POLLUTION THERMIQUE ET CLIMAT :
DANS QUELLE MESURE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE RÉCHAUFFE-T-ELLE LA PLANÈTE ?

Pourquoi cette interrogation ?



En novembre 2019, la société Orano (ex Areva) publiait dans le magazine Femina, diffusé par plusieurs titres de la presse quotidienne régionale, une publicité dont le message principal était :
« nucléaire : eh non, on ne réchauffe pas la planète ».
Ce slogan publicitaire était inscrit dans le panache d'une tour de refroidissement de centrale électrique. Or c'est l'équipement qui a précisément pour fonction de refroidir le condenseur de la machine à vapeur actionnée par la chaleur de fission atomique …qui réchauffe la planète. Contre l'évidence Orano n'avait pour seul argument qu'une mauvaise publicité.

Connaissant les activités, les mensonges habituels et les « exploits » d'Areva, sauvée de la faillite par 4,5 milliards d'euros d'argent public (nos impôts !), j'ai cherché à mesurer l'ampleur du nouveau mensonge d'Orano. J'ai alors constaté qu'en France, pays ayant la production d'électricité nucléaire par habitant la plus élevée au monde (plus de 5 600 kWh en 2017), les rejets de chaleur des réacteurs nucléaires sont considérables (équivalents à plus de 2,3 fois la totalité des consommations d'énergies pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire de l'ensemble des logements en France).

Fort de cet élément facilement vérifiable, j'ai donc décidé d'attaquer la publicité d'Orano auprès du Jury de Déontologie Publicitaire (JDP). Cette instance mise en place par l'Autorité de Régulation Professionnelle de la Publicité (ARPP), peut être saisie par tout un chacun lorsqu'une publicité semble « douteuse ». J'ai donc adressé ma plainte au JDP le 19 novembre 2019. Elle a été jugée recevable et examinée par le Jury le vendredi 6 mars 2020 (juste avant le premier confinement en France pour cause de COVID 19). Le 4 mai 2020, le JDP a publié son avis sur cette publicité, qui avait en réalité fait l'objet de trois plaintes : par ordre chronologique, la mienne, celle d'un enseignant-chercheur observateur attentif des pratiques publicitaires et celle de l'association « Réseau Sortir du Nucléaire ». Le Jury a considéré que la publicité d'Orano méconnaissait plusieurs points de la Recommandation « Développement durable » de l'ARPP et de l'article D1 du code de la Chambre Internationale de Commerce (ICC) et a donc donné raison aux trois plaignants. L'avis du JDP est en ligne sur le site internet de l'ARPP[1].

Malgré ce couac dans la campagne publicitaire menée par Orano, il n'y a eu aucune conséquence pour cette entreprise : ni obligation de publier un rectificatif public dans les journaux qui avait diffusé la publicité, ni pénalisation quelconque. Orano a continué à diffuser ses mensonges sur les qualités supposées de l'énergie nucléaire.
Cela m'a poussé à poursuivre mes recherches d'informations permettant d'identifier l'ampleur de la pollution thermique de l'industrie nucléaire qui, à l'évidence, réchauffe bien la portion de la planète limitée à la France.

[1] https://www.jdp-pub.org/avis/orano-presse-internet-plaintes-fondees/

Je suis alors tombé un peu par hasard sur une étude[2], initiée par le Préfet coordonnateur du bassin Rhône-Méditerranée et réalisée par EDF, qui caractérise l'impact des rejets thermiques des centrales nucléaires sur le Rhône. L'augmentation de température attribuable aux centrales nucléaires, constatée en moyenne annuelle entre les périodes 1977-1987 et 1988-2010, est de 1,2°C entre l'amont et l'aval des centrales situées au bord du Rhône. En période chaude, c'est-à-dire en moyenne sur les 18 jours les plus chauds de l'année, cette augmentation de température atteint même 1,6°C.
La pollution thermique des réacteurs nucléaires met en péril les rivières, les fleuves, les mers et les océans…et tout ce qui y vit. Mais l'augmentation de température constatée dans les eaux du Rhône ne met en évidence qu'une petite partie du problème. La majeure partie des rejets de chaleur des réacteurs nucléaires se fait dans l'air, par les tours de refroidissement des réacteurs qui en sont équipés pour réduire les prélèvements d'eau des fleuves, et directement dans l'eau de mer pour ceux qui s'en trouvent à proximité.

Tout cela m'a donc conduit à poursuivre mes investigations et à rédiger et diffuser le présent document qui traite des pollutions thermiques et du réchauffement climatique, conséquences de toutes les consommations d'énergies.

Dans le texte qui suit, à partir des consommations d'énergies primaires (fossiles, nucléaire et renouvelables), j'identifie un indicateur annuel de pollution thermique à l'échelle de la planète, de l'Union Européenne et de la France métropolitaine.
Pour ces mêmes échelles géographiques, à partir des émissions de gaz carbonique résultant de l'ensemble des consommations d'énergies fossiles, j'établis un indicateur annuel de « forçage radiatif d'origine anthropique », sur la base d'un modèle de calcul simplifié (relation de G. MYHRE).
Enfin, je compare, entre eux et entre zones géographiques, la pollution thermique et le forçage radiatif dans l'optique qu'ils s'additionnent et conduisent au réchauffement global de la planète.

La conclusion de mes investigations est que l'énergie nucléaire provoque une pollution thermique du même ordre que celle des énergies fossiles, pour la portion de la planète limitée à la France. Et c'est ainsi que l'énergie nucléaire constitue le tiers de la pollution énergétique totale, somme de la pollution thermique et du « forçage radiatif d'origine anthropique », conduisant tous deux au réchauffement global. Pourtant elle fournit moins du cinquième de l'énergie finale consommée.
La France, avec un part de 70%[3] de son électricité produite par le nucléaire, alors qu'elle est de 25% dans l'Union Européenne[4] et de 10% au niveau mondial[5], réchauffe la planète de manière

[2] Etude thermique du fleuve Rhône – Rapport de synthèse – Mai 2016
https://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/sites/sierm/files/content/migrate_documents/EtudeThermiqueRhone-Plaquette-Mai2016.pdf
[3] 67,1% en 2020, en baisse de 11,6% par rapport à 2019 selon le « Bilan électrique français 2020 » publié par RTE
https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilans-electriques-nationaux-et-regionaux
[4] 25% en 2020, en baisse de 10% par rapport à 2019, selon l'étude EMBER et Agora Energiwende publiée en janvier 2021 et citée par Euractiv
https://www.euractiv.fr/section/energie/news/renewables-overtook-fossil-fuel-as-main-source-of-eus-electricity-in-2020/
https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2020_01_EU-Annual-Review_2020/A-EW_202_Report_European-Power-Sector-2020.pdf
[5] 10,3% en 2019, stable par rapport à 2018, selon le World Nuclear Industry Status Report
https://www.worldnuclearreport.org/

significative, autant que la moyenne de ses voisins européens et beaucoup plus que la moyenne des autres pays du monde.

Si vous voulez connaître le détail des raisonnements et des calculs qui m'ont conduit à ces conclusions, et à quelques autres, lisez ce qui suit.

1/ Toute consommation d'énergie extraite du sous-sol, et qualifiée d'énergie primaire, réchauffe la planète

La notion de « forçage radiatif d'origine anthropique » est généralement utilisée pour caractériser l'impact des consommations d'énergies fossiles, et d'un ensemble d'activités humaines (agricoles, industrielles, d'aménagements, ..), sur le réchauffement climatique. Le raisonnement associé à cette notion est que les émissions de gaz à effet de serre, et principalement de CO_2, liées aux combustions d'énergies fossiles et aux autres activités humaines (c'est-à-dire d'origine « anthropique »), augmentent l'effet de serre naturel ou « forçage radiatif naturel » (c'est-à-dire indépendant des activités humaines). Ce déséquilibre du bilan énergétique du système «Planète Terre », c'est-à-dire de la somme algébrique de l'énergie qui entre et de celle qui sort vers le cosmos, conduit à une augmentation de la température moyenne de la Planète. Le rayonnement solaire «emprisonné» par l'atmosphère terrestre, du fait de l'accroissement anthropique de l'effet de serre, serait donc l'unique facteur de réchauffement climatique.

Pourtant, qu'elles soient d'origine fossile (charbon, pétrole, gaz) ou issues de l'uranium (énergie nucléaire), toutes les énergies primaires utilisées[6] se transforment en chaleur lors de la combustion ou lors de la fission atomique. La dégradation de l'énergie en chaleur est une loi de la physique. Une autre loi de la physique est que l'énergie se conserve. Par conséquent toutes les énergies primaires utilisées depuis le début de la période industrielle ont été dégradées en chaleur qui s'est accumulée dans les sols, dans l'air et dans l'eau en augmentant le niveau moyen de température de ces milieux. Il n'y a donc aucune raison de ne pas prendre en compte ces « pollutions thermiques » dans le calcul du bilan énergétique du système « Planète Terre ». Et pour cela il faut les caractériser et les quantifier. Une étude scientifique à ce sujet, pour la période allant de 1880 à 2000, a d'ailleurs été publiée en 2009 dans l'International Journal of Global Warming[7]. Elle montre que l'élévation de la température moyenne de l'eau de surface des océans et de surface terrestre, constatée au cours de la période d'observation s'explique à plus de 70% par les émissions de chaleur dues à l'ensemble des activités humaines. Les autres causes du réchauffement climatique, qui contribuent pour moins de 30% à l'élévation de température constatée, peuvent être le résultat de variations naturelles de l'intensité du rayonnement solaire, du forçage radiatif dû aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre et/ou de la sous-estimation des émissions de chaleur d'origine anthropique (c'est-à-dire de ce que je désigne sous le terme de pollution thermique).

[6] Même les énergies renouvelables dérivées du rayonnement solaire (biomasse, hydraulique, éolien, solaire thermique et photovoltaïque) et la géothermie, se transforment en émissions de chaleur dans l'environnement lors de leur utilisation. Mais, mis à part pour la biomasse, elles ne s'ajoutent pas à celles des énergies fossiles et de l'énergie nucléaire car il n'y a pas «consommation » mais uniquement « dérivation » d'une partie du rayonnement solaire incident converti au final en chaleur.

[7] Global energy accumulation and net heat emission - Bo Nordell and Bruno Gervet
https://www.researchgate.net/publication/229038139_Global_energy_accumulation_and_net_heat_emission

Pour l'impact à court terme (au pas de temps annuel par exemple) des consommations d'énergies primaires on peut déterminer le « forçage radiatif d'origine anthropique » correspondant aux émissions de CO_2 liées aux combustions d'énergies fossiles, c'est à dire le rayonnement solaire «emprisonné» par l'atmosphère terrestre du fait de l'accroissement de l'effet de serre par ces émissions.
Pour l'année 2017, sa valeur était de l'ordre de 55.5 gigajoules (GJ) par personne à l'échelle de la planète, l'Union Européenne (28 pays) étant 1,4 fois plus émettrice que la moyenne mondiale et la France métropolitaine un peu au-dessus de la moyenne mondiale (en supposant l'énergie nucléaire exempte d'émissions de CO_2, ce qui n'est pas le cas).
A ce forçage radiatif s'ajoute la pollution thermique résultant de toutes les consommations d'énergies primaires (fossiles, nucléaire, biomasse) finalement dégradées en chaleur une année donnée et pour une zone géographique particulière. On peut la calculer en divisant le total des énergies primaires consommées par le nombre d'habitants de la zone géographique observée.
Pour l'année 2017, sa valeur était de l'ordre de 78,5 gigajoules (GJ) par personne à l'échelle de la planète, l'Union Européenne (28 pays) étant 1,7 fois plus émettrice que la moyenne mondiale et la France métropolitaine 2 fois plus.
La pollution énergétique totale, cumul de la pollution thermique et du forçage radiatif d'origine anthropique, était donc en 2017 de l'ordre de 134 gigajoules (GJ) par personne à l'échelle de la planète, l'Union Européenne (28 pays) étant 1,58 fois plus émettrice que la moyenne mondiale et la France métropolitaine 1,61 fois plus.

A ce stade du raisonnement, et des calculs au pas de temps annuel, je constate que :

- la part de la pollution thermique est plus élevée que la part du « forçage radiatif d'origine anthropique », quelle que soit l'échelle géographique à laquelle on se place ; le réchauffement de la planète lié aux consommations d'énergies primaires provient de manière prépondérante des émissions directes de chaleur et de manière secondaire et indirecte de l'accroissement de l'effet de serre lié aux émissions de CO_2 issues des combustions;
- la France métropolitaine, par le cumul de la pollution thermique et du forçage radiatif d'origine anthropique, réchauffe plus la planète que la moyenne des pays de l'Union Européenne;
- la pollution thermique provoquée par l'énergie nucléaire, à l'échelle de la France où elle fournit 70% de l'électricité, est une cause non négligeable de réchauffement.

Dans ces conditions, ne pas tenir compte de la pollution thermique et considérer les émissions de gaz à effet de serre comme cause principale du réchauffement climatique n'est pas une approche correcte d'un point de vue scientifique. Elle l'est d'autant moins que les émissions de chaleur d'origine anthropique, identifiées par la publication scientifique citée précédemment comme cause principale de réchauffement du climat, conduisent à augmenter la teneur de l'atmosphère en vapeur d'eau, principal gaz à effet de serre. Et cet accroissement d'origine anthropique ne doit pas non plus être négligé dans une approche du réchauffement climatique scientifiquement fondée, même si le rôle de la vapeur d'eau fait l'objet de débats.

2/ Les réacteurs nucléaires réchauffent plus la planète que de nombreuses technologies actuelles de production d'électricité

Parmi toutes les techniques courantes de production d'électricité, la centrale nucléaire est celle qui émet le plus de chaleur par kilowattheure produit.
C'est la raison pour laquelle les centrales nucléaires nécessitent de grandes quantités d'eau pour être refroidies. Et c'est pourquoi elles sont construites au bord des fleuves, des mers ou des océans.
Pour donner un ordre de grandeur, le rendement de conversion en électricité, de la chaleur dégagée par la fission nucléaire à l'intérieur d'un réacteur, est à peine supérieur à 30%[8].
Les centrales à charbon actuelles ont un rendement de l'ordre de 40% qui peut aller jusqu'à 45% pour les plus récentes. Certaines d'entre elles fonctionnent en cogénération (en Allemagne notamment[9]) c'est-à-dire qu'une partie de la chaleur produite est utilisée pour le chauffage de bâtiment et l'autre partie convertie en électricité. Le rendement global de conversion en énergie utile (électricité et chaleur) peut alors atteindre 60%.
Les centrales à gaz ont des rendements de conversion d'énergie primaire en électricité qui vont de 40% (turbines à combustion) à 60% pour les plus performantes (centrales à cycle combiné associant une turbine à combustion et une chaudière couplée à une turbine à vapeur). EDF s'est d'ailleurs vantée d'avoir construit la centrale à cycle combiné la plus performante au monde avec un rendement de plus de 61%[10].
Et il est possible d'améliorer ce rendement (pour atteindre près de 90%) par la cogénération de chaleur et d'électricité. De nombreux réseaux de chaleur (qualifiés également de chauffage urbain) en Europe sont équipés de telles installations pour minimiser les consommations d'énergies fossiles, les coûts de chauffage et …les émissions de gaz à effet de serre. Malheureusement, le gouvernement actuel semble vouloir éliminer du paysage énergétique français ce mode d'utilisation efficace de l'énergie alors qu'il alimente de nombreux réseaux de chauffage urbain mais aussi des sites industriels et des serres horticoles.

C'est ainsi qu'en France en 2017, la pollution thermique résultait pour près de la moitié de l'énergie nucléaire et pour à peine plus de la moitié des énergies fossiles et des autres énergies (biomasse et déchets)
Si l'on ajoute le « forçage radiatif d'origine anthropique » à la pollution thermique, la part de l'énergie nucléaire (sous-estimée) était supérieur au tiers de la pollution énergétique totale, celle des énergies fossiles et des autres énergies primaires (biomasse et déchets) en constituant les deux tiers.
Pourtant la part de l'énergie nucléaire dans l'approvisionnement en énergies finales de la France métropolitaine en 2017 n'a été que de 19,5%. On peut donc dire que la pollution énergétique totale

[8] Cette valeur est d'ailleurs surestimée car toute la chaleur dégagée depuis l'entrée de l'uranium en France jusqu'au stockage à long terme des déchets nucléaires n'est pas prise en compte dans le calcul. Ne sont pas comptés, par exemple, les dégagements de chaleur des «combustibles usés», extraits périodiquement des réacteurs pour être remplacés par des «combustibles neufs» et qui doivent être refroidis pendant plusieurs années pour éviter leur fusion et la dispersion de radioactivité dans l'environnement.

[9] Centrale à charbon Datteln 4 en Rhénanie-du-Nord-Westphalie
https://allemagne-energies.com/tag/centrale-a-charbon-datteln-4/
[10] La centrale électrique de Bouchain entre au Guiness Book des records pour sa performance
https://france3-regions.francetvinfo.fr/hauts-de-france/nord-0/valenciennes/centrale-electrique-bouchain-entre-au-guiness-book-records-sa-performance-1027303.html

due à l'énergie nucléaire est proportionnellement plus importante que celle des autres énergies primaires, pour ce qui concerne la France métropolitaine.

A partir de ces observations on peut se poser la question, indépendamment de toute autre considération économique, environnementale ou technique, de la justification de l'énergie nucléaire dans le cadre d'une politique d'atténuation du réchauffement climatique.
Une simulation réalisée à l'échelle de la France avec les données de l'année 2017 montre que la pollution énergétique totale serait réduite de l'ordre de 9% avec une production d'électricité par centrales à gaz à haut rendement (60%) remplaçant en totalité la production d'électricité par réacteurs nucléaires. Et une autre simulation réalisée à partir des données 2017 de production d'électricité en France montre que la pollution énergétique totale a été de 10,38 mégajoules (MJ) par kWh électrique produit par les centrales à gaz alors qu'elle a été de 11,61 mégajoules (MJ) par kWh électrique produit par les centrales nucléaires.

L'argument du respect des engagements climatiques, avancé par le gouvernement français pour repousser de 2025 à 2035 la réduction à 50% de la part du nucléaire dans la production d'électricité, ne tient donc pas la route.

3/ Les émissions de gaz à effet de serre du nucléaire ne sont pas nulles

J'ai fait jusque-là l'hypothèse simplificatrice que les émissions de gaz à effet de serre de l'industrie nucléaire, nécessaire au fonctionnement des réacteurs de production d'électricité, sont nulles. Or ce n'est pas la réalité.

Pour ce qui concerne les mines d'uranium et les usines de transformations de celui-ci en «yellow-cake», toutes situées hors de France, des émissions de gaz à effet de serre ont bien lieu. Mais elles sont réalisées hors de France. Elles contribuent bien au réchauffement global et constituent une partie de « l'empreinte climatique » de la France hors de ses frontières géographiques. Elles devraient lui être attribuées.

Pour ce qui concerne les installations situées en France, de traitement de l'uranium, d'enrichissement, de fabrication de « combustibles neufs » et de retraitement de « combustibles usés » il y a bien des consommations d'énergies fossiles et d'électricité entraînant des émissions de CO_2 en France. Elles sont prises en compte dans les émissions globales liées aux consommations d'énergies primaires. Mais par contre les émissions d'autres gaz à effet de serre, qui sont aussi des polluants (protoxyde d'azote, CFC/HCFC/HFC, hexafluorure de soufre), ne sont pas prises en compte dans les calculs de forçage radiatif simplifiés réalisés pour le présent article.

Les tours de refroidissement des réacteurs nucléaires émettent de la vapeur d'eau, principal gaz à effet de serre. Mais ces émissions ne sont pas prises en compte dans les calculs de « forçage radiatif d'origine anthropique ». La raison avancée par les spécialistes des questions climatiques est que la vapeur d'eau a un très faible temps de séjour dans l'atmosphère, bien inférieur à celui du CO_2 et des autres gaz à effet de serre. Une autre raison avancée est que la quantité de vapeur d'eau générée par les activités humaines est très faible par rapport aux quantités mises en jeu par les phénomènes naturels (évaporation des plans d'eau, mers et océans, évapotranspiration des surfaces boisées et cultivées). Par ailleurs le rôle de la vapeur d'eau dans le changement climatique

fait l'objet de débats scientifiques. Certains considèrent qu'elle joue un rôle régulateur alors que d'autres considèrent qu'elle joue un rôle amplificateur.
Quoiqu'il en soit, les quantités considérables de vapeur d'eau dégagées dans l'atmosphère, par les tours de refroidissement des réacteurs nucléaires qui en sont équipés (38 sur 58 en 2017), créent des phénomènes locaux assez surprenants et spectaculaires (par exemple des chutes de neige par beau temps froid en hiver, très localisées autour des centrales nucléaires). Ces phénomènes devraient attirer l'attention sur la nécessité de ne pas négliger les émissions de chaleur d'origine anthropique dans tous les pays avec une forte production d'électricité à partir d'énergies fossiles ou nucléaire.

Que faut-il conclure ?

La France a la particularité d'être le pays au monde le plus nucléarisé, en rapport au nombre d'habitants. Or les réacteurs nucléaires sont de mauvais convertisseurs d'énergie primaire en électricité dont plus de 2/3 de l'énergie de fission est dégagée directement dans l'air et dans l'eau des fleuves ou de mer. Cette pollution thermique massive contribue à la perturbation de l'équilibre énergétique du système Planète Terre et s'ajoute à celle du « forçage radiatif d'origine anthropique », tous deux directement liés aux consommations d'énergies primaires.
Il est avéré que les réacteurs nucléaires mettent en péril les rivières, les fleuves, les mers et les océans, comme l'a montré l'étude thermique du fleuve Rhône citée précédemment. Mais il n'est pas encore devenu visible et compréhensible par suffisamment de personnes que la pollution thermique est une cause majeure du réchauffement climatique. C'est la raison pour laquelle des sociétés comme EDF et Orano peuvent encore prétendre sans vergogne : « le nucléaire ne réchauffe pas la planète». Mais ce discours d'une industrie en perdition est désormais confronté aux faits.

Et c'est un fait, le nucléaire réchauffe bien la portion française de la planète terre, jusqu'à la Méditerranée et sans doute au-delà, de manière conséquente et à long terme.
C'est un mensonge grave de la part des dirigeants politiques français que de prétendre atténuer le réchauffement climatique avec l'énergie nucléaire. Présentée de manière trompeuse comme décarbonée celle-ci est au contraire un facteur déterminant du réchauffement climatique à l'échelle de la France. Contrairement à ce que prétendent les nucléaristes, l'arrêt du nucléaire fait partie des actions indispensables pour préserver le climat…et bien d'autres choses.

François VALLET – mai 2021
francois.vallet@laposte.net

ANNEXE 1 : données utilisées, hypothèses de calcul et résultats intermédiaires ayant conduit aux valeurs indiquées dans le paragraphe 1 de l'article ci-dessus

1/ Origine des données utilisées pour les calculs de la pollution thermique et du « forçage radiatif d'origine anthropique », pour l'année 2017 et à l'échelle mondiale, de l'Union Européenne (UE 28) et de la France.
Les données de même nature sont issues de la même source pour permettre les comparaisons entre les différentes échelles d'observation.
- Consommations d'énergies primaires :
« Un monde d'énergie – Edition 2019 » publié en avril 2019 par la société Engie (tableau page 29)
https://www.engie.com/sites/default/files/assets/documents/2020-01/un-monde-denergie-edition-2019-engie1_compressed_0.pdf
- Facteurs d'émissions de CO_2 des énergies fossiles :
« Chiffres clés du climat France Europe Monde - Edition 2020 - Novembre 2019 », ministère de la «transition écologique » (tableau page 78)
https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-11/datalab-62-chiffres-cles-du-climat-france-europe-monde-edition2020-novembre2019_0.pdf
- Superficie de la terre : 510 067 420 km² (Source Wikipedia)
- Population mondiale, de l'Union Européenne (UE 28), de la France, en 2017 :
« Population & Sociétés », numéro spécial « Tous les pays du monde » publié par l'INED
https://www.cairn.info/revue-population-et-societes-2017-8-page-1.htm
- Quantité de CO_2 présent dans l'atmosphère en 2016 (3 367 Gt) :
« Chiffres clés du climat France Europe Monde - Edition 2020 - Novembre 2019 », ministère de la «transition écologique » (schéma page 13)

2/ Calculs préalables à celui du « forçage radiatif d'origine anthropique »

- **Emissions annuelles de CO_2** dues aux combustions d'énergies fossiles : produit des consommations annuelles d'énergie primaire par les facteurs d'émission de chaque énergie résultant des équations de combustion.
*Pour l'année 2017 ces émissions à l'échelle mondiale ont été de près **de 36 500 Mt**, 42% du fait de la combustion de charbon, 38% du fait de la combustion de produits pétroliers, 20% du fait de la combustion de gaz naturel.*
- Accroissement annuel de la masse de CO_2 dans l'atmosphère : 45% des émissions se retrouvent dans l'atmosphère, le reste étant supposé absorbé par les océans et par la végétation (selon informations page 14 du document « Chiffres clés du climat France Europe et Monde - Edition 2020 Novembre 2019 »).
*Pour l'année 2017 cet accroissement de la masse de CO_2 dans l'atmosphère, est de l'ordre de **16 400 Mt**, le reste étant supposé absorbé par les océans et la végétation.*
- Masse de CO_2 déjà présent dans l'atmosphère l'année n-1 : c'est la masse totale présente dans l'atmosphère terrestre en 2017 (3 384 Gt en 2017 moins 16,4 Gt d'accroissement en 2017, soit **3 367,6 Gt**).
- Accroissement annuel de la concentration en CO_2 (Cn/Cn-1) : c'est le rapport entre la masse totale présente l'année du calcul (masse initiale + accroissement annuel) et la masse totale présente l'année précédente (masse initiale).
*Pour l'année 2017 le rapport Cn/Cn-1 est de **1,0049**.*

3/ Calcul du « forçage radiatif d'origine anthropique » (FROA), dû aux émissions annuelles de CO_2

La relation simplifiée de G. MYRHE, citée par Wikipedia, a été utilisée.
https://fr.wikipedia.org/wiki/For%C3%A7age_radiatif
FROA = 5.35 ln (Cn/Cn-1) = 0,0260 W/m² ou 26 mW/m²

Pour l'année 2017 et pour l'ensemble du système « Planète Terre » cela correspond à une énergie solaire « piégée » sur Terre de plus de **116 000 TWh** (0,026 W/m² x 510 067 420 km² x 8 760 h/an).
Et cela correspond à 55,5 GJ (gigajoules) par habitant.

4/ Calcul de la pollution thermique due aux consommations d'énergies primaires

Toute l'énergie consommée se dégrade en chaleur.
En 2017, la consommation totale d'énergies primaires à l'échelle mondiale a été de **14 126 Mtep** (1,87 tep par personne) ou encore **164 285 TWh** soit **78,5 GJ** par habitant.

5/ Tableaux de calculs détaillés à l'échelle du monde, de l'UE 28, de la France

Année 2017 - Monde		**Pollution thermique due aux consommations d'énergies primaires**								
Grandeurs	Unités	Charbon et lignite	Pétrole et GPL	Gaz naturel	Biomasse et déchets	Chaleur géothermie et solaire	Electricité primaire	Toutes énergies	Valeurs par habitant	
Consommations d'énergie primaire (pollution thermique)	Mtep	3 827	4 507	3 117	1 382	46	1 247	14 126	1,87	tep/personne
	TWh	44 508	52 416	36 251	16 073	535	14 503	164 285	78,5	GJ/personne
Contribution de chaque énergie primaire	% du total	27,1%	31,9%	22,1%	9,8%	0,3%	8,8%	100%		
		Forçage radiatif dû aux émissions de CO_2								
Facteur d'émission de CO_2	Mt CO_2/Mtep	4,01	3,10	2,30	0	0	0			
Emissions annuelles de CO_2 calculées	Mt CO_2	15 346	13 972	7 169	0	0	0	36 487	4,84	t/personne
Contribution de chaque énergie primaire	% du total	42,1%	38,3%	19,6%	0,0%	0,0%	0,0%	100%		
Accroissement annuel de la masse de CO_2 dans l'atmosphère	Mt CO_2	16 419						16 419		
Masse de CO_2 présente dans l'atmosphère en 2016	Mt CO_2	3 367 581						3 367 581		
Accroissement annuel de la concentration en CO_2 C_n/C_{n-1}		1,0049						1,005		
Forçage radiatif dû aux émissions annuelles de CO_2	W/m²	0,0260						0,026		
Energie annuelle correspondante	TWh	116 269						116 269	55,5	GJ/personne
		Pollution énergétique totale (pollution thermique et forçage radiatif d'origine anthropique)								
Pollution énergétique totale	TWh	280 554						280 554	134,0	GJ/personne
Contribution de chaque énergie primaire	TWh	93 410	96 938	59 096	16 073	535	14 503	280 554		
Contribution de chaque énergie primaire	%	33,3%	34,6%	21,1%	5,7%	0,2%	5,2%	100%		

Année 2017 - Union Européenne (28 pays)		**Pollution thermique due aux consommations d'énergies primaires**								
Grandeurs	Unités	Charbon et lignite	Pétrole et GPL	Gaz naturel	Biomasse et déchets	Chaleur géothermie et solaire	Electricité primaire	Toutes énergies	Valeurs par habitant	
Consommations d'énergie primaire (pollution thermique)	Mtep	231	532	397	159	4	288	1 611	3,18	tep/personne
	TWh	2 687	6 187	4 617	1 849	47	3 349	18 736	133	GJ/personne
Contribution de chaque énergie primaire	% du total	14,3%	33,0%	24,6%	9,9%	0,2%	17,9%	100%		
		Forçage radiatif dû aux émissions de CO_2								
Facteur d'émission de CO_2	Mt CO_2/Mtep	4,01	3,10	2,30	0	0	0			
Emissions annuelles de CO_2 calculées	Mt CO_2	926,31	1649,20	913,10	0,00	0,00	0,00	3 488,61	6,89	t/personne
Contribution de chaque énergie primaire	% du total	26,6%	47,3%	26,2%	0,0%	0,0%	0,0%	100%		
Forçage radiatif dû aux émissions annuelles de CO_2	TWh	11 117						11 117	79	GJ/personne
		Pollution énergétique totale (pollution thermique et forçage radiatif d'origine anthropique)								
Pollution énergétique totale	TWh	5 638	11 442	7 527	1 849	47	3 349	29 853	212	GJ/personne
Contribution de chaque énergie primaire	%	18,9%	38,3%	25,2%	6,2%	0,2%	11,2%	100%		

Année 2017 - France métropolitaine		**Pollution thermique due aux consommations d'énergies primaires**								
Grandeurs	Unités	Charbon et lignite	Pétrole et GPL	Gaz naturel	Biomasse et déchets	Chaleur géothermie et solaire	Electricité primaire	Toutes énergies	Valeurs par habitant	
Consommations d'énergie primaire (pollution thermique)	Mtep	9	68	38	20	0	108	243	3,74	tep/personne
	TWh	105	791	442	233	2	1 256	2 828	157	GJ/personne
Contribution de chaque énergie primaire	% du total	3,7%	28,0%	15,6%	8,2%	0,1%	44,4%	100%		
		Forçage radiatif dû aux émissions de CO_2								
Facteur d'émission de CO_2	Mt CO_2/Mtep	4,01	3,10	2,30	0	0	0			
Emissions annuelles de CO_2 calculées	Mt CO_2	36,09	210,80	87,40	0,00	0,00	0,00	334,29	5,14	t/personne
Contribution de chaque énergie primaire	% du total	10,8%	63,1%	26,1%	0,0%	0,0%	0,0%	100%		
Forçage radiatif dû aux émissions annuelles de CO_2	TWh	1 065						1 065	59	GJ/personne
		Pollution énergétique totale (pollution thermique et forçage radiatif d'origine anthropique)								
Pollution énergétique totale	TWh	220	1 463	720	233	2	1 256	3 894	216	GJ/personne
Contribution de chaque énergie primaire	%	5,6%	37,6%	18,5%	6,0%	0,1%	32,3%	100%		

ANNEXE 2 : données utilisées, hypothèses de calcul et résultats intermédiaires ayant conduit aux valeurs indiquées dans le paragraphe 2 de l'article ci-dessus

1/ Origine des données utilisées pour les calculs de la pollution thermique et du « forçage radiatif d'origine anthropique », pour l'année 2017 à l'échelle de la France.
- Consommations d'énergies primaires :
« Chiffres clés de l'énergie - Édition 2018 - Septembre 2018 » publié par le ministère de la transition écologique (pages 16 et 17) :
https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/datalab-43-chiffres-cles-de-l-energie-edition-_2018-septembre2018.pdf
- Facteurs d'émissions de CO_2 des énergies fossiles :
« Chiffres clés du climat France Europe Monde - Edition 2020 - Novembre 2019 », ministère de la «transition écologique » (tableau page 78)
https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-11/datalab-62-chiffres-cles-du-climat-france-europe-monde-edition2020-novembre2019_0.pdf
- Production et consommation d'électricité en France, émissions de CO2 associées :
« Bilan électrique de la France en 2017 » RTE (pages 21 et 36)
https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/bilan_electrique_2017.pdf
- Population de la France métropolitaine, en 2017 : 67 187 000 personnes selon l'NSEE
https://www.insee.fr/fr/statistiques/3305173

Les consommations d'énergies primaires utilisées pour les calculs sont celle de la France métropolitaine non corrigées des variations climatiques. Les ressources primaires correspondant à des usages non énergétiques et aux « soutes internationales maritimes et aériennes » ainsi que le solde exportateur d'électricité ont été déduits du bilan de consommation d'énergies primaires.
La pollution thermique due au nucléaire ne tient pas compte des dégagements de chaleur hors réacteurs par les « combustibles usés » et les déchets radioactifs.

Pour les calculs d'émissions de CO_2, le nucléaire est considéré à zéro émission en France métropolitaine.
La combustion de biomasse et de déchets d'origine biologique est supposée sans émission nette de CO_2 celui réellement émis étant absorbé par la croissance des végétaux (hypothèse d'une utilisation de biomasse inférieure au flux annuel produit et donc sans consommation des stocks).
Le CO_2 émis par les activités humaines étant le principal facteur de l'effet de serre additionnel, selon le GIEC, le « forçage radiatif d'origine anthropique » provoqué par les émissions annuelles est calculé en ne prenant en compte que ce seul gaz.

2/ Calculs préalables à celui du « forçage radiatif d'origine anthropique » à l'échelle de la France

- **Emissions annuelles de CO_2** dues aux combustions d'énergies fossiles : produit des consommations annuelles d'énergie primaire par les facteurs d'émission de chaque énergie résultant des équations de combustion.
Pour l'année 2017 ces émissions à l'échelle de la France ont été de près ***de 307 Mt****, 60% du fait de la combustion de produits pétroliers (combustibles et carburants), 28% du fait de la combustion de gaz naturel et 12% du fait de la combustion de charbon. Ces émissions ne tiennent pas compte des importations d'uranium de la France et des émissions des activités minières et de préparation de l'uranium hors de France.*

- Contribution de la France à l'accroissement annuel de la masse de CO_2 dans l'atmosphère : les émissions de la France en *2017 (307 Mt) représentent un peu plus de 0.8 % des émissions mondiales en 2017 (de l'ordre de 36 500 Mt) et ont contribué à ce niveau à l'accroissement annuel de la masse de CO_2 dans l'atmosphère.*

3/ Calcul du « forçage radiatif d'origine anthropique » (FROA), dû aux émissions annuelles de CO_2

Pour l'année 2017 et pour l'ensemble du système « Planète Terre » l'énergie solaire « piégée » sur Terre a été estimée à plus de **116 000 TWh**.
La part de la France dans ce « forçage radiatif d'origine anthropique » peut être considérée comme proportionnelle à la part de la France dans l'accroissement annuel de la masse de CO_2 dans l'atmosphère (un peu plus de 0.8 %) **soit 978 TWh**.
Cela correspond à 52 GJ (gigajoules) par habitant.

4/ Calcul de la pollution thermique due aux consommations d'énergies primaires

Toute l'énergie consommée se dégrade en chaleur.
En 2017, la consommation totale d'énergies primaires à l'échelle de la France a été de **234 Mtep** (3.5 tep par personne) et a entraîné une pollution thermique de **2 641 TWh** soit **142 GJ** par habitant. La part de l'énergie nucléaire dans cette pollution thermique est de l'ordre de 46% (1 207 TWh), celles des autres énergies (fossiles, biomasse et déchets) de l'ordre de 54%.

5/ Calcul de la pollution énergétique totale (pollution thermique et « forçage radiatif d'origine anthropique ») due aux consommations d'énergies primaires

La pollution thermique et le « forçage radiatif d'origine anthropique » s'additionnent.
La pollution énergétique totale à l'échelle de la France a donc été de **3 425 TWh** soit **184 GJ** par habitant.
La part de l'énergie nucléaire dans cette pollution énergétique totale est de l'ordre de 33% (1 207 TWh), celles des autres énergies (fossiles, biomasse et déchets) l'ordre de 67%.

6/ Comparaison du gaz et du nucléaire pour la production d'électricité en France au regard des pollutions énergétiques qu'ils provoquent

En utilisant les données publiées par RTE pour la production d'électricité en 2017 et les autres données indiquées précédemment on peut obtenir la pollution énergétique totale provoquée par la production d'un kilowattheure électrique, soit par le gaz, soit par l'énergie nucléaire.
Les valeurs obtenues sont de 10,38 MJ/kWhe pour le gaz et de 11,61 MJ/kWhe pour l'énergie nucléaire.
Remplacer la totalité de la production d'électricité nucléaire par une production au gaz avec les technologies actuellement utilisées en France conduirait donc à une réduction significative de la pollution énergétique totale et du réchauffement climatique qu'elle provoque.

7/ Tableaux de calculs détaillés à l'échelle de la France pour l'année 2017

Année 2017 - France métropolitaine		**Pollution thermique due aux consommations d'énergies primaires**									
Grandeurs	Unités	Lignite et charbon	Pétrole et GPL	Gaz naturel	Biomasse et déchets	Nucléaire	Hydraulique, éolien, photovoltaïque	Solde import - export electricité	Toutes énergies	Valeurs par habitant	
Consommations d'énergie primaire	Mtep	9,00	59,60	37,40	20,70	103,80	7,10	-3,40	234,20	3,49	tep/personne
Pollution thermique	TWh	105	693	435	241	1 207	0	-40	2 641	142	GJ/personne
Contribution de chaque énergie primaire	% du total	4,0%	26,2%	16,5%	9,1%	45,7%	0,0%	-1,5%	100,0%		
		"Forçage radiatif d'origine anthropique" dû aux émissions de CO_2									
Facteur d'émission de CO_2	Mt CO_2/Mtep	4,01	3,10	2,30	0	0	0	0			
Emissions annuelles de CO_2 calculées pour la France	Mt CO_2	36,09	184,76	86,02	0,00	0,00	0,00	0,00	306,87	4,57	t/personne
Contribution de chaque énergie primaire	% du total	11,8%	60,2%	28,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100%		
Emissions annuelles de CO2 calculées à l'échelle mondiale	Mt CO_2	36 487							36 487		
Forçage radiatif d'origine anthropique à l'échelle mondiale	TWh	116 269							116 269		
Forçage radiatif d'origine anthropique dû à la France	TWh	115	589	274	0	0	0	0	978	52	GJ/personne
		Pollution énergétique totale (pollution thermique et forçage radiatif d'origine anthropique)									
Pollution énergétique totale	TWh	220	1 282	709	241	1 207	0	-40	3 619	194	GJ/personne
Contribution de chaque énergie primaire	%	6,1%	35,4%	19,6%	6,7%	33,4%	0,0%	-1,1%	100%		

Année 2017 - France métropolitaine		Pollution thermique due aux consommations d'énergies primaires									
Grandeurs	Unités	Lignite et charbon	Pétrole et GPL	Gaz naturel	Biomasse et déchets	Nucléaire remplacé par CC gaz	Hydraulique, éolien, photovoltaïque	Solde import - export electricité	Toutes énergies	Valeurs par habitant	
Consommations d'énergie primaire	Mtep	9,00	59,60	37,40	20,70	53,44	7,10	-3,40	183,84	2,74	tep/personne
Pollution thermique	TWh	105	693	435	241	622	0	-40	2 056	110	GJ/personne
Contribution de chaque énergie primaire	% du total	5,1%	33,7%	21,2%	11,7%	30,2%	0,0%	-1,9%	100,0%		
		"Forçage radiatif d'origine anthropique" dû aux émissions de CO_2									
Facteur d'émission de CO_2	Mt CO_2/Mtep	4,01	3,10	2,30	0	2,30	0	0			
Emissions annuelles de CO_2 calculées pour la France	Mt CO_2	36,09	184,76	86,02	0,00	122,92	0,00	0,00	429,79	6,40	t/personne
Contribution de chaque énergie primaire	% du total	8,4%	43,0%	20,0%	0,0%	28,6%	0,0%	0,0%	100%		
Emissions annuelles de CO2 calculées à l'échelle mondiale	Mt CO_2	36 487							36 487		
Forçage radiatif d'origine anthropique à l'échelle mondiale	TWh	116 269							116 269		
Forçage radiatif d'origine anthropique dû à la France	TWh	115	589	274	0	392	0	0	1 370	73	GJ/personne
		Pollution énergétique totale (pollution thermique et forçage radiatif d'origine anthropique)									
Pollution énergétique totale	TWh	220	1 282	709	241	1 013	0	-40	3 425	184	GJ/personne
Contribution de chaque énergie primaire	%	6,4%	37,4%	20,7%	7,0%	29,6%	0,0%	-1,2%	100%		

Pour 1 kWh d'électricité produite		**Pollution thermique dû aux consommations d'énergies primaires**	
Grandeurs	Unité	Centrales à gaz	Centrales nucléaires
Rendement moyen de conversion d'énergie primaire en électricité		0,528	0,310
Pollution thermique (chaleur dégagée par la consommation d'énergies primaires)	MJ/kWh_e	6,82	11,61
		Forçage radiatif dû aux émissions de CO_2	
Emissions de CO_2	kg CO_2/kWh_e	0,375	0
Facteur de forçage radiatif	MJ/kg CO_2	9,50	0
Forçage radiatif	MJ/kWh_e	3,56	0
		Pollution énergétique totale (pollution thermique et forçage radiatif)	
Pollution énergétique totale (pollution thermique et forçage radiatif)	MJ/kWh_e	10,38	11,61
Emission de CO_2 due à la combustion du gaz naturel	kg CO_2/kep	2,30	

ANNEXE 3 : calculs d'indicateurs d'ordre général

1/ Contribution du nucléaire à l'approvisionnement en énergies finales de la France en 2017

Elle peut être estimée à 19,5 % valeur égale au produit de la part du nucléaire dans la production d'électricité (71,6% indiqué page 21 du bilan annuel établi par RTE) et de la part de l'électricité dans la consommation d'énergies finales en 2017 (27,2% calculé à partir des données de consommations d'énergie finale publiées par le Ministère de la transition écologique pages 16 et 17 du document « Chiffres clés de l'énergie - Édition 2018 - Septembre 2018 »).

2/ Chaleur perdue par les 58 réacteurs nucléaires en service en France en 2017

Elle peut être estimée en première approche à 828 TWh soit la consommation d'énergie primaire pour la production d'électricité nucléaire (1 207 TWh) moins la production d'électricité d'origine nucléaire (379 TWh selon indications en page 21 du bilan annuel établi par RTE).

3/ Consommations d'énergies utilisées pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire de l'ensemble des logements en France en 2017

Les données sont issues des publications du ministère de la « transition écologique » : https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-12/consommation-energie-parc-residentiel-2019.xlsx

Les consommations d'énergies utilisées dans l'ensemble des logements en France en 2017 ont été de 307,6 TWh pour le chauffage et de 49 TWh pour la production d'eau chaude sanitaire, soit un total de près de 357 TWh.

La chaleur perdue par les réacteurs nucléaires (828 TWh) représentait donc en 2017 plus de 2,3 fois les consommations d'énergies finales pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire de la totalité des logements en France (357 TWh).