

1 Le déclin du nucléaire en Occident est-il inexorable?

Ernest Mund

- Le mois dernier Luc Sterckx nous a entretenus ici même de la transition énergétique avec beaucoup de brio et d'humour. Ses propos n'étaient pas vraiment optimistes mais cela ne l'a pas empêché de nous faire rire. Il n'a pas pu couvrir la totalité du sujet et mon exposé va compléter le sien.
- Je vais me focaliser sur le nucléaire et mettre l'accent sur un aspect dont on parle peu : l'innovation technologique. Malgré ses qualités et ses succès, la technologie actuelle est loin d'être parfaite. Toutefois ses principes physiques offrent des perspectives intéressantes pour la production d'électricité et de chaleur à travers la diversité de leurs mises en œuvre. La fermeture du cycle du combustible est un élément essentiel pour assurer une utilisation maximum du contenu énergétique du plutonium et des actinides mineurs et ne laisser que des éléments radioactifs avec des temps de décroissance limités.
- L'exploitation de ces perspectives à l'échelle industrielle demande confirmation. Au stade actuel rien ne permet de les infirmer. C'est essentiellement une question de temps. Je ne pourrai bien sûr qu'esquisser certaines innovations mais je voudrais surtout vous en faire comprendre l'intérêt.
- Une question se pose : le jour venu, ces innovations seront-elles acceptées par une société qui leur est aujourd'hui assez hostile? La réponse est loin d'être évidente ce qui explique les relents de pessimisme de mon titre.
- Déjà au début de ma carrière, le nucléaire était dans la ligne de mire de l'opinion publique. L'horreur des bombardements d'Hiroshima et Nagasaki y était pour une grande part : le nucléaire faisait peur. J'avais confiance en l'avenir de cette technologie nouvelle qui se développait dans un climat scientifique et technique très favorable. Je pensais que le temps ferait son œuvre et calmerait les appréhensions. Mais il y eut Three Mile Island, Tchernobyl et Fukushima trois événements majeurs qui renforcèrent l'opinion dans son hostilité. Celle-ci est allée croissante malgré des succès indéniables et l'utilisation de la technologie est clairement remise en question aujourd'hui.

2 - Parler de déclin pour l'Europe occidentale n'a rien d'exagéré comme l'illustre cette figure : dans la partie gauche, en rouge, les pays opposés au nucléaire dès le départ, ou qui y ont renoncé ; en bleu, les pays équipés de centrales et ceux qui sont en voie de l'être.

- La partie droite montre qu'en 2035 la zone rouge sera nettement plus importante : l'Allemagne, la Suisse et la Belgique y auront renoncé si, en ce qui nous concerne, rien ne

change dans l'intervalle. En Espagne, les sept centrales encore en service auront atteint leur limite d'âge et il n'est pas prévu de les prolonger.

- A l'inverse, la Grande-Bretagne et des pays d'Europe de l'est comme la Pologne, la Roumanie, et l'Estonie sont favorables au nucléaire et investissent (ou vont investir) dans des installations de Génération-III. En ce qui concerne la Grande-Bretagne on peut même parler de Génération-IV, ce qui relativise l'idée de déclin sans pour autant l'effacer.

- La France occupe une place à part. En matière d'électricité sans émission de CO₂ elle est de loin le meilleur élève de la classe avec une part de 90%, grâce à ses centrales nucléaires et à ses barrages. Mais, la fermeture de 14 centrales nucléaires à l'horizon 2035 décidée récemment n'a aucun sens face aux objectifs clairement déclarés de défense du climat. Ces centrales pourraient fort bien avoir leur durée de vie prolongée de 20 ans.

- Plus inquiétant est l'abandon du projet ASTRID de réacteur rapide de Génération-IV dans lequel la France pouvait tirer grand profit de son expérience passée. Ici c'est l'avenir qui est remis en cause avec le renoncement à la fermeture du cycle du combustible. Les opposants auront beau jeu d'affirmer que le problème des déchets est insoluble. Force est de constater que même au pays le plus performant en matière d'utilisation de l'atome, la confiance s'effrite. Les déboires accumulés de l'EPR à Flamanville y sont responsables en grande partie. Mais ils ne sont pas les seuls.

3 - La situation du nucléaire aux Etats-Unis est fragile également. Le pays occupe la première place au monde pour la taille de son parc mais la rentabilité de celui-ci a été mise à mal depuis quelque temps par les découvertes de gaz de roche mère, l'arrivée des énergies renouvelables et les modifications qui en ont résulté sur le marché de l'électricité. Nonante six unités sont toujours en opération ; six ont été fermées (ou vont l'être) pour raisons économiques et 23% de la puissance installée est sous le seuil de rentabilité, le complément étant tout juste au-dessus de la ligne de flottaison. Le problème a donc une composante économique sur laquelle je reviendrai.

- Il y a aussi un aspect politique. Des personnalités notoires du Parti Démocrate ont adopté récemment une attitude ouvertement hostile au nucléaire avec le *Green New Deal*. Certes, elles ne sont pas nécessairement au premier plan mais si Elizabeth Warren candidate à l'investiture venait à être élue à la présidence en 2020, elle opterait pour une fermeture du parc nucléaire américain en 2035.

4 - C'est aux Etats-Unis que l'on trouve les plus chauds partisans des 100% d'énergie renouvelable (on en trouve en Europe aussi), convaincus chiffres à l'appui qu'à l'horizon 2050 la planète entière pourrait satisfaire tous ses besoins énergétiques grâce au vent, au soleil, à l'hydraulique et à la géothermie avec renonciation complète aux énergies fossiles et au nucléaire compensés par des moyens considérables de stockage.

- Les auteurs d'une étude faite à Stanford, bien que contredits par de nombreux spécialistes sur base de l'irréalisme de leurs hypothèses et du caractère incomplet de leurs données, ont

largement répandu cette thèse reprise un peu partout dans le monde, malgré son caractère parfaitement utopique.

5 - Illustration parfaite des contrastes qui le caractérisent, le pays de Jacobson et Delucchi est aussi celui où de nouveaux venus sur la scène industrielle préparent activement un nucléaire plus adapté à la mutation en cours du système électrique. De nouvelles installations verront bientôt le jour avec comme caractéristiques essentielles une plus petite taille, **5a** et des technologies différentes de celle des réacteurs à eau.

6 - Le nucléaire à usage civil installé dans les années septante est le fruit de l'histoire. Le prototype des réacteurs à eau sous pression, le réacteur de Shippingport, a été conçu dans la ligne du système de propulsion navale mis au point au début de la guerre froide. Au fil du temps, la puissance unitaire des installations civiles a crû **6a** - **6b** pour bénéficier d'une économie d'échelle sur les coûts d'investissement au kWe. **6c** La puissance unitaire de l'EPR en construction à Flamanville est de 1650 MWe. Même avec des moyens de suivi de charge, c'est beaucoup, compte tenu de la mutation du marché de l'électricité qui requiert de la flexibilité.

7 - Comme vous le voyez les coûts d'investissements ont fortement augmenté au cours du temps pour renforcer inlassablement la sûreté des installations. C'est particulièrement visible dans les années 80 après l'accident de TMI. Le rallongement des délais de mise en service y est aussi pour une part importante. **7a** Pour l'EPR de Flamanville et la centrale Vogtle-3 équipée d'un réacteur Westinghouse AP-1000, en construction aux Etats-Unis, la mise en service aura pris plus de 10 ans pour des coûts largement supérieurs à 8.000 \$US au kWe installé, ce qui est considérable. La rentabilité de ces installations est essentielle.

8 - Que l'introduction d'énergies renouvelables intermittentes à coût marginal nul mette cette rentabilité à mal est illustré sur cette figure. Sans renouvelables, la monotone de charge en noire montre que le nucléaire fournit la puissance en base avec un facteur de charge maximum. Avec une fourniture éolienne de 30% la monotone de charge résiduelle est la courbe en gris. **8a** On aperçoit qu'une fourniture d'énergie équivalente à l'aire du triangle rouge passe du nucléaire vers l'éolien réduisant ainsi le facteur de charge du nucléaire et sa rentabilité.

9 - Les zéloteurs des renouvelables intermittentes répètent à l'envi que ces énergies sont meilleures marché que le nucléaire. L'affirmation prête à confusion. Si les coûts des équipements en éolien et solaire ont effectivement beaucoup baissé depuis quelques temps, ces coûts ne sont pas les seuls. S'y ajoutent des coûts *système* qui incluent l'utilisation, l'intermittence et le raccordement des équipements décentralisés. Et ces coûts sont élevés comme le montre cette figure. De plus ils croissent avec le taux de pénétration. Plus celui-ci est élevé, plus l'absence des renouvelables nécessite de la réserve pilotable et/ou du stockage pour satisfaire la demande et éviter un effondrement du réseau.

10 - L'OCDE a confié à une équipe internationale de chercheurs la tâche d'évaluer le coût de production d'électricité intégrant les renouvelables jusqu'à un taux de pénétration de 75% et

leur coexistence avec le nucléaire, la contrainte étant de limiter les émissions de CO₂ à une valeur de 50g/kWh. Plusieurs scénarios ont été envisagés pour un pays représentatif de l'OCDE dont la demande annuelle d'énergie électrique se situerait aux alentours de 600 TWh. Aucun *a priori* sur la composition du portefeuille de production n'a été imposé à l'exception des taux de pénétration des renouvelables et de l'existence d'une puissance hydroélectrique donnée, identique dans tous les scénarios.

10a - Une conséquence de l'augmentation du taux de pénétration des renouvelables est la cannibalisation de la production nucléaire. Au-delà de 50% la production nucléaire disparaît, sa rentabilité étant réduite à zéro. La puissance renouvelable installée dans le cas des 75% de pénétration est supérieure d'un facteur 5 à la puissance nucléaire dans le schéma de base, à cause de la faiblesse du facteur de charge (30%). Mais elle assure l'essentiel de la demande au long de l'année avec du gaz en cycle combiné et de l'hydraulique.

11 - L'information essentielle se trouve ici : le coût annuel de fourniture d'électricité. En passant du scénario de base, avec environ 75% de nucléaire, au scénario avec 75% d'électricité fournie par les renouvelables, **11a** le coût système complet du kWh est multiplié par un facteur 2.

12 - L'existence d'une corrélation entre le taux de pénétration des renouvelables intermittentes et les prix de détail de l'électricité mise en évidence ici n'est donc pas un effet du hasard. Le taux de pénétration de ces énergies en Belgique n'est encore qu'un peu plus de 10% mais le prix de détail de l'électricité (environ 33 centimes d'euros au kWh) est un des plus élevés d'Europe, du fait des coûts de transport, de distribution et des taxes. Un foyer sur cinq en Belgique aurait des difficultés à honorer ses factures d'électricité. Que sera-ce lorsque la pénétration des renouvelables aura augmenté ?

13 - Le nucléaire va-t-il disparaître sous l'effet des énergies renouvelables. Certainement pas et pour deux raisons : il est indispensable comme source pilotable d'électricité et de chaleur industrielle à haute température dépourvue de trace carbone et la technologie dispose de prodigieuses possibilités d'adaptation dont les non-initiés n'ont pas conscience. **13a** Une première adaptation réside dans la taille des installations.

- Les Etats-Unis ont exploité avec succès des réacteurs de petites tailles souvent à des fins de transport. Le pays compte de nombreuses régions isolées (en Alaska, aux îles Hawaï) où la fourniture d'énergie est difficile. Les populations concernées ne sont pas nombreuses. Les puissances requises ne sont donc pas très élevées et l'acheminement de combustibles classiques est onéreux. Aucun de ces systèmes n'a donné lieu à un accident retenu dans les annales. **13b** D'où l'idée symbolisée dans cette figure de remplacer des réacteurs de grande taille par des unités de tailles réduites. **13c** Celles-ci peuvent être réunies dans le même bâtiment et partager des services auxiliaires. **13d** En deçà d'une valeur de la puissance unitaire, on peut même envisager des modules préassemblés en usine et amenés sur le site d'exploitation, par transport fluvial ou routier.

- Le changement de paradigme est complet tout comme le fut en son temps, l'introduction par Henry Ford de la construction automobile en série plutôt qu'à l'unité et au goût du client. D'autres pays comme le Canada, la Russie ou la Chine font le même constat.

14 - L'accident acceptable est celui qui n'a pas de raison d'être. Dans une installation de puissance et de taille réduites, il est possible d'insérer le circuit primaire et le générateur de vapeur à l'intérieur de la cuve de pression, réduisant à zéro le risque de vaporisation de l'eau primaire. Plus de tuyauteries et de pompes primaires, donc plus d'accident par perte de réfrigérant. Ces petits réacteurs modulaires appelés SMR (pour *Small Modular Reactors*) ont une sûreté intrinsèque bien plus importante que celle des grandes unités.

15 - Le concept modulaire est-il intéressant au plan économique ? La réponse est loin d'être unanime, l'abandon de l'effet d'échelle étant contraire à l'intuition. Pour les tenants du concept elle est positive et il y a deux manières de présenter les choses. En haut à gauche, vous reconnaissez la figure justifiant l'effet d'échelle pour les unités actuelles. Le fractionnement en modules conduit à des diminutions de coûts, sans compter les bénéfices de la sûreté intrinsèque du concept, réduisant les exigences en sûreté active. Au final, les coûts au kWe installé des deux paradigmes devraient être à peu près les mêmes.

- Mais, il y a aussi l'aspect présenté en bas à droite : le choix de puissances modulaires permet d'étaler les investissements, en suivant l'évolution temporelle de la demande d'énergie électrique. Pour un cas d'école, la courbe rouge correspondant aux réacteurs modulaires montre une immobilisation de capitaux bien moindre que celle liée à la courbe bleue relative aux systèmes classiques. Les milieux économiques ne peuvent qu'apprécier un tel changement.

16 - Retenez le nom de NuScale. Ce nouveau venu sur le marché américain des concepteurs de réacteurs, est en passe d'être le premier à réaliser une centrale composée de 12 unités de 50 MWe. Cette centrale, à construire dans l'Idaho par la société d'ingénierie Fluor, gros actionnaire de NuScale, devrait entrer en service vers 2027. Le module représenté ici, fait actuellement l'objet de la procédure d'homologation par l'autorité de sûreté nucléaire américaine. Entamée début 2017, la procédure devrait aboutir en septembre 2020. Les premiers indices sont très favorables.

- NuScale sera le premier concept modulaire PWR intégré à obtenir le feu vert de la NRC et à entrer sur le marché. En Europe, elle vient de signer un protocole d'accord avec la société roumaine d'électricité nucléaire qui exploite deux réacteurs de type CANDU, pour examen d'un équipement du pays à long terme, à l'aide de cette nouvelle technologie.

- A titre purement indicatif, le coût d'installation du concept NuScale à l'unité de puissance estimé en 2017 devrait être inférieur d'un facteur 1,5 au coût de construction 2019 de l'EPR de Flamanville. L'avenir dira si ceci tient la route.

17 - Un autre exemple illustratif des unités modulaires est l'installation sur barge développée par les Russes. Cette figure vous montre la barge *Akademik Lomonosov* équipée de deux PWR de 40 MWe quittant Mourmansk pour rejoindre le port de Pevek au bord de la mer de Sibérie.

Ces réacteurs sont les mêmes que ceux qui assurent la propulsion des brise-glaces russes. Ils seront utilisés pour de la cogénération électricité/chaleur dans des régions isolées avec sites miniers, faiblement peuplées et nécessitant des apports d'eau douce par dessalement d'eau de mer.

18 - Une deuxième adaptation de la technologie réside dans le choix de filières autres que celle des réacteurs à eau. Il en existe plusieurs comme le montre cette figure empruntée au Commissariat français à l'Energie Atomique. Un comité international réuni au début des années 2000 à l'initiative des Etats-Unis en a sélectionné six sur base de leurs qualités intrinsèques : exploitation optimale du cycle du combustible et facilités de mise en œuvre. L'initiative est connue sous le nom de *Génération-IV*. Parmi les différentes filières on trouve, à parts à peu près égales, des réacteurs à neutrons rapides et des réacteurs à neutrons thermiques. Ces nouveaux concepts font évidemment l'objet de travaux intenses de R&D dans les états membres du Forum Génération-IV avec un objectif de déploiement vers les années 2050. **18a** L'installation MYRRHA en cours d'études au Centre nucléaire de Mol avec son cœur refroidi au plomb-bismuth peut être considérée comme un concept de Génération-IV. Sa particularité – qui la rendra unique au monde - est qu'elle disposera de la possibilité de fonctionner en mode sous-critique avec un apport extérieur de neutrons fournis par une source de spallation.

19 - MYRRHA ayant déjà fait l'objet d'un exposé ici même, je m'arrêterai plutôt sur un sujet moins connu et très prometteur : celui des réacteurs à sels fondus (les MSR pour *Molten Salt Reactors*).

20 - Alvin Weinberg qui dirigea le laboratoire d'Oak Ridge dans les années 50 raconte, qu'à la période de gloire du *Chicago Metallurgical Laboratory*, celui-là même où Fermi avait conçu la première pile, un débat fut engagé au sujet de la nature de celle-ci. Etait-elle un système mécanique ? Ou plutôt une usine chimique ? Les réactions nucléaires qui s'y déroulaient faisaient apparaître des substances nouvelles, ce qui rendait la question pertinente. Eugène Wigner et Harold Urey penchaient pour l'usine chimique. Ils stimulèrent l'intérêt des équipes d'Oak Ridge pour le développement de sels fondus à base d'uranium, mieux à même de mettre la caractéristique d'usine chimique à profit.

- Qu'est-ce qu'un sel fondu ? Prenez par exemple du chlorure de sodium, le sel ordinaire. Solide à la température ambiante, il devient liquide, transparent comme l'eau, si on le porte à la température de 800°C et il reste à l'état liquide jusqu'aux alentours de 1400°C. Ceci est particulièrement intéressant pour des raisons de transferts de chaleur et de sûreté. **20a** L'éprouvette au centre droit de la figure montre un sel fluoré contenant du béryllium et du lithium. Il a l'apparence de l'eau. Comme de nombreux actinides y sont solubles, il peut constituer la base d'un combustible liquide.

- En quelques années, les équipes d'Oak Ridge réalisèrent deux expériences de réacteurs à sel fondu. La plus importante des deux, le *Molten Salt Reactor Experiment* débuta en 1965. Elle fut couronnée de succès. Mais son existence fut brève ; elle fut mise définitivement à l'arrêt fin 1969.

- Ce fut la conception des *systèmes mécaniques* (la flèche bleue) qui l'emporta pour les raisons invoquées. Les tenants de *l'usine chimique* (la flèche rouge) eurent une revanche tardive en 2001. Parmi les 6 concepts retenus pour *Génération-IV*, les réacteurs à sel fondu furent en effet reconnus à cette date comme les réacteurs nucléaires les plus sûrs.

L'installation d'Oak Ridge avait été conçue comme un surgénérateur à neutrons thermiques pour exploiter le cycle du thorium et produire de l'uranium-233. Les vétérans de l'équipe et leurs disciples introduisent une idée novatrice : utiliser des sels chlorés de préférence aux sels fluorés de manière à produire un spectre de neutrons rapides permettant de détruire les actinides mineurs par fission et accroître ainsi les ressources énergétiques. Seuls des sels chlorés permettent de satisfaire cette exigence.

21 - Cette figure présente huit projets de réacteurs à sels fondus parmi ceux en cours de développement aujourd'hui dans le monde. Les quatre premiers utilisent des sels fluorés et un spectre de neutrons thermiques ; les autres, des sels chlorés et un spectre de neutrons rapides. Parmi ces derniers, il y a deux projets européens : SAMOFAR, un projet de R&D EURATOM financé dans le cadre Horizon 2020, piloté par l'Université de Delft avec un partenariat international très étendu et le *Stable Salt Reactor Wasteburner* (SSR-W) de la société anglo-canadienne MOLTEX.

- SAMOFAR est un projet ambitieux qui s'inscrit dans le long terme (deuxième moitié du siècle). **21a** MOLTEX dont la vocation est l'innovation technologique vise une réalisation industrielle avec des ambitions plus limitées, qui pourraient aboutir à la mise en service d'un prototype vers le début des années trente. C'est de celui-ci que je parlerai.

- MOLTEX a été créée au début des années 2010 par un groupe de chercheurs autour d'Ian Scott qui fut *chief scientist* chez Unilever. Bon connaisseur des propriétés physico-chimiques des sels fondus et inquiet par les renchérissements incessants du prix de l'électricité (en particulier de l'électricité nucléaire), Scott entrevoit un gisement d'opportunités dans les travaux entrepris à Oak-Ridge dans les années 50 et abandonnés ensuite pour cause d'incompatibilité avec les objectifs de l'époque. Son but : produire de l'électricité par voie nucléaire à partir d'installation intrinsèquement sûres et ne nécessitant pas des équipements périphériques auxiliaires volumineux et coûteux comme ceux des PWR pour garantir la sûreté.

22 - C'est le point de départ du concept SSR décliné en trois versions : deux systèmes à neutrons thermiques (les SSR-U, et SSR-Th) pour l'exploitation des réserves d'uranium et de thorium et un système à neutrons rapide, le SSR-W alimenté principalement par le stock de combustible usé des réacteurs à eau légère et CANDU pour procéder à l'incinération des actinides. Les concepts sont modulaires au sens défini plus haut.

- La figure située à gauche vous montre un module de 300 MWe. Le cœur de l'installation se présente sous la forme d'un réseau carré de 10 fois 10 assemblages baignant dans le réfrigérant, un sel fondu fluoré à une température d'environ 600°C. Les assemblages comportent des crayons contenant un sel fondu chloré d'actinides qui véhicule la chaleur

dégagée par la fission. Cette chaleur est transférée au sel réfrigérant, essentiellement par convection. La figure située à droite fournit le schéma de principe de l'installation.

- Hormis les structures métalliques, les composants du cœur sont à l'état liquide. Le risque de fusion est donc sans objet. L'absence d'eau élimine le risque de vaporisation, d'explosion d'hydrogène comme ce fut le cas à Fukushima et de transfert de gaz de fission dans l'environnement. Des produits de fission comme le césium ou l'iode étant fixés au sel fondu sont très peu volatils, ce qui est favorable. Enfin, la forte rétroaction négative de l'effet de température contribue de manière essentielle à la sûreté intrinsèque du concept. Au stade actuel, les réacteurs à sel fondu posent encore des défis dont la solution peut prendre du temps.

23 - Mais en adoptant un sel fondu combustible confiné dans le cœur et en renonçant au retraitement du combustible en ligne selon le schéma classique, plusieurs handicaps perdent leur raison d'être. Par ailleurs MOLTEX dispose d'un remède aux problèmes de corrosion provoquée par les sels fondus. L'efficacité à long terme de ce remède, objet d'un brevet, nécessite encore confirmation pratique.

24 - En complément au concept SSR-W, MOLTEX a développé une installation de retraitement des combustibles irradiés par un procédé pyro-métallurgique intitulée WATSS (*Waste To Stable Salt*). **24a** Elle a également développé une batterie de stockage d'énergie calorifique analogue à celles qui existent dans les installations solaires thermiques. Le concept désigné *GridReserve* est illustré ici. Lorsque, pour des raisons de demande faible ou de fourniture d'énergie électrique par les renouvelables intermittentes, la puissance développée par le SSR-W est supérieure à la puissance requise, l'énergie produite par le réacteur est donc stockée dans les batteries à une température de plus de 500°C. Si la demande est supérieure à la puissance nominale, les batteries restituent l'énergie accumulée en parallèle à la production nucléaire. L'intérêt de ce concept n'échappera à personne étant donné l'importance croissante des renouvelables intermittentes. **24b** Dans l'état actuel du projet et compte tenu des aspects favorables du point de vue de la sûreté, les promoteurs évaluent le coût '*overnight*' en capital à 2000 US\$ le kWe, équivalent à des coûts nominaux d'investissement du nucléaire des années septante.

25 - L'installation MOLTEX a une empreinte au sol beaucoup plus petite que celle d'installations à eau légère de puissance équivalente comme vous le montre la figure de gauche sur cette diapositive. Une représentation d'artiste donne aussi une tout autre impression que celle à laquelle on est habitué aujourd'hui. Vous remarquerez l'absence de source abondante d'eau dont la technologie permet de se passer, hormis pour la partie classique.

- Le calendrier de la prochaine décennie est assez chargé. Depuis 2017, la phase préparatoire de la procédure d'homologation auprès des autorités de sûreté nucléaire canadienne est engagée. MOLTEX a signé l'an dernier un accord avec NB Power, producteur d'électricité du Nouveau Brunswick pour la construction d'une installation à Point Lepreau, à mettre en service vers 2030. La société a réussi à établir un climat de confiance et à récolter des

capitiaux sur les marchés. L'association avec l'architecte industriel espagnol IDOM dont l'expérience sur les sels fondus est liée aux installations solaires thermiques du sud de l'Europe y est pour une grande part. L'Estonie a marqué un intérêt pour ce concept ce qui est de bon augure. Est-ce l'amorce d'un renversement de tendance ?

26 - Le philosophe italien Antonio Gramsci, victime du régime de Mussolini a laissé dans ses cahiers de prisons rédigés peu avant son exécution en 1937 des sentences assez frappantes dont celle-ci : « *Le vieux monde se meurt, le nouveau tarde à apparaître et dans ce clair-obscur surgissent les monstres* ». Monstre dérive du latin « *monstrum* », signifiant « *prodige* » ou « *phénomène hors-norme* ». Sur base de cette étymologie la sentence de Gramsci s'applique assez bien à la situation que nous connaissons aujourd'hui :

27 - Un monde électrique ancien avec une production centralisée, un monde électrique à venir dont on entrevoit la structure sans être en mesure de la préciser. Et, dans le clair-obscur d'aujourd'hui **27a** le « *monstre* » de la transition énergétique que constituent les éoliennes. Fabien Bouglé, chef d'entreprise, bon connaisseur des énergies renouvelables et membre du conseil municipal de Versailles a écrit sur ce sujet, un réquisitoire implacable. Son analyse très fouillée des aspects économiques et environnementaux montre que la transition énergétique tant vantée frise l'imposture.

28 - Les éoliennes devraient être respectueuses de l'environnement. C'est comme cela que leurs promoteurs les présentent. Elles ne le sont absolument pas et, au fil des pages, apparaît une image qui est la négation du message de départ. Plus que d'autres systèmes énergétiques, elles font appel à des matières polluantes et non-recyclables. Leur production intermittente implique des émissions de CO2 que leur utilisation est censée exclure. Elles ont des effets négatifs par émissions d'infrasons, sur la santé des personnes qui vivent dans leur voisinage.

29 - Eoliennes et panneaux solaires demandent de 10 à 50 fois plus de métaux et de matériaux que le nucléaire par kWh produit. Et, pour l'heure, ces matériaux sont disponibles à des coûts maîtrisés grâce aux énergies fossiles qui permettent de mettre toute l'infrastructure industrielle et logistique nécessaire en œuvre pour les exploiter. Dans l'hypothèse où ne subsisteraient que les renouvelables, le maintien de ces infrastructures aux conditions actuelles deviendrait tout bonnement impossible. On est donc très éloigné d'une situation optimale. Vous voyez à la partie droite de la figure qu'il en va de même pour les déchets.

30 - Les éoliennes ont un impact considérable sur le monde des oiseaux et sur celui des chauves-souris. La construction des parcs éoliens en mer a une incidence sur les populations de poissons et sur les activités économiques qui leur sont liées.

- Nous avons vu précédemment que le prix de l'électricité fournie par les éoliennes était loin d'être aussi favorable qu'on le prétend. Fabien Bouglé indique que le tarif initial de rachat de l'électricité des 6 projets français d'éoliennes en mer, proposé officiellement dans l'appel d'offre, était de 220 euros le MWh à comparer au prix spot moyen de 35 euros le MWh. Ramené par la suite à 180 euros le MWh, et compte tenu d'une production annuelle de 12 TWh pour les 6 projets, le montant total de la subvention sur une durée de 20 ans dépasse les 40 milliards d'euros : 2 milliards d'euros annuels pour à peine 2,5 pourcents de la demande

d'électricité. Nous sommes loin d'une allocation optimale des ressources comme l'a d'ailleurs fait remarquer la Cour des Comptes française. Comment en est-on arrivé là ?

31 - Le monde politique traditionnel en Occident est fortement influencé par la pensée écologiste de philosophes des années soixante comme Hans Jonas ou de biologistes comme Paul Ehrlich. Les travaux du premier sont marqués par une profonde méfiance à l'égard de la société industrielle. Le second fait preuve d'une aversion obsessionnelle à l'égard de la croissance démographique, qui rappelle les préoccupations de Thomas Malthus au début du XIX^{ème} siècle.

- Pour Hans Jonas, il convient de renoncer à l'optimisme des Lumières et à la confiance dans le progrès. Pour ce faire, on pratiquera *l'heuristique de la peur* dont il développe la méthode dans *'Le principe responsabilité'*. La société anxieuse qui est la nôtre, que ce soit pour le nucléaire, la chimie dans toutes ses composantes, les OGM, le climat... sort de là.

- Pour Ehrlich, doter la société d'une source d'énergie abondante – le nucléaire - ferait croître démesurément la population et reviendrait comme il l'a dit dans un article paru en 1975 *'à donner une arme de combat à un enfant idiot'*. Il convient donc de pratiquer une forme de malthusianisme à travers un rationnement de l'énergie disponible.

- Tous deux prônent une société égalitaire et communautaire, seule apte selon eux à se contenter d'un mode de vie frugal. C'est le point de départ de l'utopie contemporaine dont j'ai parlé au début.

32 - Un acteur emblématique de cette utopie est Anthony Rifkin. Economiste, professeur à la Wharton School de l'université de Pennsylvanie, Rifkin possède un talent incontestable d'écriture et l'art de choisir les mots plaisants qui lui ont permis d'être adulé par les dirigeants européens. Mais il possède un défaut tout aussi incontestable : celui de croire que le monde de demain - celui de la troisième révolution industrielle qu'il met en avant avec ses cinq piliers - sera exclusivement de nature virtuelle. Sa pensée est aussi *'virtuelle'* que la chose dont elle traite, en ce sens qu'il énonce des propositions sans jamais offrir d'exemples concrets et tout paraît donc aller de soi.

- Il est aisé de prétendre que la troisième révolution industrielle offrira des millions d'emplois alors que le monde actuel n'est que chômage de masse, sans préciser en quoi ces nouveaux emplois consisteront. L'erreur qu'il commet est de considérer que le monde à venir ne sera 'que' de troisième révolution industrielle c'est-à-dire construit sur les renouvelables, l'internet des objets et l'intelligence artificielle. Dans un tel monde, pas de place pour la conception et la production des outils mettant cette révolution en œuvre, ce qui ne semble pas le déranger. L'essentiel est d'arriver à la société horizontale que l'écologie appelle de ses vœux comme nous venons de le voir.

- En ce qui concerne le nucléaire sa position est claire. Cette technologie est le symbole d'une société verticale, c'est-à-dire hiérarchisée, dont il ne veut à aucun prix et il déclare à qui veut l'entendre: *'Nuclear is over ; Fukushima was just the last point of the departure'*.

- L'idéologue illusionniste se vante à longueur du livre de l'influence qu'il possède sur les mondes politiques et économiques européens. Ces affirmations sont très vraisemblables. Le monde d'Europe occidentale est sensible aux idéologies et une utopie aux accents égalitaires va précisément dans son sens, même s'il n'est pas démontré qu'elle puisse aboutir. Le passé en est un généreux témoin. L'avènement en Europe Occidentale d'un modèle de société horizontale du type décrit par Rifkin est donc loin d'être exclu.

- Des idéologues existent aussi dans le monde anglo-saxon, Rifkin en étant un excellent exemple. Mais le pragmatisme et le dynamisme entrepreneurial de la société anglo-saxonne font que l'avènement d'une société horizontale en Amérique du Nord semble beaucoup moins probable que de ce côté-ci de l'Atlantique.

33 - L'écologie réserve aussi d'heureuses surprises. A côté de la version dure, pétrie de décroissance et de malthusianisme, existe une écologie plus optimiste pour laquelle défense de l'environnement et technologie vont de pair, l'amélioration du sort des populations pauvres étant le meilleur remède pour le contrôle de la natalité. Cette branche encore très minoritaire comporte des grands noms que vous voyez sur la figure. Elle est emmenée par deux personnalités très actives ayant fondé le think-tank *Breakthrough*, Michael Shellenberger et Ted Nordhaus, signataires du manifeste éco-moderniste, qui sont explicitement favorables au nucléaire.

- Faut-il préciser que le désaccord entre l'écologie profonde et les éco-modernistes est total, les premiers reprochant aux seconds leur position favorable au nucléaire, inconciliable avec les considérations malthusiennes qui sont les leurs.

34 - Dans un chapitre du livre IV de son essai sur le principe de la population Malthus explique que la meilleure façon d'éviter que celle-ci ne croisse au-delà de ce qui peut être assuré par l'existence de ressources limitées est de faire en sorte que les basses classes de la population vivent dans des endroits insalubres où leur existence sera abrégée par la saleté et les maladies. **34a** Organiser une pénurie d'énergie ou en faire croître le prix est aussi une façon de contrôler la croissance de la population. L'irréductible hostilité de l'écologie profonde à l'égard du nucléaire exprimée par Paul Ehrlich trouve probablement là sa motivation véritable.

- Rien ne conduit à penser que cette hostilité va changer même si la mutation technologique de Génération-IV élimine les problèmes d'aujourd'hui que sont les risques d'accidents, les déchets et la prolifération. Mais rien ne garantit non plus que, pour d'autres raisons, il ne faille un jour futur retourner au nucléaire. Comment faire ?

35 - Un rapport du *Carnegie Endowment for International Peace* publié en 2018 analyse l'avenir du nucléaire en Chine. Il montre qu'en dépit de vicissitudes comme le tsunami de Fukushima, la politique de développement du nucléaire en Chine reste très cohérente et résolument orientée vers la fermeture du cycle du combustible. Dans 20 ans le parc nucléaire chinois sera le premier au monde par sa taille.

Le pays construit ses propres centrales à eau légère : le HPR-1000 et bientôt le CAP-1400, des versions sinisées de concepts français et américains. Il a son projet d'installation SMR, l'ACP-100 pour la production d'électricité et de chaleur, dont le coup d'envoi a été lancé en juillet dernier. Au plan Génération-IV, plusieurs installations fonctionnent déjà comme les réacteurs à haute température HTR-10 et HTR-PM et un réacteur rapide refroidi au sodium, le CEFR. Il étudie un concept à sel fondu, le TMSR, dans des versions rapides et thermiques pour exploiter les gisements de thorium dont le pays est très riche. Bref, le temps venu, c'est vers la Chine que les Européens occidentaux devront probablement se tourner pour récupérer une technologie qu'ils auront abandonnée en cours de route. Faut-il s'en réjouir ?

36 - Je laisserai le mot de la fin à Antonio Gramsci. Il exprime très bien grâce à une réflexion empruntée à Romain Rolland, ce que probablement nous ressentons tous à des degrés divers : une volonté d'optimisme pour compenser le pessimisme résultant d'une analyse lucide de la situation dans laquelle nous sommes plongés bien malgré nous.

37 - Merci pour votre aimable attention.