

# L'AVENIR DE L'ÉLECTRICITÉ D'ORIGINE NUCLÉAIRE EN FRANCE ET EN SUÈDE – SERGE JOLY



Le rôle du nucléaire dans la production d'électricité et dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre : les choix de la **Suède** et de la **France**.



## PRÉAMBULE

Alors que cet article devait porter sur la comparaison des acceptabilités du nucléaire en Suède et en France, plusieurs éléments importants sont venus interférer avec sa rédaction au cours du premier semestre 2021 amenant à modifier la partie consacrée au programme nucléaire français. Je citerai : l'incident survenu sur le réseau européen de distribution électrique, l'étude RTE/AIE sur un possible abandon des énergies fossiles et nucléaires à l'horizon 2050, le rapport de l'UNSCEAR sur les émissions radioactives après l'accident de Fukushima, la taxonomie verte européenne et l'impact des activités sur la planète et, enfin, le rapport du Haut-Commissaire au Plan sur l'importance de l'électricité d'origine nucléaire pour l'économie française et pour la réduction des émissions des gaz à effet de serre.

## DE NOUVEAU À UPPSALA

En septembre 2018, j'ai été invité par mon ami et ancien collègue Leif NILSSON à venir passer quelques jours à Uppsala. Physiciens nucléaires, notre collaboration, entre 1975 et 1985, a porté sur l'étude expérimentale de la réaction de capture radiative de neutrons rapides soit à Uppsala (j'y suis allé en mai 1975, décembre 1977 et août 1978), soit à Bruyères-leChâtel soit encore à Los Alamos où Darrell DRAKE et ses collaborateurs nous avait reçus à plusieurs reprises pour des séjours plus ou moins longs (voir L'écho du Grand Rué n°144). Nos chemins se sont alors séparés, Leif est resté dans le domaine de la physique nucléaire, il a été Directeur du Laboratoire Svedberg puis Professeur tandis que j'empruntais de nouveaux chemins principalement dans le domaine des accélérateurs (faisceaux d'électrons pour lasers à électrons libres, faisceaux de protons pour la production de neutrons par réaction de spallation...), programmes qui ont été présentés dans les numéros 146, 147 et 151 de notre Bulletin.

Au cours de mon séjour, j'ai rencontré des physiciens de la Division de Physique Nucléaire Appliquée, dirigée par Michael OSTERLUND. Michael a présenté les activités de sa Division : données nucléaires pour i) les réacteurs de fission (génération IV, pour laquelle les déchets sont recyclés jusqu'à épuisement des noyaux fissiles, les produits de fission - qui sont des poisons pour la réaction

de fission en chaîne - étant séparés à chacune des générations) et ii) pour les réacteurs de fusion (participation à ITER). Un générateur de neutrons (fluence de l'ordre de  $10(15) \text{ n/cm}^2/\text{sec}$ ), pour diverses applications, était prévu et la construction de la casemate blindée était en cours.

Ensuite, j'ai rencontré Mattias LANTZ, physicien nucléaire, qui travaillait également, à ce moment-là, sur les biais dans la description des accidents nucléaires de Tchernobyl puis de Fukushima tels que rapportés par la presse ou par des « experts » s'exprimant à la télévision. Il anime le Groupe d'Analyse et a présenté quelques exemples d'études réalisées. Avant de nous séparer, il m'a donné un livre intitulé : "Climate gamble : is anti-nuclear activism endangering our future ?" et les références de quelques articles récents.

Depuis quelques années, des projets de petits réacteurs modulaires (SMR) de quelques centaines de MW sont en cours d'études dans plusieurs pays dont la France où sont associés le CEA, EDF, TechnicAtome et NavalGroup. En décembre 2020, un article paru dans un hebdomadaire présentait ces mini-centrales et leur promettait un bel avenir "à condition, bien sûr, que la population y soit favorable. Pour l'instant, on ne sait pas dans quelle mesure les Français accepteraient ce genre de technologie. Les sondages montrent qu'un tiers d'entre eux ne savent toujours pas ce qu'est un EPR. Pour une partie de la population, les SMR n'existent tout simplement pas".

Ces dernières années, les sondages réalisés en Suède ont montré que de plus en plus de Suédois étaient favorables à l'énergie nucléaire ; il ne semble pas que l'opinion publique française évolue dans le même sens d'où les débats animés lors de l'élaboration de la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE). Il est très difficile de se forger une opinion objective sur un sujet aussi complexe et polémique que l'énergie nucléaire, ce qu'essaie cependant de faire le Groupe d'Analyse suédois que je me propose de présenter dans cet article. Ses travaux ont une influence sur la perception qu'ont les Suédois de l'énergie nucléaire. Je comparerai avec la situation du nucléaire en France et résumerai les nombreux développements intervenus dans ce dossier ces derniers mois.

## Remarque :

Pour plusieurs thèmes abordés dans le texte, je ne ferai qu'une brève présentation, renvoyant le lecteur vers [les articles ou les fiches du GAENA](#) où ces thèmes sont très bien documentés.

Voir le site du GAENA : [www.energethique.com](http://www.energethique.com)

## LES REVIREMENTS DU PROGRAMME ÉLECTRONUCLÉAIRE SUÉDOIS

Dès la fin de la seconde guerre mondiale, les Suédois se sont intéressés aux applications de l'énergie nucléaire. En 1954, un premier réacteur de recherche fut construit mais c'est au cours des années 1970, et sous l'effet du premier choc pétrolier, qu'un important programme de production d'électricité d'origine nucléaire a été lancé avec la mise en service d'une douzaine de réacteurs entre 1972 et 1985 pour une puissance totale de 10 GWe (GigaWatt-électrique). Les réacteurs à eau bouillante (REB) ont été construits par l'industriel suédois ASEA Atom et les réacteurs à eau pressurisée (REP) ont été achetés à la firme américaine Westinghouse. Les types et principes des réacteurs nucléaires sont décrits [dans l'article n°20 du GAENA](#).

Les principales raisons des changements dans le programme électronucléaire suédois :

**1980** : après l'accident de TMI, référendum sur l'avenir du nucléaire en Suède et décision de ne plus autoriser la construction de nouvelles installations nucléaires et d'arrêter progressivement les réacteurs en cours d'exploitation, l'arrêt définitif devant intervenir au plus tard en 2010.

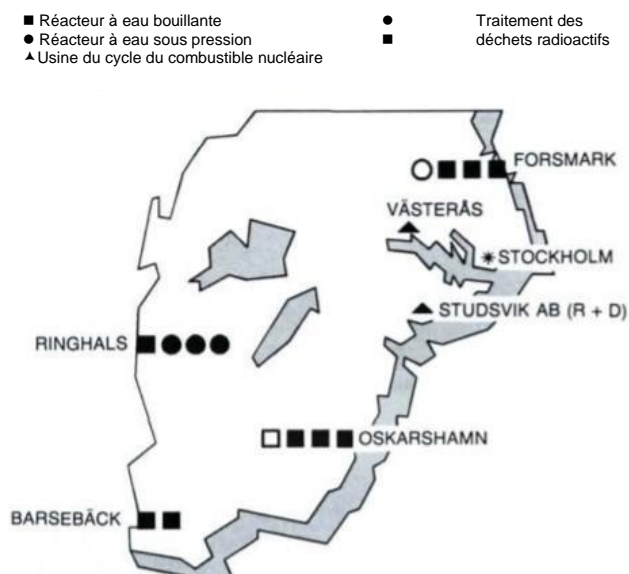
**1991** : les études engagées pour de nouvelles sources d'énergie (éolien, bio-énergie) en vue de remplacer l'énergie nucléaire conduisent à une électricité plus chère. Compte tenu de l'importance des industries grandes consommatrices d'électricité (papier, acier, ...) dans l'économie suédoise, une baisse d'activité causée par une électricité trop chère pouvait compromettre l'emploi et le contrat social. Il a donc été décidé de conserver les réacteurs en service.

**1995** : les partis formant la majorité parlementaire définissent les grandes lignes de la nouvelle politique de l'énergie avec l'élimination progressive de l'énergie d'origine nucléaire. Deux réacteurs sont arrêtés, Barsebäck-1 en novembre 1999, Barsebäck-2 en mai 2005 et la centrale de Barsebäck est fermée.

**2010** : les lois sur l'interdiction de délivrer des autorisations pour de nouveaux réacteurs et sur l'élimination progressive de l'énergie nucléaire sont abrogées et le Parlement suédois autorise le remplacement des réacteurs nucléaires existants quand ils seront en fin de vie. Deux REB sont arrêtés à Oskarshamn en 2016 et 2017.

**2016** : le Parlement suédois décide de supprimer un ensemble de taxes qui pèsent lourdement sur la rentabilité des centrales (les centrales nucléaires suédoises sont exploitées par des entreprises privées), c'est l'une des raisons de la décision des industriels de fermer Ringhals-2 (ce qui a été fait fin 2019) puis Ringhals-1 (fin 2020).

**En ce début 2021**, la Suède possède encore six réacteurs de puissance en exploitation répartis dans trois centrales : deux REP à la centrale de Ringhals (puissance installée nette totale de 2204 MWe), trois REB à Forsmark (3 138 MWe) et un autre REB à Oskarshamn (1450 MWe). En 2019, les réacteurs nucléaires ont produit 53,4 TWh soit 39 % de la production électrique totale du pays.



**Figure 1** : Répartition, en 1990, des douze réacteurs nucléaires (9 REB et 3 REP) dans les centrales de Ringhals, Barsebäck, Oskarshamn et Forsmark, dans la partie sud de la Suède

La Suède ne retraite pas son combustible usé. Depuis 1988, les déchets de faible et moyenne activité à vie courte des centrales nucléaires, des hôpitaux, des industries et des centres de recherche sont stockés dans l'installation de stockage des déchets issus des réacteurs (SFR) à Forsmark.

Le combustible usé et les déchets de haute activité sont entreposés dans l'installation centrale de stockage provisoire des combustibles nucléaires usés (CLAB), à proximité d'Oskarshamn.

## TMI, TCHERNOBYL ET LA CRÉATION DU GROUPE D'ANALYSE

L'accident de Three Mile Island (Pennsylvanie), le 28 mars 1979, résulte d'une mauvaise interprétation des nombreux signaux d'alarme dans la salle de commande-contrôle et de la manœuvre, malheureuse, de vannes sur le circuit de refroidissement. La fusion partielle de plusieurs crayons de combustible a été suivie par l'émission d'éléments radioactifs dans l'atmosphère mais les conséquences de l'accident sur l'environnement ont été négligeables. [La fiche GAENA n°45](#) détaille les phases de l'accident et le retour d'expérience.

Pour l'accident de Tchernobyl, les conséquences ont été beaucoup plus dramatiques. Dans la matinée du 28 avril 1986, l'alarme a retenti à la centrale de Forsmark, située à une heure de route au nord de Stockholm.



*Quelques semaines après la catastrophe, mai 1986*

Après de multiples vérifications des appareils de mesure en différents endroits de la centrale, il était clair que la radioactivité provenait de l'extérieur. L'analyse d'échantillons de végétaux avait permis d'identifier les particules radioactives caractéristiques du combustible des centrales nucléaires soviétiques (réacteurs de type RBMK). Toutes les preuves pointaient vers l'Union soviétique et les Autorités ont dû reconnaître qu'il y avait eu un accident à la centrale de Tchernobyl, en Ukraine, à environ 1100 km de là, le 26 avril vers 1H du matin. Les autorités suédoises ont alors alerté le monde entier de l'existence du nuage radioactif. Les causes de l'accident et ses conséquences sanitaires sont décrites dans [la fiche GAENA n°46](#).

A la suite de ces deux accidents, surtout celui de Tchernobyl, des partis politiques et des organisations environnementales se sont opposés encore plus vivement au nucléaire de sorte que, pendant des années, la question du climat et celle de la biodiversité passaient au second plan et ne pouvaient être discutées sereinement alors que l'urgence est de réduire suffisamment les émissions de gaz à effet de serre (GES) pour atténuer les effets du changement climatique. Autre sujet de polémiques : le stockage des déchets nucléaires. Il existe plusieurs solutions économiquement et techniquement raisonnables pour les déchets, depuis le stockage géologique profond, et éventuellement sous l'océan, jusqu'à la transmutation dans les réacteurs rapides.

Le Groupe d'Analyse a été formé au Centre Nucléaire de Studsvik (au sud de Stockholm) en 1987, après l'accident de Tchernobyl, alors qu'il y avait un besoin urgent de connaissances dans le domaine du nucléaire et plus particulièrement sur la sûreté des réacteurs, la radioprotection, la radiobiologie et autour des questions soulevées dans le débat public. Le Groupe, qui est lié à l'industrie électrique, nomme ses membres sur la base de la compétence scientifique, de l'expérience dans l'industrie et de l'engagement personnel. Les études paraissent sous la forme de publications, de fiches d'informations et de rapports.

Voir le site : <https://www.analys.se/>

L'objectif du Groupe d'Analyse n'est pas de défendre l'énergie nucléaire à tout prix mais d'en présenter les avantages et les inconvénients sur la base d'arguments purement scientifiques et impartiaux, ce qui est fait au travers d'actions comme la rédaction d'articles de base dans les journaux locaux ou nationaux, la présentation de conférences, la participation d'enfants des écoles à des études sur la radioactivité et sur les rayonnements, la présentation à la population des avantages et des inconvénients de l'énergie nucléaire face aux discours des écologistes antinucléaires, la présentation de l'accident de Fukushima sur la base de données fiables, la présentation des énergies disponibles au regard de leur incidence sur le climat... Quelques-unes de ces actions sont détaillées dans les paragraphes qui suivent.

Le Groupe d'Analyse est également chargé de répondre immédiatement aux questions soulevées par toute controverse ; les informations tendancieuses ou inexactes sont rapidement et systématiquement rectifiées.

## LES SUÉDOIS ET LE NUCLÉAIRE

Tous les ans depuis 1997, l'Institut de sondage Novus suit l'opinion des Suédois sur l'énergie nucléaire à la demande du Groupe d'Analyse. Selon la toute dernière enquête, réalisée en mai 2021, 46% des personnes interrogées (encore en augmentation par rapport au sondage précédent) souhaitent continuer à utiliser l'énergie nucléaire et construire de nouveaux réacteurs, 30% souhaitent continuer à utiliser l'énergie nucléaire mais sans de nouvelles constructions, 10% n'ont pas d'avis et 14% souhaitent supprimer le recours à l'énergie nucléaire.

Depuis quelques années, les personnes âgées de 18 à 29 ans qui, auparavant, étaient plutôt critiques à l'égard de l'énergie nucléaire, apportent le même soutien que les autres groupes d'âge.

La série télévisée "Tchernobyl" n'a pas eu l'effet négatif auquel on aurait pu s'attendre. En deux ans, la proportion de jeunes qui souhaitent arrêter prématurément l'énergie nucléaire est passée de 30 à 13% ; ils ont compris que l'énergie nucléaire associée aux énergies renouvelables était indispensable pour répondre aux futurs besoins. Déjà, fin 2019, l'énergie nucléaire était discutée de manière plus objective et ses avantages étaient reconnus : l'énergie nucléaire peut répondre aux besoins énergétiques croissants grâce à une production d'électricité sans énergies fossiles, stable et indépendante des conditions météorologiques. Une grande partie de la population suédoise sait, à présent, que l'énergie nucléaire a peu d'effets négatifs sur le climat. Après plusieurs rapports alarmants du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, qui dépend de l'ONU) et des nouvelles inquiétantes concernant l'augmentation continue de l'utilisation des combustibles fossiles (en Chine et en Inde, essentiellement), de plus en plus de personnes considèrent l'énergie nucléaire comme un élément nécessaire de la lutte contre le changement climatique. Le débat de l'année écoulée a été marqué par des questions telles que le rôle de l'énergie nucléaire dans un système électrique stable, la question du stockage définitif des déchets nucléaires et la fermeture de deux réacteurs à Ringhals. De nouveaux problèmes sont également apparus, comme un besoin accru d'électricité et les opportunités que les petits réacteurs modulaires peuvent offrir dans une société sans combustibles fossiles.

En fait, deux autres Instituts (SOM et Sifo) s'intéressent également à l'attitude des Suédois vis-à-vis de l'énergie nucléaire. Si les questions posées sont légèrement différentes, les réponses donnent des tendances assez voisines. Ainsi, à long terme, la moitié des sondés de 2020 souhaitent remplacer l'énergie nucléaire par d'autres alternatives mais, dans le même temps, le programme

nucléaire actuel est approuvé par environ 70% de la population.

## RAYONNEMENTS ET RADIOACTIVITÉ

Comme les rayonnements et la radioactivité sont, pour une grande part, à l'origine des peurs que génère le nucléaire, il est très important de les présenter de manière simple et précise, ce qui est fait dans [l'article GAENA n°15](#). Nous sommes tous soumis à la radioactivité naturelle : les rayonnements cosmiques (rayonnements émis par le soleil et par les corps célestes), les rayonnements émis par le sol et le radon (gaz radioactif) qui s'en échappe et même notre corps contient du potassium K-40 radioactif.

Quant à la radioactivité d'origine artificielle, elle prend en compte les rayonnements utilisés en radiologie médicale, pour diagnostiquer certaines pathologies, ou en radiothérapie, pour nous soigner. Il faut également ajouter les rayonnements qui sont émis du fait des activités humaines : les essais nucléaires dans l'atmosphère des années 50 et 60, les centrales nucléaires, les accidents de Tchernobyl et de Fukushima.

La stratégie utilisée par les opposants au nucléaire a consisté à générer la peur, la peur des rayonnements ionisants, la peur des réacteurs nucléaires, la peur des déchets radioactifs et de leur stockage. La radioactivité et les rayonnements ionisants sont souvent décrits comme beaucoup plus dangereux qu'ils ne le sont en réalité. Le rayonnement de fond naturel auquel les personnes sont exposées varie considérablement suivant les régions mais les statistiques de santé montrent peu ou pas d'effets du tout pour les populations vivant avec des niveaux de rayonnement élevés. Statistiquement, l'énergie nucléaire est l'une des sources d'énergie les plus sûres, sinon la plus sûre, même lorsque les conséquences de l'extraction d'uranium, des accidents et des déchets nucléaires sont prises en compte.

Des organisations environnementales ont délibérément déformé les statistiques énergétiques afin de faire de l'énergie nucléaire un outil bien pire pour l'action climatique qu'elle ne l'est en réalité. Une approche courante consiste, tout à fait arbitrairement, à attribuer d'importantes émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'énergie nucléaire, même si les analyses du cycle de vie montrent que les émissions de GES provenant de l'énergie nucléaire sont parmi les plus faibles de toutes celles qui contribuent à la production d'électricité. Pour réduire encore ces émissions, les industriels suédois ont introduit le concept de Déclaration Environnementale de Produit (DEP) qui leur permet d'identifier les gisements de réduction possible.

## TRAVAUX PRATIQUES POUR COLLÉGIENS

Des adolescents ont été associés à des études sur la radioactivité dans le cadre d'un projet de science citoyenne (ouverte à tous) mené en Suède pendant l'automne 2018 ; des élèves de 13 à 16 ans ont participé au ramassage de champignons, d'échantillons de sol et d'excréments d'animaux. Le but du projet était de déterminer la radioactivité dans les champignons comestibles.

Après l'accident de Tchernobyl en 1986 et les retombées des essais nucléaires dans les années 1950-1960, on peut trouver des atomes radioactifs dans l'environnement et donc dans l'alimentation (champignons, gibier), les plus importants étant Cs134 et Cs137. Des mesures ont été effectuées périodiquement sur la flore, la faune, les champignons, le sol et dans l'eau dans les zones les plus touchées. Avec une demi-vie de 30 ans, la moitié du Cs137 présent en 1986 a disparu ; l'évolution de la concentration en Cs137 entre 1986 et les années 2010 dépend de nombreux facteurs biologiques et environnementaux ; c'est un excellent sujet d'étude pour la science citoyenne.

Toutes les classes des Collèges suédois ont été invitées à participer à la collecte et à l'analyse des données ; plus de 200 classes ont répondu. Pour sensibiliser les élèves aux mesures de radioactivité, un détecteur relativement simple était également fourni. Finalement, deux échantillons seulement avaient des activités supérieures à 1500 Bq/kg, valeur seuil pour la vente de champignons en Suède. Les deux provenaient du nord de la Suède, de zones qui ont reçu les retombées de l'accident de Tchernobyl. La partie science citoyenne de ce projet a demandé un gros effort de préparation pour amener un public de jeunes à s'intéresser aux connaissances scientifiques. Le projet a impliqué plusieurs disciplines : la physique des rayonnements, la biologie et l'écologie, et il a permis d'initier les élèves à la méthodologie scientifique.

Remarque sur le nuage de Tchernobyl et les frontières françaises. Contrairement à ce qu'avaient annoncé les Autorités françaises dans un premier temps, le nuage radioactif a également survolé la France. Fin 85 et début 86, j'ai participé à des mesures de spectroscopie d'électrons de conversion (spectromètre BILL) auprès du réacteur à haut flux (RHF) de l'Institut Laue Langevin (ILL) à Grenoble. A la fin du mois d'avril 86, je surveillais le fonctionnement de BILL dans le hall au-dessus du réacteur ; normalement, ce hall est en légère dépression par rapport à l'extérieur et on y accède par l'intermédiaire d'un sas. Un jour, les exploitants ont dû mettre le hall en surpression, ce qui signifiait qu'il y avait plus de Bq à l'extérieur du bâtiment qu'à l'intérieur : c'était le nuage de Tchernobyl qui passait au-dessus des Alpes ! Début mai

1986, d'importantes pluies contribuèrent au dépôt de Cs137 sur les montagnes du Sud-Est et de l'Est de la France, surtout dans les Vosges, avec les conséquences qui sont décrites dans [la fiche GAENA n°5](#).

## FUKUSHIMA : FAITS ET CONTREVÉRITÉS

Le 11 mars 2011, c'est un très violent tremblement de terre, suivi d'un énorme tsunami avec des vagues de 14 mètres, qui est à l'origine de l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi et de ses six réacteurs de type REB. Les réacteurs se sont bien arrêtés comme prévu lors de la détection de la secousse tellurique, mais leur puissance thermique résiduelle (7% de la puissance nominale, soit environ 80 MW) n'a pu être évacuée car les pompes auxiliaires ont été complètement noyées sous les vagues. Durant presque un mois, les ingénieurs et techniciens japonais se sont battus pour assurer le refroidissement des réacteurs et limiter les conséquences de l'accident (voir [la fiche GAENA n°47](#)).

Au cours de l'hiver 2017, des informations ont circulé selon lesquelles l'eau contaminée de la centrale nucléaire endommagée se répandait dans l'océan Pacifique et que cela pourrait entraîner des dizaines de milliers de cas de cancer, une affirmation rejetée par le Responsable du Groupe d'Analyse qui s'est rendu sur place en avril 2017. Les principales idées fausses sur Fukushima relevées par Mattias LANTZ :

**1) De nombreuses personnes sont décédées des suites de leur irradiation après l'accident nucléaire de 2011 :** le tsunami a fait 18000 victimes mais personne n'est mort ou n'a été blessé du fait de la radioactivité.

**2) Après l'accident, un grand nombre d'enfants ont contracté un cancer de la thyroïde :** 360 000 enfants qui vivaient dans la région de Fukushima, au moment de l'accident, sont régulièrement examinés pour un cancer de la thyroïde. Il n'y a pas plus de cancers de la thyroïde parmi les enfants de Fukushima que dans les groupes témoins d'autres régions du Japon qui ont fait l'objet d'une enquête.

**3) D'énormes quantités de radioactivité continuent de s'échapper dans l'océan Pacifique :** lors des mesures directement à l'extérieur du port de Fukushima, les niveaux, en mars 2011, étaient de l'ordre de 50 MBq/mètre cube. C'est principalement du Cs137 dont il est question. À peu près au même endroit, en avril 2017, le niveau était d'environ 1000 Bq/mètre cube, soit 1 Bq par litre. La quantité totale de césium ajoutée à l'océan Pacifique à la suite de l'accident représente environ un tiers de ce qui se trouvait déjà dans la mer du fait des essais nucléaires atmosphériques des années 50 et 60.

S'est-on inquiété pour rien ? Les émissions radioactives après l'accident à la centrale nucléaire japonaise de Fukushima en 2011 n'ont pas produit d'effets négatifs sur la santé. C'est ce que soutiennent les conclusions d'un comité de chercheurs de l'ONU, publiées le 9 mars 2021 à Vienne.

Depuis un précédent rapport publié en 2013, "aucun effet néfaste sur la santé des habitants de Fukushima pouvant être directement attribué à l'exposition aux radiations n'a été documenté", a estimé la présidente du Comité scientifique de l'ONU sur les conséquences des émissions radioactives (UNSCEAR).

## ÉNERGIE NUCLÉAIRE ET URGENCE CLIMATIQUE : LES CHOIX DE LA SUÈDE

En 2050, pour sauver le climat de la planète, il ne faudrait plus recourir aux combustibles fossiles. Or, d'ici là, la consommation mondiale d'énergie va encore augmenter et il est peu probable que cette demande accrue d'énergie puisse être satisfaite par la seule production des énergies renouvelables dont, par ailleurs, le rythme actuel d'expansion devrait être augmenté de plusieurs ordres de grandeur : pour gagner ce pari, toutes les solutions économes en carbone doivent être utilisées.

Une étude sino-américaine de 2016 [J. CAO et al., China-US cooperation to advance nuclear power, Science (2016) 547] analyse et compare les programmes de déploiement de capacités de production bas-carbone dans différents pays depuis les années 70. Depuis les années 2000, plusieurs pays (Allemagne, Danemark ou Etats-Unis) ont mis en œuvre des politiques de soutien ambitieuses pour le déploiement rapide de capacités solaires et éoliennes, à l'aide de subventions et d'autres mesures d'incitation. Cependant, une croissance beaucoup plus rapide de la production d'électricité à faible émission de carbone a été réalisée plus tôt lors de la mise en place des programmes électronucléaires (Fig. 2)

On remarque que le rythme atteint par la Suède avec l'énergie nucléaire entre 1976 et 1986 reste cinq fois supérieur au résultat du Danemark, pays qui a mis en œuvre son programme d'énergies décarbonées au début des années 2000. La performance de la Suède n'a jamais été égalée à ce jour. On constate des résultats similaires dans tous les pays ayant engagé des programmes de déploiement du nucléaire (France, Belgique, Slovaquie, Taiwan).

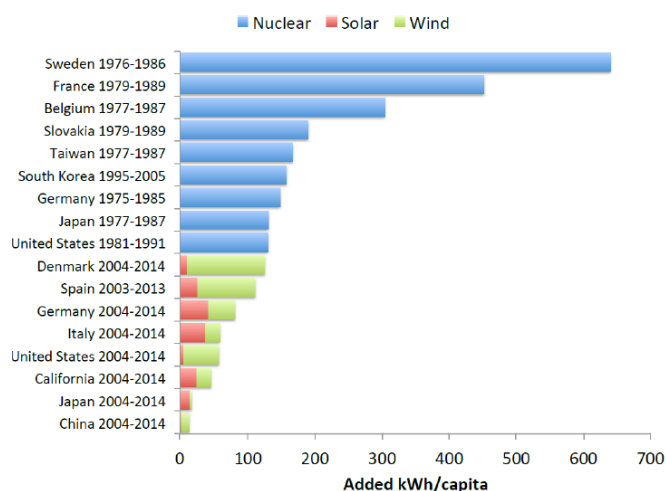


Figure 2 : Augmentation annuelle moyenne maximale de la production d'électricité sans carbone en kilowattheures par habitant sur une période de 10 ans, dans un groupe de pays comprenant la plupart des principaux exploitants de technologies nucléaires, éoliennes et solaires

## Conclusions de l'étude sino-américaine :

Jusqu'à présent, seule l'énergie nucléaire a fourni les taux élevés de croissance de production d'électricité à faible émission de carbone qui seront nécessaires pour atteindre les objectifs de "décarbonation" en 2050.

Alors que l'intensité carbone moyenne du secteur électrique est toujours supérieure à 400 g CO<sub>2</sub>/kWh dans les pays de l'OCDE, quatre pays européens seulement ont réussi à décarboner leur électricité sous les 100 g de CO<sub>2</sub>/kWh : la Norvège, qui possède une capacité hydroélectrique exceptionnelle (100% hydro), et trois pays qui combinent aujourd'hui nucléaire et hydroélectricité : la Suède (42 % nucléaire, 39 % hydro), la Suisse (40 % nucléaire, 60 % hydro) et la France (71 % nucléaire, 11 % hydro). Un pourcentage élevé d'énergies solaires et éoliennes dans le mix électrique (c'est-à-dire l'ensemble des combustibles qui peuvent être utilisés pour produire de l'électricité) ne garantit pas aujourd'hui un haut niveau de « décarbonation », comme le montrent les résultats du Danemark, du Portugal, ou de l'Allemagne (Fig. 3).

## Remarques :

- 1) Les émissions de carbone de chaque pays (en gCO<sub>2</sub>/kWh) pour la production d'électricité, peuvent être suivies en temps réel sur le site : [www.electricitymap.org](http://www.electricitymap.org)

Exemple, le 29/04/2021 à 10H53 : Suède : 41 g – France : 76 g – Allemagne : 344 g.

- 2) En 2018, les émissions de CO<sub>2</sub>, en tonnes par habitant et par an, étaient les suivantes : Suède : 3,39 – France : 4,51 – Danemark : 5,53 – Belgique : 7,98 – Allemagne : 8,40.

Tous les ans, l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) fait le bilan de toutes les énergies produites par chacun des Etats de la planète, une mine d'informations :

<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020>

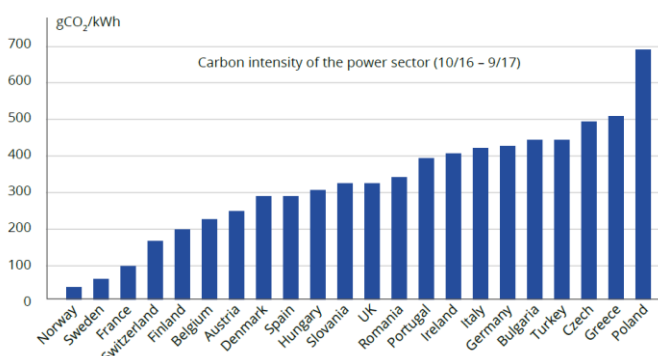


Figure 3 : Les émissions de CO<sub>2</sub> en grammes par kWh compte tenu du mix électrique de quelques pays

**Ces dernières années, la Suède a revu ses priorités : l'objectif est d'atteindre la neutralité carbone le plus vite possible. Avec le nucléaire, la Suède devient le membre de l'AIE avec la plus faible contribution des énergies fossiles dans sa consommation d'énergie primaire. La Suède a fait le choix d'utiliser son système électrique, décarboné à 99%, pour décarboner au maximum les besoins en énergie dans l'industrie, le tertiaire et le résidentiel, les transports, etc... Ainsi, à terme, la Suède pourra se passer complètement des combustibles fossiles et toute l'énergie primaire consommée sera décarbonée.**

## LE PROGRAMME ÉLECTRONUCLÉAIRE FRANÇAIS : 58 RÉACTEURS POUR 64 GWE

Le plan d'équipement d'EDF a été mené tambour battant avec la mise en service, entre 1977 et 1998, de 58 réacteurs REP (56 en 2020 après l'arrêt des deux réacteurs de Fessenheim) répartis dans 18 centrales : 32 réacteurs de 900 MWe, 20 réacteurs de 1300 MWe et 4 réacteurs de 1450 MWe. La part du nucléaire dans la production d'électricité passa de 3% en 1970 à 76% en 1996, faisant de la France le pays utilisant le plus le nucléaire pour produire son électricité et lui assurant un

taux d'autosuffisance en énergie de 47% en 1990 contre 20% en 1973 : une réussite industrielle incontestable. De plus, ce programme a permis à la France de faire partie des pays les plus vertueux pour ce qui est de l'émission de CO<sub>2</sub> lors de la production d'électricité. Depuis l'accident de Fukushima, de nouvelles dispositions ont été mises en place pour renforcer la sécurité des installations et certaines ont été équipées d'énormes moteurs diesels pour une alimentation électrique de secours.

Aujourd'hui, les premiers réacteurs atteignent 44 ans et leur durée de vie devrait pouvoir être prolongée, a minima, jusqu'à 50 ans et même 60 ans pour la majeure partie d'entre eux, après accord de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) ; un plan de renouvellement est à l'étude. Un nouveau réacteur, l'European Pressurized Water Reactor (EPR), de type REP, a été développé conjointement avec l'Allemagne en intégrant les normes de sûreté allemandes en sus des normes françaises ce qui aboutit à un réacteur dont la construction est très compliquée et dont le coût est très élevé. Le retour d'expérience de Fukushima a également été pris en compte. EDF étudie une version simplifiée, l'EPR-2 ; quant aux réacteurs SMR, ils ne devraient pas être déployés pour le plan de renouvellement mais pour de nouvelles applications (chaleur, hydrogène, ...).

Les problèmes techniques de l'EPR en construction à Flamanville, la dérive de son coût et sa mise en exploitation sans cesse retardée sont des arguments "faciles" pour les antinucléaires mais les raisons de ces difficultés sont connues et sont le lot de toute tête de série qui doit essuyer les plâtres. L'EPR n'a pas que des inconvénients si on le compare aux éoliennes, par exemple. Quelques chiffres pour fixer les idées.

Grâce au processus de fission des noyaux d'uranium, la densité de puissance (ou intensité énergétique) que l'on obtient dans un réacteur nucléaire est énorme, de l'ordre de 110 kW thermique par litre de cœur (c'est l'un des avantages du nucléaire). Pour l'EPR de 1600 MWe, soit en gros 5000 MW-thermique, le volume de la partie centrale du réacteur (la chaudière nucléaire) est inférieur à 50 m<sup>3</sup>.

Pour produire autant d'énergie qu'un seul EPR (dont la disponibilité serait de 80%), il faudrait environ 500 (très grosses) éoliennes de 8 MW pour tenir compte du fait que l'éolienne ne délivre la puissance nominale que pendant 30% du temps.

L'éolienne, l'un des plus gros modèles de la Société danoise VESTAS, a un mat de 140 m, un rotor de 164 m de diamètre soit une hauteur totale de 220 m (quasiment la hauteur de la Tour Montparnasse - 210 m).

Elle est fixée sur un énorme bloc de béton qu'il faudra également enlever lors de la phase de démantèlement ! Par ailleurs, comme elles doivent être séparées les unes des autres de 500 m, pour ne pas se gêner mutuellement, l'emprise totale au sol correspondrait à une surface de 120 km<sup>2</sup> (*la surface de la ville de Paris incluant les bois de Boulogne et de Vincennes est de 105 km<sup>2</sup>*). Pour fonctionner, l'éolienne a besoin de vent mais s'il y en a trop (> 90 km/h), il faut l'arrêter et la mettre en sécurité. Quand une éolienne commence à fonctionner, il faut récupérer sa production sur le champ, en priorité, et réduire d'autant la production d'une source d'énergie pilotable (*réacteur, barrage, centrale au gaz...*).

Compte tenu des nuisances, les grosses éoliennes de ce type sont plutôt installées en mer (*parcs éoliens marins*). Quant à la durée de vie, celle d'une éolienne est donnée pour 25 ans et celle de l'EPR serait de 60 ans.

Les études et développements des nouveaux réacteurs sont réalisés dans des conditions qui ne sont plus celles des années 1970 ; les accidents de Tchernobyl et de Fukushima ont marqué les esprits, alors comment gagner la confiance du public français pour un programme nucléaire de renouvellement du parc actuel ?

Pour l'AIEA, parvenir à traduire des informations complexes dans un langage compréhensible par le grand public fait partie intégrante du processus. C'est ce que font déjà les Associations suivantes, parmi d'autres, depuis la SFEN, créée en 1973, jusqu'aux Voix du nucléaire, créée en 2018 :

- La Société Française d'Énergie Nucléaire (SFEN) : [www.sfen.org](http://www.sfen.org)
- Sauvons le climat (SLC) : [www.sauvonsleclimat.org](http://www.sauvonsleclimat.org)
- Le Groupe Argumentaire sur les Énergies Nucléaire et Alternatives (GAENA) : [www.energethique.com](http://www.energethique.com)
- L'Association des écologistes pour le nucléaire (AEPN) : [www.ecolo.org](http://www.ecolo.org)
- Les Voix du nucléaire : [www.voix-du-nucleaire.org](http://www.voix-du-nucleaire.org)

Pour ces Associations, les avantages du nucléaire l'emportent sur les inconvénients. Mais il faut également prendre en compte les avis différents, voire opposés, exprimés, par exemple, par : [www.negawatt.org](http://www.negawatt.org) ou [www.sortirdunucleaire.org](http://www.sortirdunucleaire.org) et d'autres. Pour ces Associations, les inconvénients du nucléaire (*les déchets nucléaires, le stockage géologique, le démantèlement, les coûts, ...*) l'emportent sur les avantages.

Peut-on concilier des points de vue si différents ? En supposant que le nucléaire représente, pour quelque temps encore, un élément incontournable du mix électrique et de la transition énergétique, il est essentiel de faire mieux connaître les réalités de l'énergie nucléaire,

ses avantages et ses inconvénients, les sondages ayant montré que, contrairement aux Suédois, les connaissances des Français, dans ces domaines scientifiques et techniques complexes, présentaient de sérieuses lacunes. En effet, pour pouvoir échanger utilement, il importe que les interlocuteurs aient une certaine maîtrise de ces sujets.

Le livre "L'atome écologique" que Bernard WIESENFELD a publié en 1998 participe de la même démarche : il s'adresse au grand public auquel il souhaite apporter des informations aussi objectives que possible sur les technologies nucléaires et leurs enjeux.

## ÉNERGIE NUCLÉAIRE ET URGENCE CLIMATIQUE : LES CHOIX DE LA FRANCE

Deux ouvrages, parmi les plus récents, décrivent le rôle que peut jouer l'énergie nucléaire dans la réduction des gaz à effet de serre, compte tenu de l'importance des énergies fossiles dans la consommation mondiale actuelle et de l'urgence climatique.

Le premier : "**Pari sur le climat : Le mouvement anti-nucléaire met-il notre avenir en péril ?**" des finlandais Janne M. KORHONEN et Rauli PARTANEN, est la traduction de "Climate gamble" que Mattias m'avait donné à Uppsala. "Pour prévenir les changements climatiques annoncés, la production mondiale d'énergie doit être libérée presque totalement de toute combustion de combustibles fossiles d'ici 2050. En même temps, la consommation d'énergie ne cesse de croître, la population augmente et les plus pauvres tentent de se construire une vie meilleure. Avec près de 87 % d'énergie produite avec des combustibles fossiles, le défi est sans précédent par son ampleur et son urgence. Les organisations internationales conviennent que pour le relever, utiliser tous les outils disponibles est indispensable : énergies renouvelables (EnR), stockage de l'énergie, efficacité énergétique, capture et stockage du carbone. Et les centrales nucléaires".

Le second : "**La bataille pour le climat**", de Myrto TRIPATHI, Présidente des Voix du nucléaire, fait le même constat pour ce qui est du rôle des gaz à effet de serre sur l'évolution du climat et de l'urgence à les réduire alors qu'ils ne cessent d'augmenter. Elle montre aussi, qu'au-delà de l'abandon évident des sources d'énergies fossiles, il faut nous tourner résolument vers un usage équilibré entre les énergies hydraulique et nucléaire et les EnR.



En France, depuis quelques années, c'est la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE) qui pilote la politique énergétique du pays :

<https://cpdp.debatpublic.fr/cpdp-ppe/index.html>

Dans un premier temps, elle est définie pour deux périodes successives : 2019-2023 et 2024-2028. Les objectifs de la PPE-2020 portent sur la baisse de la consommation d'énergie, la réduction de l'usage des énergies fossiles et la diversification du mix énergétique qui passe par le développement des énergies renouvelables (EnR : éoliennes, terrestres ou en mer, photovoltaïque, hydraulique et biogaz) et par la réduction du nucléaire.

Le Gouvernement prévoit un doublement des capacités installées d'EnR électriques d'ici 2028, parallèlement, il se fixe l'objectif d'atteindre une part du nucléaire au sein du mix électrique de 50% à l'horizon 2035, comparé à 70% en 2012, ce qui impliquerait la fermeture de 14 réacteurs nucléaires, dont 4 à 6 réacteurs d'ici 2028 (y compris les 2 de Fessenheim).

La France vise, elle aussi, un mix énergétique neutre en carbone à l'horizon 2050 en utilisant le nucléaire et les énergies renouvelables non seulement pour la production électrique mais également pour le système énergétique des transports, de l'industrie et le chauffage urbain. Les réseaux d'électricité, de biogaz, d'hydrogène et de chaleur doivent être interconnectés et des moyens de stockage et de conversion entre les différentes formes d'énergie doivent être ajoutés aux moyens de production. Par exemple, l'électricité intermittente dont le stockage sur des temps longs pose problème, peut être convertie en une énergie plus facilement stockable et réutilisable à la demande comme la chaleur ou l'hydrogène. De plus, pour ce qui est de la production d'électricité, celle-ci pourra être continue ou intermittente, centrale ou locale, avec un réseau bidirectionnel, puisque le consommateur pourra également être producteur et qui devra aussi être intégré dans le système de régulation européen. Les équipes du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives développent des solutions pour chaque fonction (*production, conversion, stockage*) et chaque réseau (*électricité, gaz, chaleur, hydrogène*) de ce gigantesque super-réseau dont le fonctionnement doit, par ailleurs, être très fiable.

Dans son n°241 de juillet/août 2020, Les Défis du CEA consacrent un dossier aux énergies décarbonées et aux travaux du CEA dans ce domaine.

Au sujet des énergies renouvelables pour la production d'électricité :

- 1- Seules les énergies hydraulique et nucléaire permettent d'offrir une solution complètement décarbonée. En 2019, la contribution des différents types d'énergie à la production électrique française était la suivante : nucléaire 71%, renouvelables (hydraulique, éolien, solaire, bioénergies) 21% (dont 11% hydro), fossiles (gaz, fioul, charbon) 8%, c'est-à-dire que la décarbonation du mix a été de 82% (nucléaire + hydro).
- 2- Fin janvier 2021, le gestionnaire du réseau électrique RTE et l'AIE ont publié un rapport qui conclut au caractère plausible d'un mix électrique fondé sur "des parts très élevées d'énergies renouvelables" à l'horizon 2050. Selon cette étude, dans 30 ans, la France pourrait se passer d'électricité d'origine fossile et d'origine nucléaire ; cela semble possible mais seulement si plusieurs conditions techniques sont impérativement réunies, ce qui n'est actuellement pas le cas. Et le rapport ne dit rien sur les conditions économiques et sociales que suppose la réalisation d'un tel scénario.
- 3- A terme, toutes les centrales au charbon ainsi que les centrales nucléaires allemandes devraient être remplacées par des unités de production à base d'énergie renouvelable toutes connectées par l'intermédiaire d'un réseau très performant délivrant la puissance demandée et participant à la stabilité du réseau européen. *Des représentants de l'industrie allemande font cependant remarquer que, à leur avis, cela ne sera pas réalisable à court et moyen terme de sorte que des centrales au gaz naturel supplémentaires seront nécessaires pour palier à l'intermittence de l'énergie solaire et de l'éolien et pour assurer un système électrique fonctionnant sans coupures.*

### Remarques :

La priorité des industriels est de faire tourner les usines, même si, pour cela, il faut envoyer un peu plus de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Rappelons, par ailleurs, que le gaz naturel émet 40 fois plus de CO<sub>2</sub> que le nucléaire qui en émet peu (un autre avantage du nucléaire).

- 4- Un incident récent est venu rappeler qu'une proportion importante d'énergies renouvelables pouvait fragiliser la stabilité du réseau de transport. [La fiche GAENA n°57](#) présente le réseau électrique européen et [l'article GAENA n°57](#) décrit l'incident du 8 janvier 2021. Voir également l'article de Jean-Paul HULOT dans le dernier numéro du bulletin (n° 121) du Bureau National de l'ARCEA.

## LES FRANÇAIS ET LE NUCLÉAIRE

Le Baromètre de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) suit depuis plus de 30 ans la perception des risques et de la sécurité par les Français, en particulier tout ce qui concerne le nucléaire :

[https://www.irsn.fr/FR/IRSN/Publications/barometre/Documents/IRSN\\_Barometre\\_2020-analyse.pdf](https://www.irsn.fr/FR/IRSN/Publications/barometre/Documents/IRSN_Barometre_2020-analyse.pdf)

Parmi les différentes sources d'énergies, le solaire et l'éolien sont celles qui bénéficient de l'image la plus positive. Le nucléaire jouit d'une bonne image auprès d'un tiers des Français seulement, dépassant le pétrole d'une courte tête.



Solaire et éolien

Les deux arguments les plus cités en faveur du nucléaire sont l'indépendance énergétique et le faible coût de l'électricité. En sa défaveur, sont cités la production de déchets nucléaires et le risque d'accident.

Une majorité de Français (54%) juge possible qu'un accident de la même ampleur que celui de Fukushima se produise en France. Ils continuent d'ailleurs à être très marqués par les accidents nucléaires de Tchernobyl et de Fukushima, qui sont les deux événements catastrophiques déclarés comme les plus marquants (à égalité avec 23%), devant le séisme et le tsunami japonais de mars 2011 (12%) et l'explosion de l'usine AZF à Toulouse en 2001 (12%).

L'exigence d'un haut niveau de sûreté nucléaire est confirmée par 86% des Français qui déclarent que "les exploitants des sites nucléaires doivent protéger leurs installations de tous les risques, même ceux jugés très improbables" et 82% qui jugent prioritaire de "renforcer les inspections des autorités compétentes dans les installations". Enfin, concernant la compétence et la crédibilité des acteurs du nucléaire, le Baromètre témoigne d'une perception plus positive des acteurs dans leur ensemble. Pour la première fois cette année, l'ASN, le CNRS et l'IRSN sont à la fois perçus comme les plus compétents et les plus crédibles dans le domaine. Les organismes scientifiques, les experts et les exploitants sont perçus comme compétents et crédibles, de même,

dans une moindre mesure, que les associations écologistes et de consommateurs. Les acteurs perçus comme les moins crédibles et moins compétents en la matière restent les syndicats, les journalistes mais surtout les acteurs politiques, au niveau local comme au niveau national.

En décembre 2018, la Société Française de Physique (SFP) a publié un dossier intitulé : "L'électricité nucléaire : questions ouvertes et points de vue" :

<https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2018/05/refdp2018-60.pdf>

*"Le caractère très vif et contradictoire des débats sur le nucléaire est révélateur de la nécessité de prendre en compte une multitude de données afin de se construire une idée aussi exacte et objective que possible dans un environnement excessivement complexe. L'esprit de ce numéro spécial de Reflets de la physique est d'adopter une attitude éditoriale apaisée, mettant en avant les arguments d'un débat contradictoire de manière extrêmement factuelle sur un grand nombre (bien que limité) de sujets, présentant un état des lieux des connaissances et des controverses qui manque souvent aux citoyens pour se forger une opinion".*

Un excellent dossier pour aborder les problématiques du nucléaire, son rôle dans la société française, aujourd'hui et demain, complété par de très nombreuses références.

## L'AVENIR DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE REVISITÉ ?

L'Europe a entrepris de faire la liste des activités économiques en fonction de leur impact sur la planète (la taxonomie verte). Pour l'instant, le nucléaire n'a pas été retenu mais le Centre Commun de Recherche (CCR), qui apporte l'expertise scientifique à la Commission Européenne, vient de terminer l'étude des aspects qui posaient problème :

[https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/business\\_economy\\_euro/banking\\_and\\_finance/documents/210329-jrc-report-nuclear-energy-assessment\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/business_economy_euro/banking_and_finance/documents/210329-jrc-report-nuclear-energy-assessment_en.pdf)

Dans sa conclusion, le CCR précise que : "les analyses n'ont pas révélé la moindre preuve scientifique que l'énergie nucléaire pouvait nuire plus à la santé humaine ou à l'environnement que d'autres technologies de production d'électricité. Quant à l'enfouissement des déchets, il est considéré comme efficace et sûr dès lors qu'il est effectué en couches géologiques profonde". Ce rapport doit encore être validé par deux comités d'experts avant d'être soumis à la Commission Européenne.

Il est cependant à craindre que, même si les avantages du nucléaire apparaissent encore plus clairement surtout pour ce qui est de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la Commission Européenne ne prenne pas position (*elle n'est pas obligée de le faire*) et laisse chaque Etat choisir entre le nucléaire ou les gaz à effet de serre.

Dans la lettre ouverte signée par 46 ONG environnementales à la Présidente de la Commission lui demandant que le nucléaire soit mieux pris en compte dans la taxonomie européenne au nom du climat :

<https://www.sfen.org/sites/default/files/public/atoms/files/lettre-ouverte-nucleaire-taxonomie.pdf>

Le 23 mars dernier, le Haut-Commissaire au Plan (HCP) a publié un document dans lequel il expose le rôle que devrait jouer l'électricité dans l'économie nationale ainsi que le rôle du nucléaire pour sa production :

[https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2021/04/electricite\\_le\\_devoir\\_de\\_lucidite\\_0.pdf](https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2021/04/electricite_le_devoir_de_lucidite_0.pdf)

*"Dans les décennies qui viennent, l'électricité, en raison des engagements que notre pays a pris en matière de limitation des émissions de gaz à effet de serre pour lutter contre le réchauffement climatique, est appelée à occuper une place de plus en plus importante dans notre économie et notre société. Le débat sur l'énergie tel qu'il se développe est un lieu de non-dits ou d'a priori, jamais dévoilés, dont la persistance empêche la tenue d'une discussion publique, sincère et efficace. Devant une telle somme d'incertitudes et de difficultés d'ores et déjà identifiées, devant l'ampleur de l'effort à conduire pour la Nation, un immense travail de programmation est à mener".*

## Remarque :

La proposition du HCP d'utiliser au maximum l'électricité décarbonée pour tous les usages ressemble fort à la solution retenue par les Suédois.

## CONCLUSIONS :

***La PPE-2020 doit être révisée en 2023. Cette révision permettra de faire le bilan de toutes les actions engagées concernant la production, la conversion et le stockage de chacune des formes d'énergie que sont l'électricité, le biogaz, la chaleur et l'hydrogène obtenues à partir des énergies renouvelables et de l'énergie nucléaire. Seront également évaluées les performances de chacun des réseaux déployés à l'échelle du territoire national et sur de grandes périodes de temps, avec des conditions***

***atmosphériques qui peuvent mettre à rude épreuve les systèmes de production à base de EnR. La comparaison entre les performances obtenues et les performances attendues donnera une indication sur la pertinence du modèle de la PPE-2020.***

***Le Haut-Commissaire au Plan propose de revoir rapidement, avec toutes les parties prenantes, la PPE actuelle et, plus généralement, les options possibles pour l'évolution du système énergétique français. Si l'on veut que cet énorme travail soit terminé pour la révision de 2023 et que ses conclusions soient mises en œuvre dès 2024, il faut s'y mettre au plus vite d'autant que, d'après l'AIE, à la mi-2021, les émissions de CO<sub>2</sub> reprennent au même niveau qu'en décembre 2019, avant le ralentissement de l'économie mondiale dû à la pandémie.***

***Quant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, elle dépendra, pour une grande part, du rôle que le nucléaire sera amené à jouer dans la production d'électricité dans les décennies à venir.***

# REMERCIEMENTS

Je voudrais d'abord remercier mes amis suédois, **Leif NILSSON** et **Mattias LANTZ**, qui m'ont fait découvrir ces domaines passionnants mais terriblement complexes de l'énergie et du climat.

Ensuite, je voudrais remercier **Jean LACHKAR** pour ses conseils et ses encouragements lors de la rédaction des différentes versions de l'article.

Je voudrais également remercier le **GAENA** et plus particulièrement les rédacteurs des fiches et des articles que j'ai cités en référence.