annoncé par Hollande, le coût de l'électricité nucléaire coûterait 50% de plus.

De plus, lorsque les renouvelables ne produisent pas, lorsque le vent tombe ou que les nuages cachent le soleil, il faut rapidement suppléer à leur défaillance, grâce à des centrales très réactives, comme les centrales à gaz. A cause des renouvelables, il faut les conserver et même il va falloir en construire de nouvelles si le taux de renouvelable croît.

Pour ces raisons, non seulement les énergies aléatoires éoliennes et photovoltaïques ont un coût, intrinsèque important, mais pour ces 2 raisons, elles renchérissent le coût des énergies maîtrisables de façon très importante et donc le coût de l'électricité.

5. 5 Le coût excessif du recours aux renouvelables

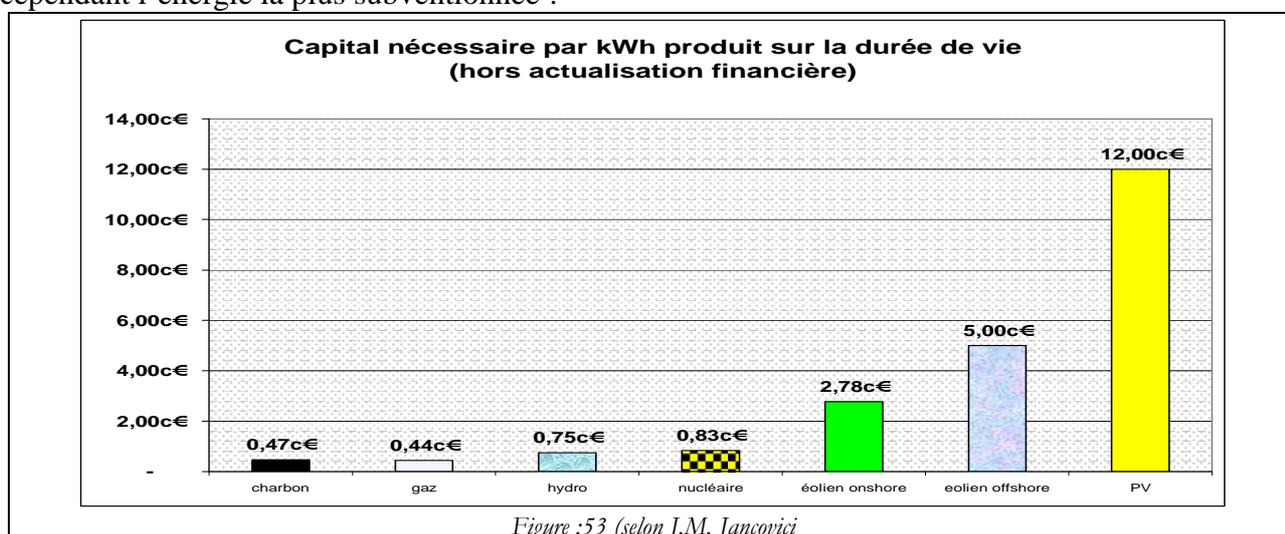
Le coût global d'une source d'énergie est la somme :

- ⇒ du coût d'amortissement des investissements initial et de démantèlement,
- ⇒ du coût de raccordement, d'autant plus élevé que la puissance des sources est réduite,
- ⇒ du coût des combustibles.

Nous allons montrer que le coût des renouvelables est bien plus élevé que le coût des énergies maîtrisables, à cause de leur caractère non maîtrisable, c'est-à-dire non seulement intermittent, mais aléatoire (donc peu prévisible) et fatal, c'est-à-dire à consommer en priorité.

5. 5. 1. Le coût des investissements

La Figure :53 donne le capital à investir par kWh produit. Contrairement à ce que beaucoup pensent, il apparaît que les renouvelables sont très coûteux et particulièrement le photovoltaïque, qui est cependant l'énergie la plus subventionnée !



A l'investissement, il faut ajouter les coûts de raccordement au réseau, calculé par l'OCDE et mentionné dans le rapport de la Cour des Comptes sur les renouvelables (2012). Ils sont donnés par la Figure :54.

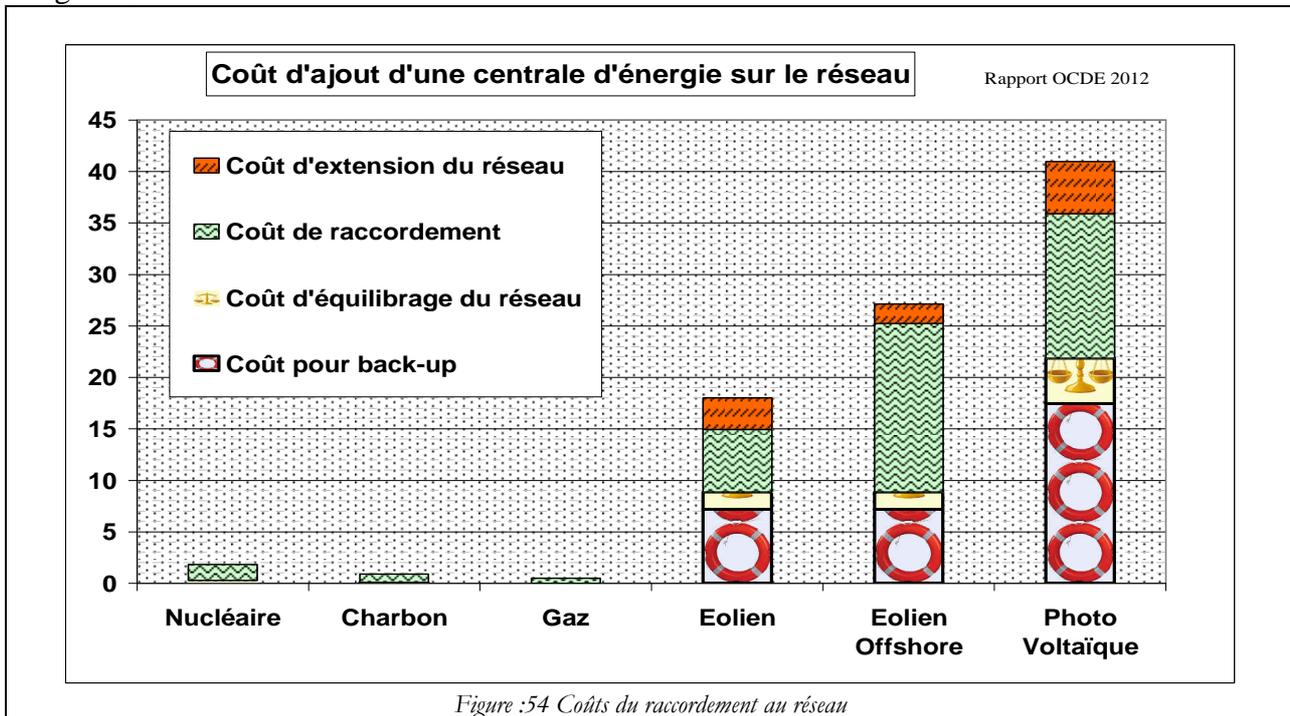


Figure :54 Coûts du raccordement au réseau

Ces coûts sont la somme des coûts d'extension du réseau, de raccordement, d'équilibrage du réseau et de repli (back-up). Il n'est pas étonnant de noter que les coûts de raccordement du photovoltaïque et de l'éolien offshore sont énormes.

L'équilibrage du réseau correspond notamment aux coûts de vente à perte ou négatifs, lorsque la puissance fournie est inutile, les achats d'énergie quand la puissance des renouvelables est insuffisante etc.

Les coûts de repli correspondent au coût de centrales maîtrisables disponibles en réserve qu'il faut faire intervenir pour suppléer aux renouvelables, lorsqu'ils ne produisent pas. Par exemple, pour lorsque le vent ne souffle pas, il faut recourir aux centrales à gaz.

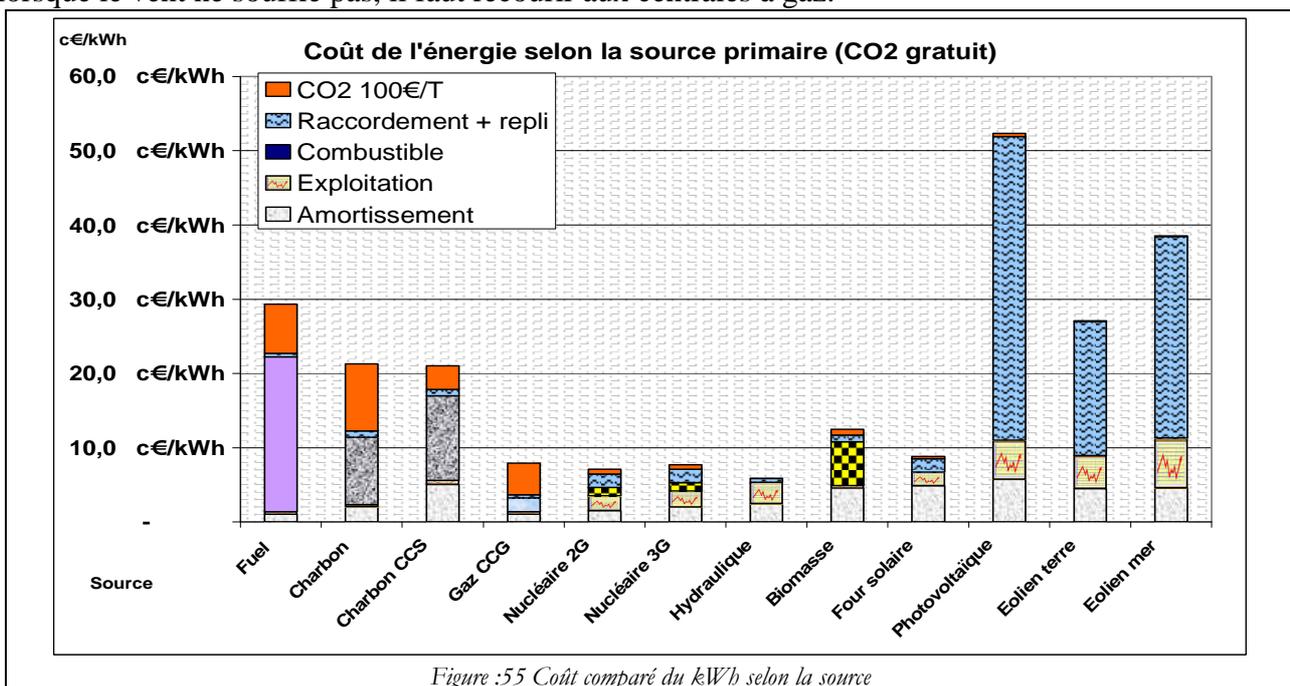
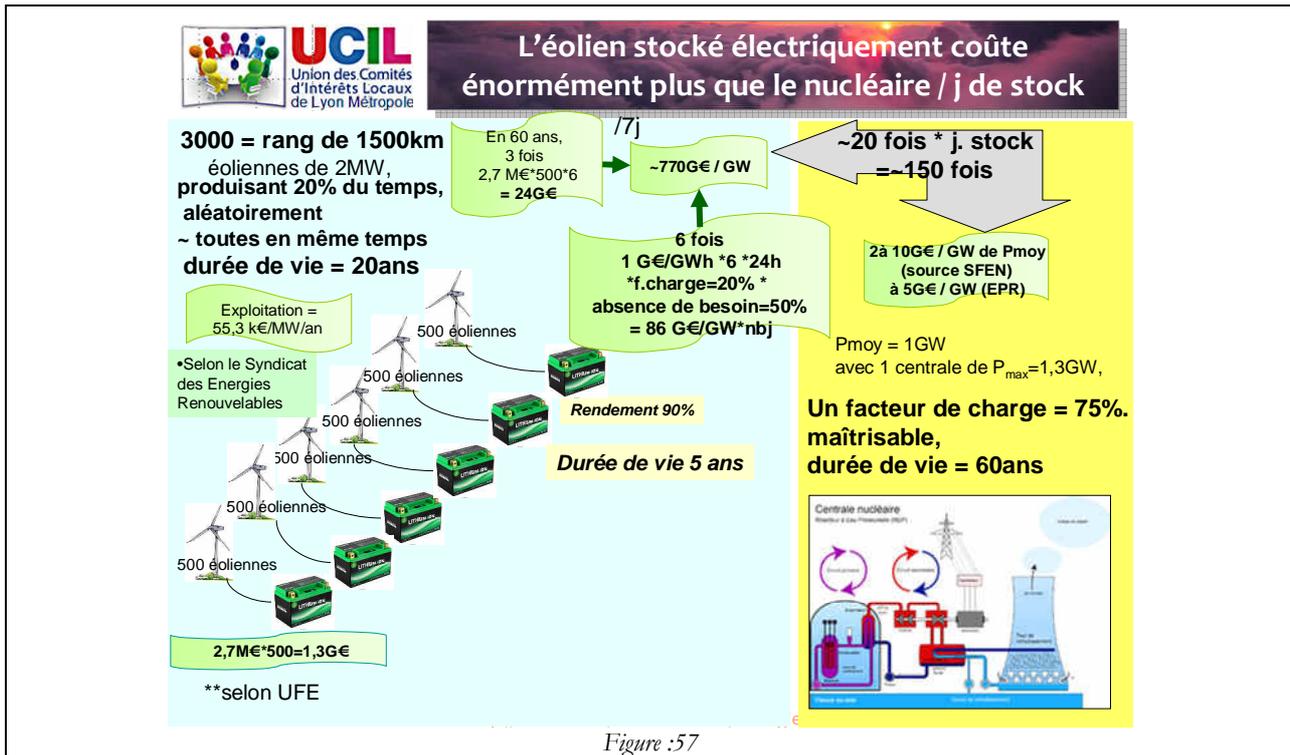
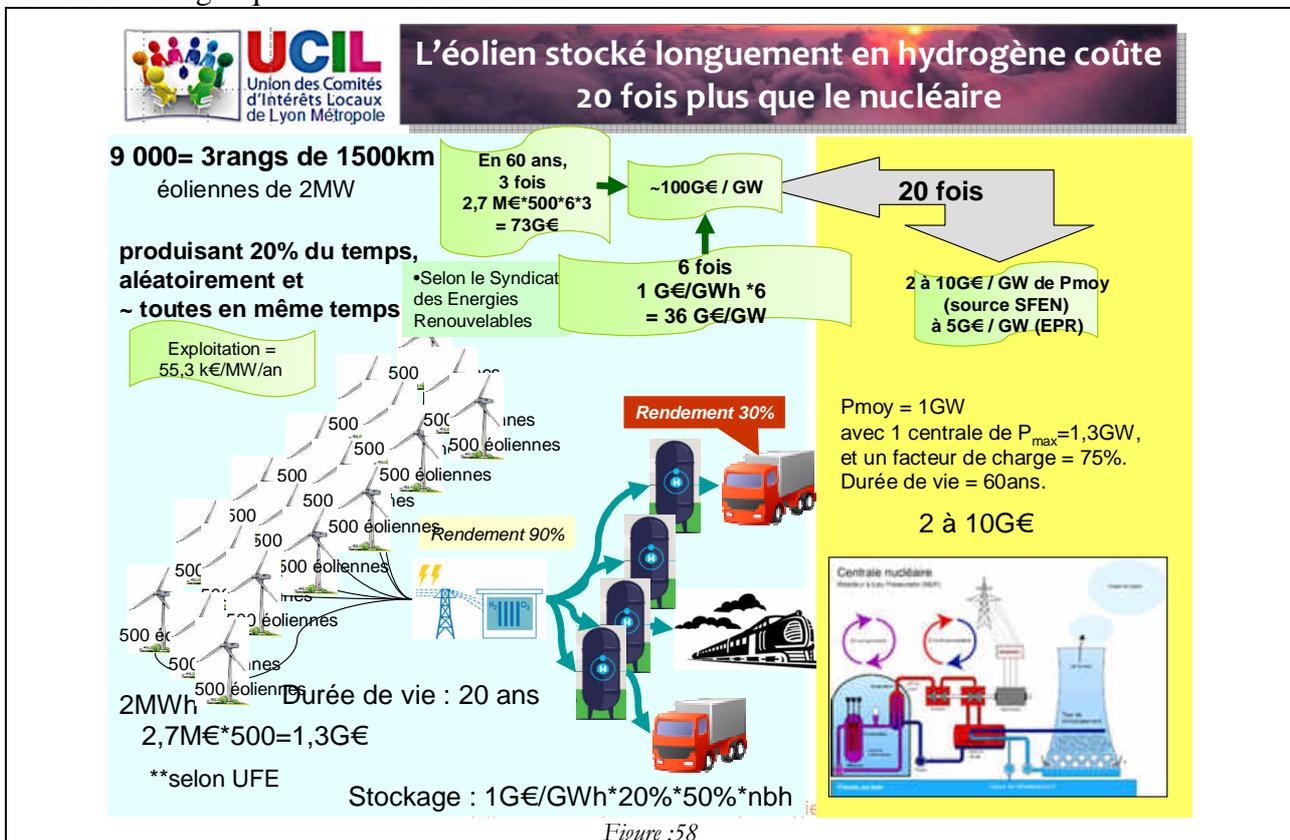


Figure :55 Coût comparé du kWh selon la source



Le stockage mécanique dans des rotors a un coût du même ordre, une longévité bien supérieure, mais un avenir sans amélioration.

Pour des stockages sur la durée, il est effectué de l'hydrolyse de l'hydrogène, avec un rendement satisfaisant (90% à chaud). Le problème aujourd'hui est que les piles à hydrogène pour voiture coûtent de l'ordre de 500€, que leur pérennité est limitée à quelques milliers d'heures et qu'enfin, le rendement énergétique est actuellement limité à 30%.



Des progrès très sensibles dans l'amélioration de l'utilisation de l'hydrogène sont espérés. L'hydrogène pose d'importants problèmes pratiques de stockage (pression, masse volumique faible, risques d'explosion...) et de distribution. Mais on peut espérer des améliorations futures, d'ici quelques décennies.

En résumé, même en combinant ces solutions de stockage :

Il faudra d'importantes recherches, d'importants investissements et au moins 20 ans avant que le stockage des énergies aléatoires les rende économiquement compétitives.

Ce délai et le coût est incompatible avec l'urgence des solutions pour le climat.

5. 5. 3. Le tarif de l'énergie en France

Le mix électrique français permet d'avoir un tarif de l'électricité française relativement bien placé vis-à-vis d'autres nations européennes. Cependant, ce coût est en croissance, car il est de plus en plus grevé par la taxe CSPE et la TVA qui porte sur cette taxe.

Le tarif moyen (résidentiels et non résidentiels) est donné par la Figure :59.

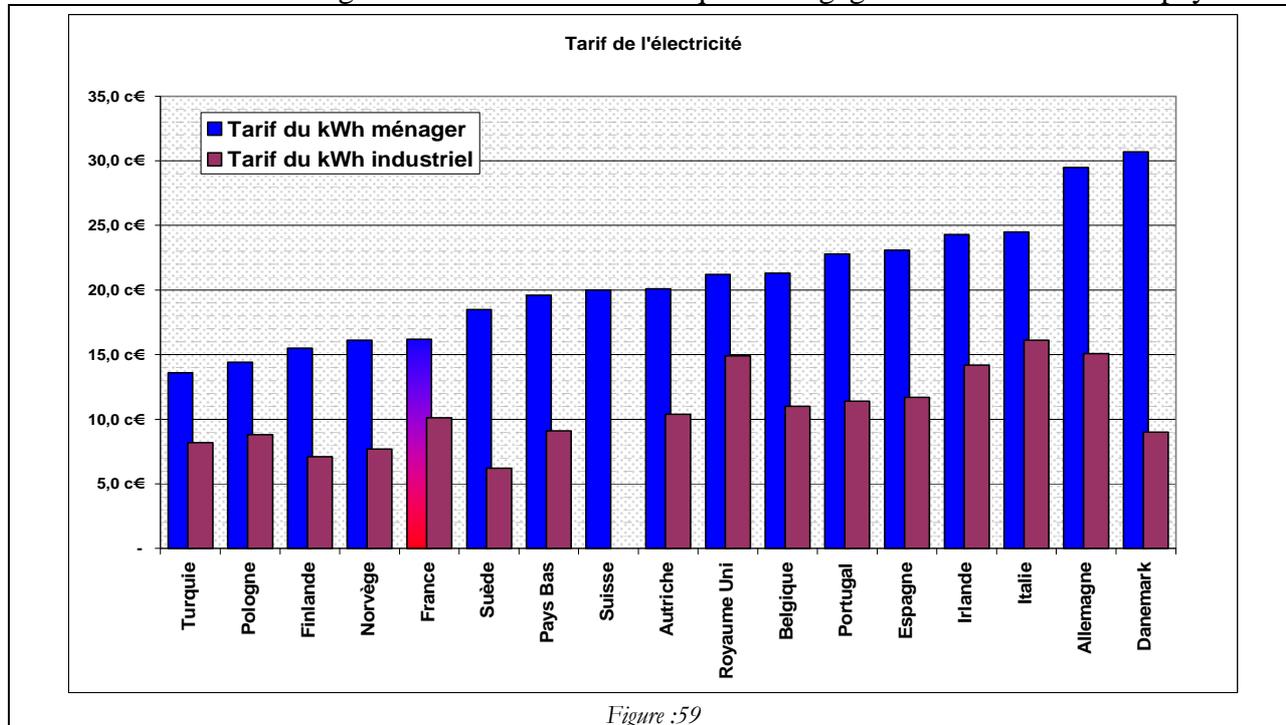
Cependant, le tarif de l'électricité comprend 3 parties à peu près équivalentes :

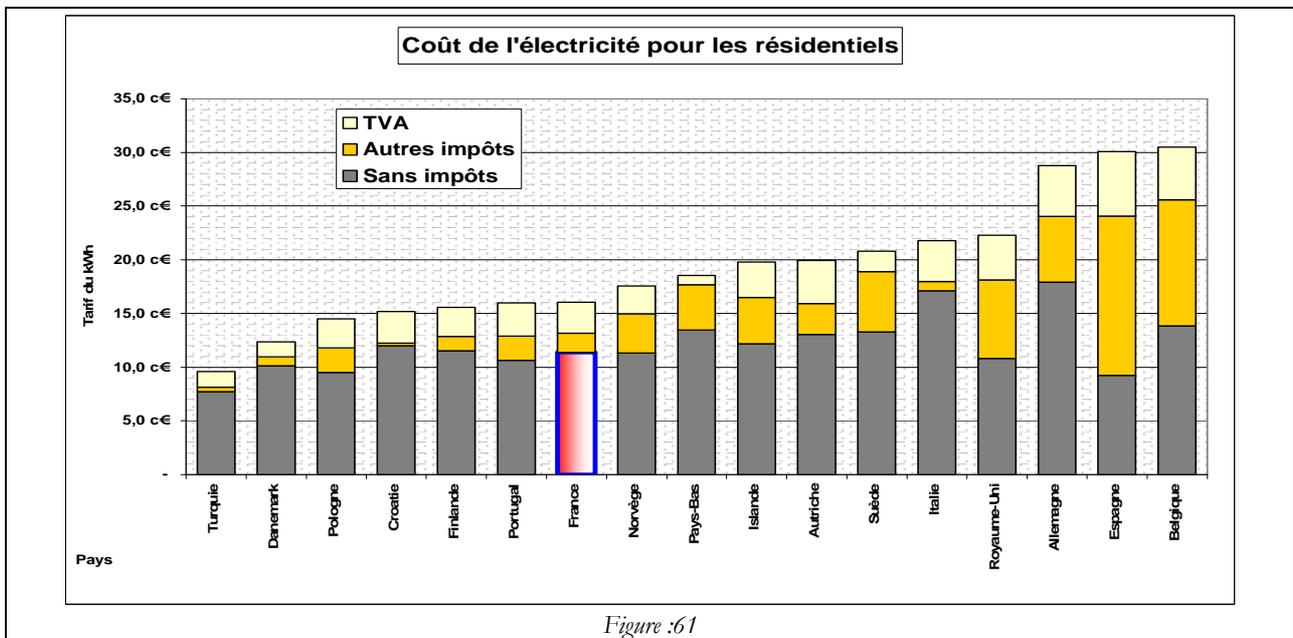
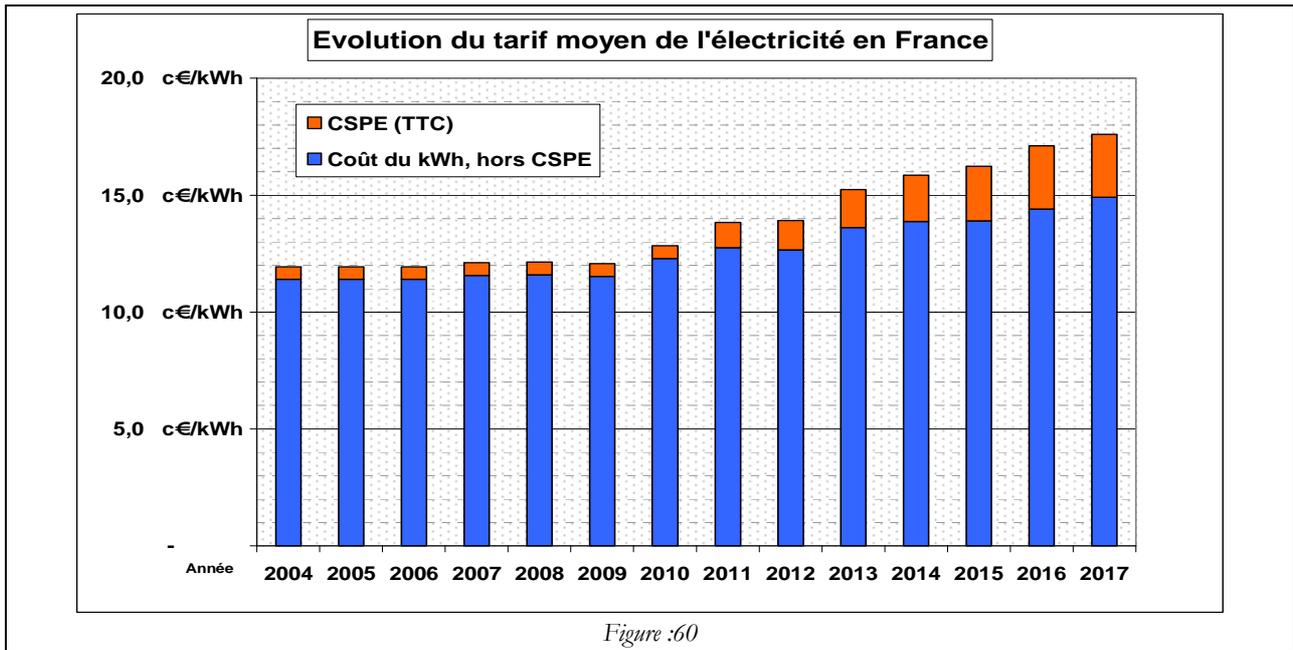
- ⇒ la production de l'électricité,
- ⇒ son transport et
- ⇒ les taxes.

En France une taxe importante est la CSPE (la TVA s'y rajoute) qui finance le surcoût des énergies renouvelables est de l'ordre de 30% du coût de production l'électricité, alors que le taux des énergies éoliennes et photovoltaïques est de l'ordre de 5% seulement.

Le taux élevé de la CSPE, TVA incluse, illustre les conséquences du fait que le recours aux renouvelables accroît sensiblement le coût de l'électricité.

Et cette taxe ne cesse d'augmenter au fur et à mesure que les engagements de l'état sont à payer.





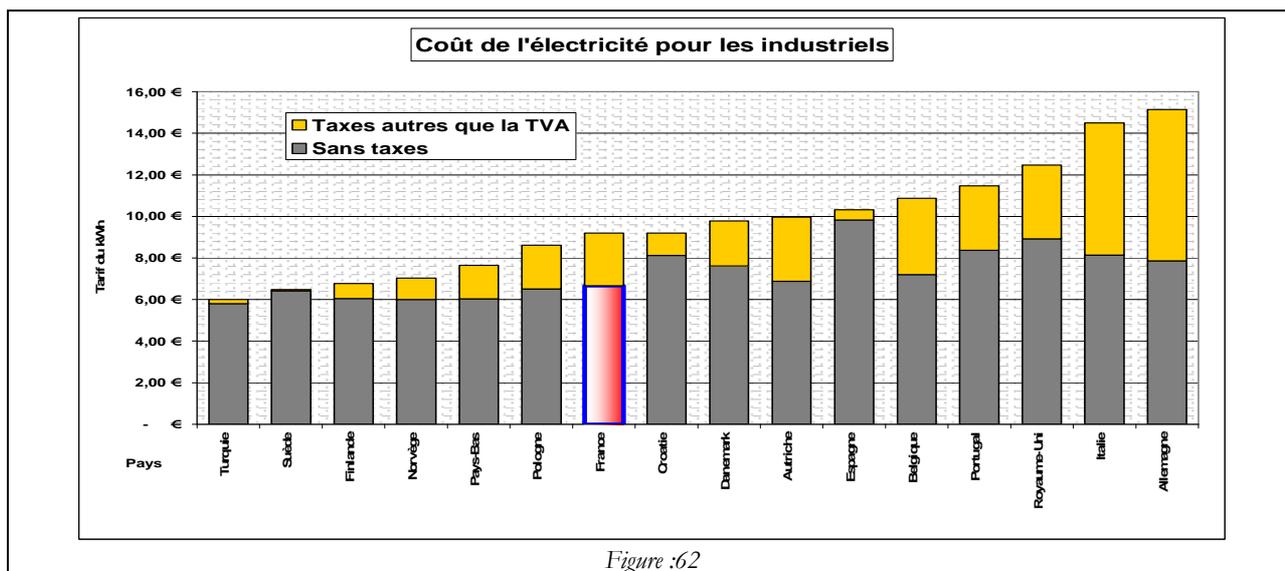


Figure :62

5.6 Le coût désastreusement élevé du soutien

Le soutien d'une installation se fait par un coût de rachat garanti du kWh (entre 5 c€/kWh et 108 c€/kWh, en moyenne 8,2c€/kWh). Or le coût du kWh au moment du rachat est donné par la bourse de l'énergie et fluctue énormément, de valeurs négatives quand les producteurs doivent se débarrasser d'électricité en surplus, à des coûts élevés (des dizaines d'euro/kWh), lorsque la production est insuffisante. Ce coût de l'électricité n'est pas accru significativement par une taxe carbone en raison de bons à émettre trop élevés. La différence entre le coût de rachat par RTE et le coût de la bourse est compensé par la CSPE.

Les courbes de la Figure :63 donne les surcoûts engagés pour l'éolien et le photovoltaïque et la simulation des versements dans les prochaines années.

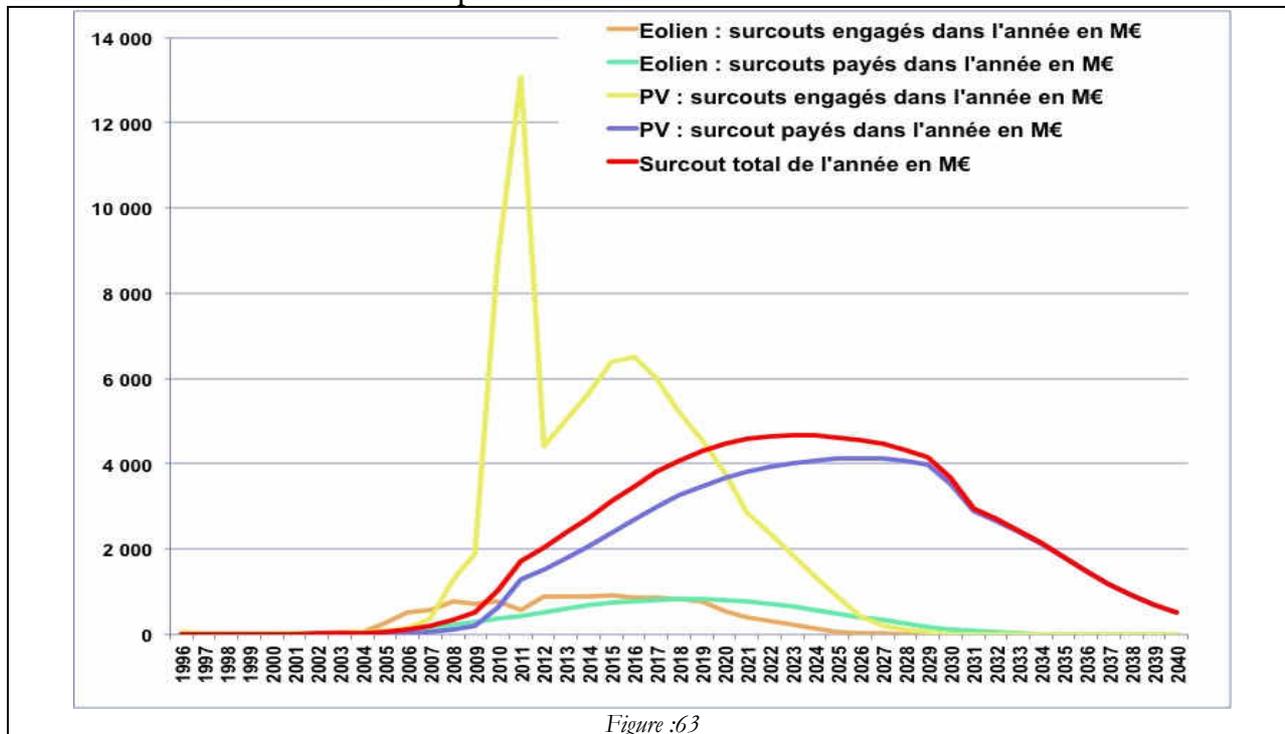


Figure :63

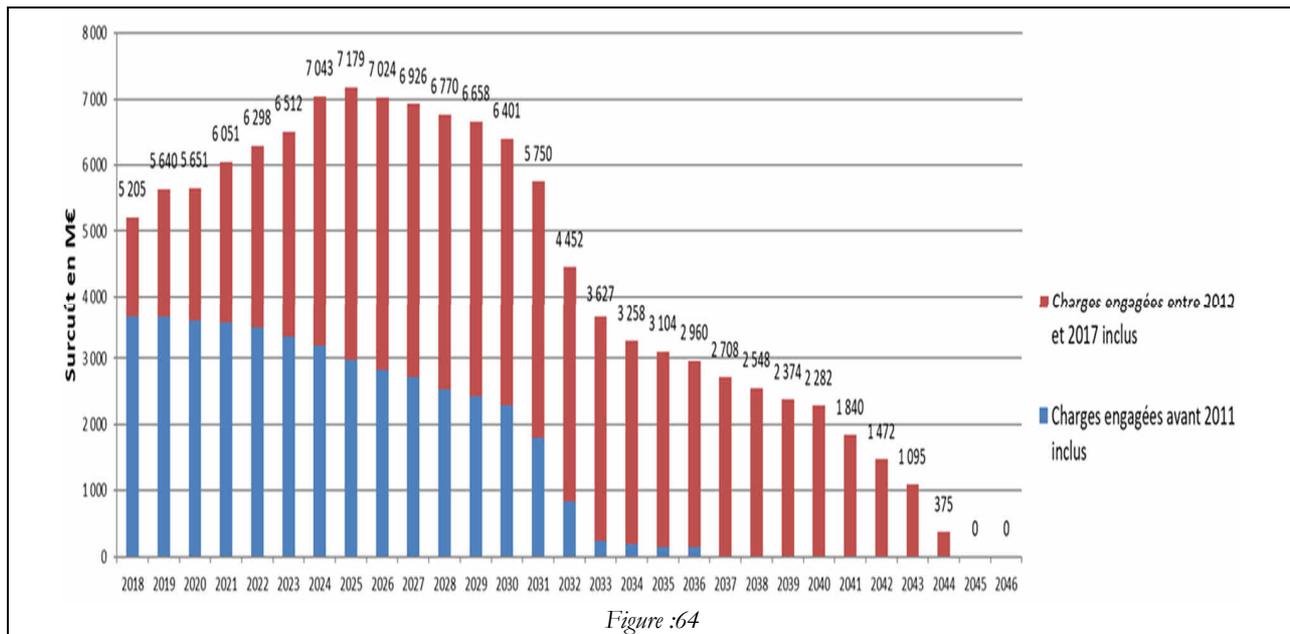


Figure :64

En faisant la somme des coûts ainsi engagés, on obtient le montant faramineux de plus de 120G€.

Avec ce montant, on aurait pu reconstruire en 2018 l'équivalent des 58 REP (réacteurs à eau pressurisée actuels), qui assureraient la totalité de la production nucléaire, alors que les énergies renouvelables en produisent 5% (soit à un coût de soutien plus de 20fois trop élevé) avec des émissions moitié moindre de CO₂.

5. 6. 1. Le bénéfice de la prolongation des centrales nucléaires

La loi sur la transition énergétique prévoit une réduction de 50% à 75% de l'origine nucléaire de l'énergie. Cela ne signifie en aucun cas que les centrales puissent être arrêtées et non remplacées.

Nous avons montré en effet que, pour réduire les émissions de CO₂, l'on ne pourrait pas se passer du nucléaire.

Les centrales actuelles ont entre 20 et 40 d'âge. Elles ont été construites pour fonctionner 40 ans. Cependant, la maintenance des centrales conduit à changer progressivement tous les éléments de la centrale. On sait que des REP du même modèle (Westinghouse) sont encore en fonctionnement aux USA au-delà d'un âge de 60 années. Il est donc pertinent de se demander pourquoi les 22 REP actuels ne pourraient pas continuer à fonctionner au-delà encore pour 10 ans, moyennant une révision appelée « grand carénage ».

Quel est l'intérêt financier de cette prolongation⁶ ?

Chaque réacteur de 1GW rapporte à EDF en moyenne : 200M€/an, soit 44G€ en 10ans.

Les coûts d'exploitation coûtent 50M€/an/réacteur, soit 11G€/10an /22REP.

Selon EDF, pour rénover, prolonger la durée de vie des centrales, améliorer la sécurité du parc, le "grand carénage" devrait coûter 55G€, soit environ 22 G€ pour les 22 REP.

Le gain pour EDF de prolonger pour 10 ans les REP serait donc de 11 G€ (= 44G€-33 G€).

Quel est le coût de la sous-exploitation des centrales nucléaires ?

⁶ Francis Sorin, conseiller du Pt de la Société Française d'énergie nucléaire (SFEN)

Si les réacteurs étaient utilisés à 50% seulement, les gains d'EDF seraient de 30G€ seulement. Dans ce cas, EDF ne gagnerait plus rien à exploiter les réacteurs rénovés, à prix de l'électricité constant et serait donc obligé d'augmenter ses tarifs.

5.7 En conclusion

L'arrêt du développement des éoliennes et des panneaux photovoltaïques est la solution pour stopper la gabegie économique actuelle.

Cela nous paraît indispensable pour donner les moyens d'investir dans la transition écologique :

- ⇒ dans la recherche pour améliorer les solutions de stockage de l'énergie (batterie et carburants alternatifs),
- ⇒ dans l'isolation des bâtiments,
- ⇒ dans la conversion du chauffage à l'électricité et à la climatisation,
- ⇒ dans l'électrification de la mobilité écologique (bus à gaz ou électriques),
- ⇒ dans le subventionnement des conversions vers des véhicules plus propres,
- ⇒ dans la modernisation et l'accroissement du ferroutage et des liaisons ferroviaires...

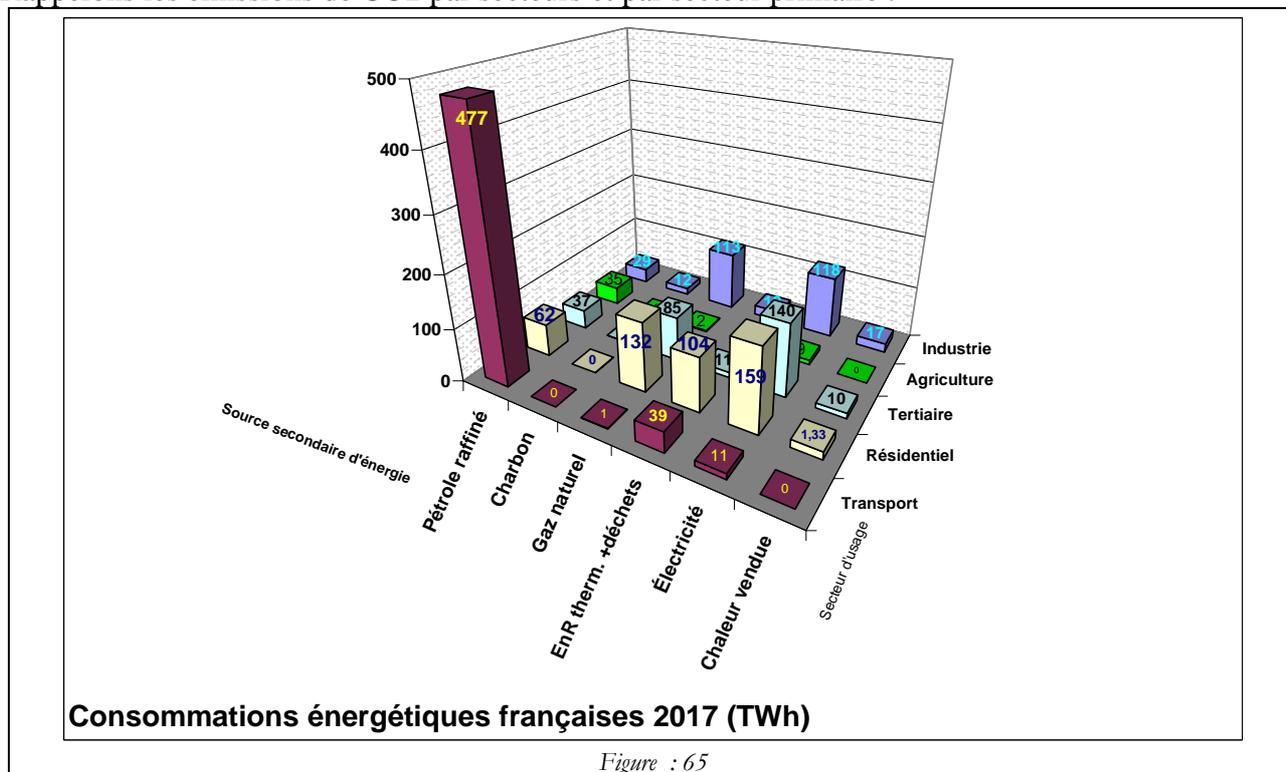
6 Quels leviers d'action pour atteindre le facteur 6

6.1 Rappel de la stratégie

La stratégie consiste à réduire le ratio (kg de CO₂ émis) / (kWh dépensé), en recourant à l'électricité. Les diminutions d'énergie à confort identique seront bienvenues.

Recherchons les 80% d'économies essentielles.

Rappelons les émissions de CO2 par secteurs et par secteur primaire :



Les 3 axes essentiels de solution mis en évidence par ce graphique sont :

- ⇒ la mobilité électrique ou aux carburants alternatifs décarbonnés,
- ⇒ l'isolation et la climatisation électrique,
- ⇒ acheter proche, français, voire suédois pour ce qui se transporte facilement.

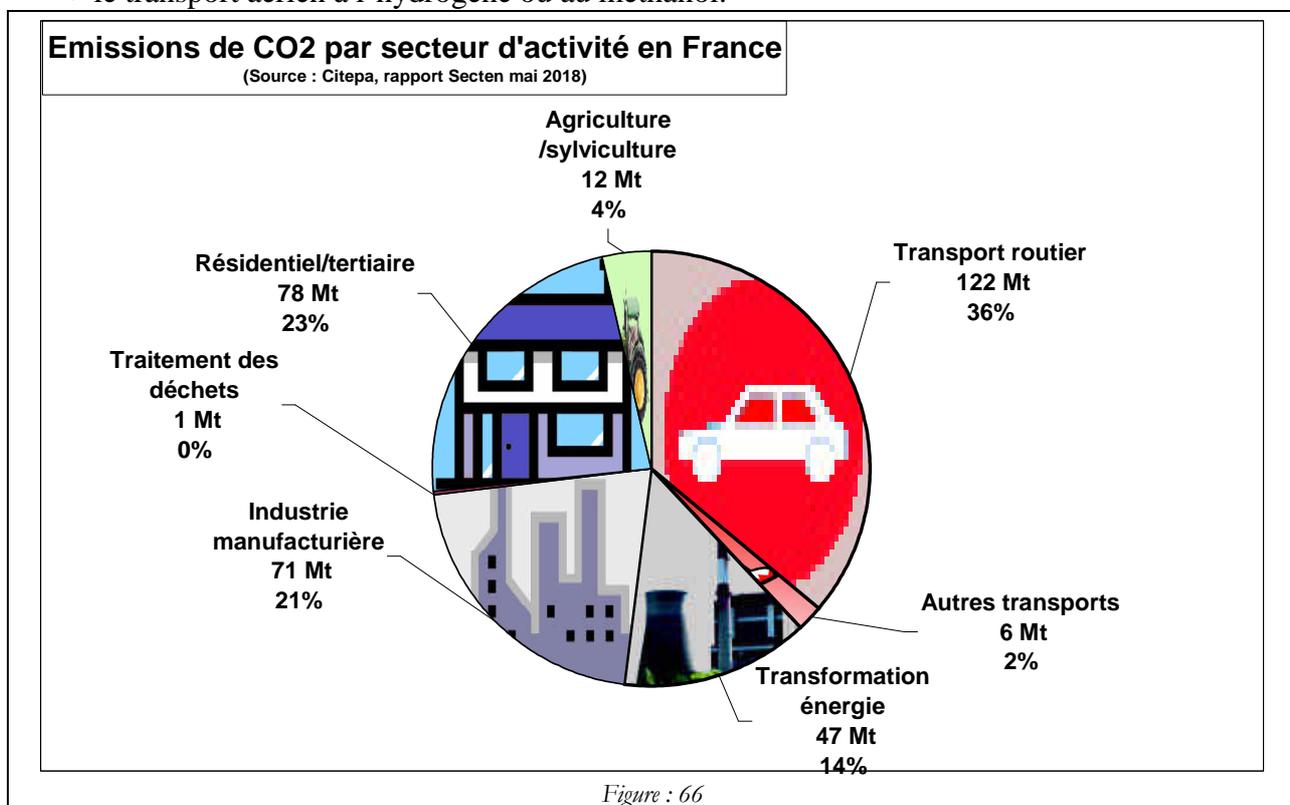
L'incitation devra forcément se faire par une taxe carbone élevée, si possible au niveau européen.

Mais il faut aussi se rappeler que la TICPE n'est rien d'autre qu'une taxe carbone particulière et qu'il faudrait ajuster et diminuer, mais qui n'a pas suffi pour diminuer la mobilité individuelle. Le changement de paradigme se fera un peu par les contraintes de la taxe mais bien plus par l'offre de nouvelles solutions sobres en énergie et en émissions de CO₂, comme les EDP.

C'est véritablement un changement de paradigme auquel la ville va devoir se convertir, pour assurer une mobilité sécurisée et commode à 4 types de modes de déplacements : la marche à pied, les EDP (actifs ou électriques, y compris les vélos), les voitures et les transports collectifs.

De façon plus détaillée, parmi les solutions plus ou moins disponibles actuellement citons :

- ⇒ le basculement du transport individuel au pétrole en transport électrique,
- ⇒ de même pour le transport du dernier km,
- ⇒ la conversion du transport par poids lourds au bioGNV, à l'hydrogène ou au méthanol,
- ⇒ le remplacement des bus diesel par Bus au bioGNV, des trolleybus et des bus électriques
- ⇒ l'accroissement du feroutage,
- ⇒ le transport aérien à l'hydrogène ou au méthanol.



Nous pensons également qu'en ville ou entre villes proches, il conviendrait de recourir à des moyens de transports innovants plus rapides, efficaces comme le SUPRAways. Ce serait une solution alternative au rail, qui est terriblement lourd et coûteux à faire évoluer.

Parmi les transports collectifs électriques à développer à Lyon, on peut donc citer :

- ⇒ des navettes fluviales (5M€/km), depuis Gerland vers la Cité Internationales et Vaise ;
- ⇒ une télécabine (10M€/km) pour gravir les collines (Ste Foy) et traverser les fleuves,
- ⇒ un Supraways (15M€/km) circulaire pour parcourir le périphérique, et pour relier St Fons à la porte Nord de Lyon, avec une bretelle le long du Rhône jusqu'à Perrache ou Bellecour ;
- ⇒ un métro (130M€/km) Est-Ouest, du plateau Ouest aux hôpitaux, via la Part Dieu.

6. 1. 1. En attendant, réduire les émissions de CO2 et de polluants

Enfin, comme cette évolution prendra des décennies, il faudra réduire les émissions de CO₂ des déplacements des véhicules thermiques. Or ces émissions sont fonction de la vitesse, comme l'indique les rapports du SETRA de 2009 sur les émissions atmosphériques des véhicules routiers et des variations de vitesse, selon les études suédoises, de Paul Höglund.

La pollution lyonnaise dépasse les seuils imposés par l'Union Européenne et provoque environ 500 décès prématurés. Chaque solution proposée à base d'énergie électrique conduira à améliorer sensiblement la qualité de l'air. En plus, il faudra faire circuler les véhicules thermiques, afin qu'ils consomment le moins possible et donc émettent le moins possible en centre-ville de CO₂ et de polluants, c'est à dire à vitesse constante entre 50km/h et 70km/h, pour réduire à la fois les émissions de CO₂, de PM et de NOx.

Concrètement, il faut :

- ⇒ synchroniser les feux tricolores, par une onde verte à 50km/h, sur tous les grands axes,
- ⇒ éviter les ralentisseurs,
- ⇒ éviter les zones 30, sauf dans des îlots sans circulation notable où on trouve des sorties d'école.

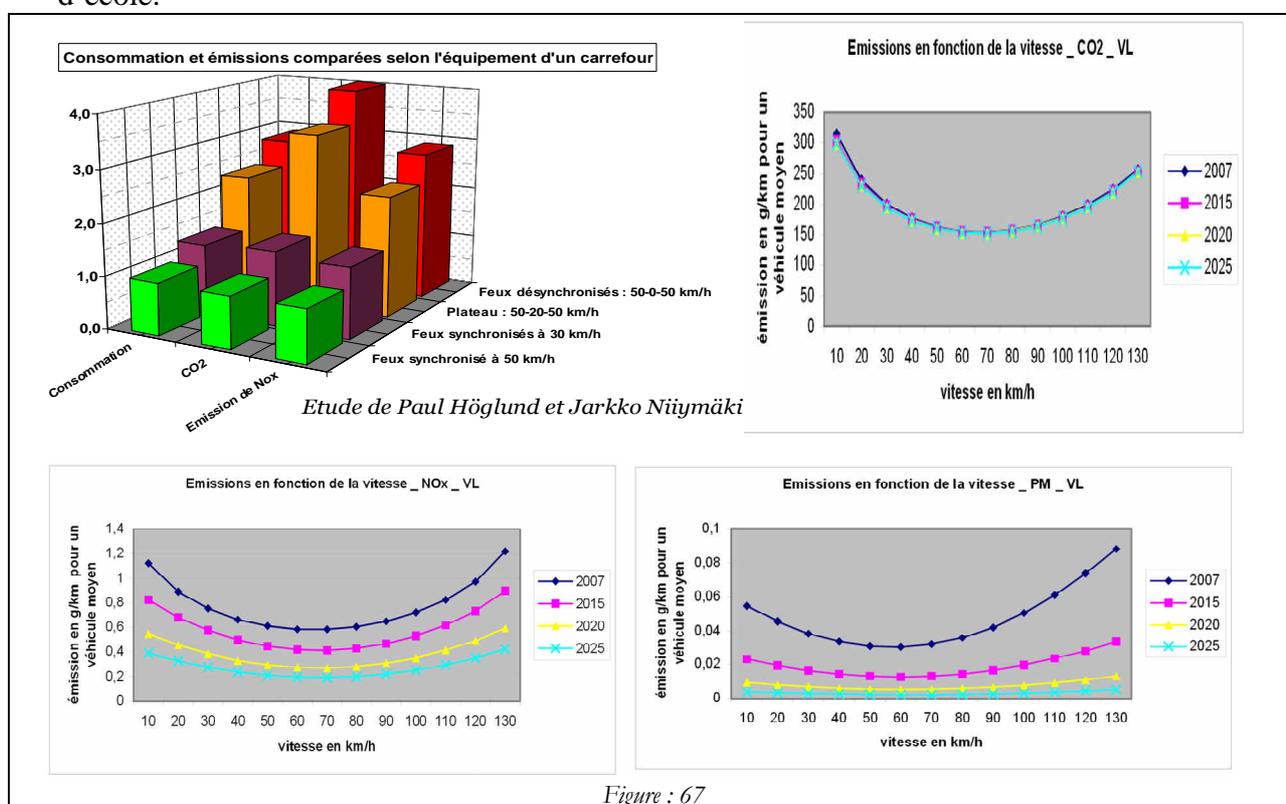


Figure : 67

6. 1. 2. Continuer à produire une électricité économique et non carbonée

Pour produire une électricité sans CO₂ à un coût abordable, (contrairement à ce que beaucoup pensent) il n'y aura pas d'autre solution, d'ici à 20 ans, que compléter la production actuelle par des EPR de 1,6GW et des ASTRID de 500MW (pour consommer le plutonium, plutôt que de le considérer comme un déchet).

Enfin, au fur et à mesure que le CO₂ émis diminuera, la part du méthane et du protoxyde d'azote s'accroîtra.

Solution de diminution d'énergie carbonnée	Objectif maximal
Isolation des bâtiments	~ 5 à 10 %
Climatisation	20 à 15 %
Véhicules individuels électriques et plus de TC	25%
Poids lourds au méthane et biocarburants	10% à 20%

Total des économies de CO2 identifiables	60% à 70%
Emissions de CO2 à trouver (PL, tourisme /avion, navires)	20% à 10%
Fret ferroviaire assoupli	???
Méthane et protoxyde d'azote agricoles	???

6.2 Conclusion

L'objectif du facteur 6 est extrêmement ambitieux. Mais, pour être admis, il ne doit pas être considéré comme trop contraignant à la fois par les populations et par les dirigeants.

Aussi, il importe de ne pas contraindre trop l'activité et le bien être des populations, mais de changer de type d'énergie, en misant d'abord sur :

- ⇒ l'énergie électrique décarbonnée maîtrisable, et
- ⇒ les agro-carburants et
- ⇒ en développant la recherche sur les solutions de stockage électriques et chimiques pour la mobilité et des générations d'énergies naturelles aléatoires,

Des progrès seront nécessaires avant de pouvoir développer utilement et économiquement les énergies aléatoires.

Les autres gaz à effet de serre ne devront pas être négligés.

Il faudra donc modérer :

- ⇒ les émissions de méthane par l'élevage, donc l'élevage des animaux les plus émetteurs et
- ⇒ les émissions de protoxyde d'azote par l'agriculture, générées par le surplus d'engrais azotés.

Néanmoins, il est probable que le facteur 6 soit extrêmement difficile à atteindre en France où la sensibilisation à la nécessité d'y arriver commence à apparaître, mais où le consensus sur des solutions efficaces n'existe pas.

Mais les espoirs d'évolution par l'étranger sont encore moins bons.

Peut-être, en désespoir de cause, les humains prendront-ils le risque d'appentis sorciers qui consisterait à émettre des aérosols pour accroître l'albédo de la planète ?
