

N° 651 / Juillet-Août 2020

## Tribunes

**Macroéconomie et énergie : quelles interactions?**

Valérie Mignon

**Macroéconomie et énergie : les impressions d'un modélisateur**

Paul Zagamé

**Regards d'un pétrolier sur l'avenir des petits réacteurs modulaires**

Pierre-René Bauquis

## Articles

**Le système électrique européen : un modèle caduc**

Claude Desama

**Le changement climatique à l'épreuve de la négociation !**

Jean-Yves Caneill

**Contenu CO<sub>2</sub> du chauffage électrique en France**

Benjamin Haas, Florence Khayat, Isabelle Moretti

**Quelle stratégie de rénovation énergétique pour les bâtiments collectifs?**

Pascal Roger

**La diversification du mix électrique français : une pseudo rationalisation**

Dominique Finon

## Rubriques

**Ma thèse en une page**

Ekaterina Dukhanina

**Il y a dix ans dans la revue**

Claude Acket

## Regards d'un pétrolier sur l'avenir des petits réacteurs modulaires

Pierre-René Bauquis

@ 18993

Il existe désormais une quasi-unanimité d'opinion dans le monde scientifique concernant la composante anthropique du changement climatique. Cette composante résulte des émissions de GES (gaz à effet de serre) et en premier lieu de CO<sub>2</sub>, conséquence de la combustion des ressources énergétiques fossiles.

Pour «décarboner» nos consommations d'énergie, la voie principale sera le recours massif à l'électricité produite par une combinaison d'énergies pilotables (essentiellement nucléaires) et d'énergies renouvelables (EnR) peu ou non pilotables.

Les autres voies ne pourraient jouer qu'un rôle très accessoire, disons au mieux 5 % de l'électricité mondiale à partir de biomasse et du même ordre pour les systèmes produisant de l'électricité à partir d'énergies fossiles mais recourant au CCS (*Carbon Capture and Storage* : captage et stockage du CO<sub>2</sub>) ou au CCUS (*Carbon Capture, Utilization, and Storage* : captage, stockage et utilisation du CO<sub>2</sub>). On aurait donc besoin massivement et partout d'électricité pilotable non carbonée, que ce soit pour une utilisation directe ou indirecte (hydrogène vert). Si on veut pouvoir alimenter en électricité pilotable non carbonée Oran, Abidjan, Dakar ou Brest, on ne pourra le faire que si on dispose d'un nouveau nucléaire au côté de celui qui existe actuellement. Ce nouveau nucléaire devrait être totalement sûr, modulaire et économique. Notre avenir dépendra donc de notre capacité à développer de petits réacteurs modulables (SMR, *Small Modular Reactors* ou petits réacteurs modulaires).

### Comment se pose la question des SMR

Utilisés d'abord pour la propulsion de sous-marins (le Nautilus américain en 1950), ils furent utilisés pour la production d'électricité dès les années 1970. Dans l'extrême Nord-Est de la Russie, les deux petits réacteurs de Bilibino furent mis en service en 1974 et 1976. Ils ont été remplacés après une quarantaine d'années de service par deux autres petits réacteurs montés sur barge en 2019 (l'Academic Lomonossov avec deux REP de 35 MW chacun).

Les petits réacteurs SMR, correspondant à des puissances électriques de 30 à 300 MW (mégawatts), sont censés apporter trois avantages déterminants par rapport aux réacteurs civils «classiques». Ces avantages sont la sûreté, la bonne adaptation aux pays en développement et leur plus grande facilité de financement.

Pourquoi mettre en avant ces types de réacteurs qui risqueraient de conduire à des coûts de l'électricité plus élevés que celle produite par les réacteurs de grande taille? Tout d'abord, parce que dans la plupart des cas, ils présentent des caractéristiques de sûreté particulière. Les opposants au nucléaire mettent en avant les risques majeurs d'accidents de cette filière tels que ceux de Tchernobyl et de Fukushima. Dans ces deux cas, une fusion des cœurs des réacteurs s'est produite, avec un emballement de la réaction de fission. Pour les futurs SMR, il faudra qu'un incident de contrôle de la réaction conduise à un arrêt de celle-ci. On parle

alors de réacteurs à sûreté passive (*fail safe*) dont plusieurs variantes sont à l'étude.

Quant au risque de prix de revient trop élevés des kilowattheures produits par les SMR, une réponse classique consiste à dire que l'effet de série devrait compenser l'effet d'échelle. Une question essentielle est donc de savoir comment on pourrait obtenir un tel effet de série. Par quelles technologies? Par quels autres moyens?

### **Bref résumé des études sur les SMR**

Si les petits réacteurs à usage militaire existent depuis plus de 60 ans, les SMR pour utilisation civile ne font l'objet d'efforts intenses au plan mondial que depuis une vingtaine d'années. Certains demeuraient proches des petits réacteurs REP (Réacteurs à Eau Pressurisée) utilisés pour la propulsion navale, tandis que d'autres proposaient le recours à des technologies innovantes. Des centaines d'articles, communications et conférences leur ont été consacrés. Pourraient éventuellement faire partie des SMR les réacteurs dits TWR (*Traveling Wave Reactors*) largement promus par Bill Gates. Ce concept remonte aux années 1950. Toshiba s'y est intéressé en 2010–2011 et la société chinoise CNNC en 2015–2016. Dernier avatar des TWR, le président Trump en 2019 a invité Bill Gates à construire un prototype aux États-Unis. S'agissant d'une technique nouvelle apparentée à de la surrégénération et pour laquelle il n'existe pas à l'heure actuelle de prototype, il est peu vraisemblable qu'elle puisse faire l'objet de développements rapides.

Le regain actuel d'intérêt pour les SMR est mondial. On citera l'annonce en 2019 du projet SMR Nuward (France) et SMR-160 (Ukraine). En 2020, ce sont les projets de l'Estonie, de la Turquie (en association avec Rolls-Royce) et en juillet 2020 celui d'un projet associant la Corée et l'Arabie saoudite.

De façon plus générale, malgré d'énormes efforts depuis une cinquantaine d'années, les projets de SMR en sont restés au stade

des avant-projets, à l'exception de l'ACP 100 chinois dont la construction devait commencer en 2020 et du NuScale américain dont le design vient d'être approuvé, mais dont les perspectives de construction ne sont pas encore claires. La question clef est de comprendre pourquoi il en a été ainsi.

Ce qui frappe un «pétrolier» lorsqu'il tente de répondre à cette question essentielle est tout d'abord la très grande dispersion des efforts et la primauté donnée à l'étude d'une grande variété de technologies. Tout se passe comme s'il y avait une course à l'innovation entre les différents acteurs pour tenter d'obtenir la certification (*licensing*) du meilleur réacteur possible, afin de «gagner de l'argent» en vendant des licences. C'est l'approche traditionnelle pour les gros réacteurs de 500 à 1800 MW de puissance électrique.

Pour un pétrolier, face à un problème à l'évidence complexe au plan technologique et peut-être plus encore quant à l'obtention d'un modèle économique viable, la réaction serait tout d'abord de viser à mutualiser les efforts au plan international. C'est ce qui avait été fait pour se lancer dans les aventures à haut risque économique de la mise en valeur des ressources potentielles du Moyen-Orient (avec les consortium IPC Irak Petroleum Company ou de l'ARAMCO en Arabie saoudite). La question clef est de savoir comment organiser une mutualisation efficace et l'expérience accumulée au sein de l'industrie pétrolière montre que ceci n'est pas simple (ainsi que l'illustrent certains échecs majeurs de mutualisation tel le projet Kashagan au Kazakhstan).

Une mutualisation des efforts suppose de pouvoir répondre à une liste de questions pour espérer développer une industrie des SMR qui puisse être viable sans subventions.

Nous explorerons les principales composantes d'une telle liste en regroupant celles-ci sous forme de dix points, de façon quelque peu arbitraire, afin de faciliter la lecture et de pouvoir ouvrir des discussions concernant chacun de ces points.

Ces «dix commandements» relatifs au développement des SMR tels que perçus par le regard d'un pétrolier sont résumés ci-après sous la forme d'une liste de conditions nécessaires.

### Conditions nécessaires au succès des SMR

1. La nécessité que ces SMR soient effectivement des réacteurs «*fail safe*», c'est-à-dire non susceptibles d'entraîner des catastrophes humanitaires même dans un contexte de terrorisme lourd ou de guerre. Une multiplication au plan mondial de petits réacteurs électrogènes fait que certains se trouveront fatalement un jour dans des zones de conflits. Ceci implique que la sûreté de ces SMR soit effectivement passive (pas de fusion du cœur même si les systèmes de refroidissement sont détruits). Le concept de réacteurs «*fail safe*» fut mis en œuvre dès 1958 pour de petits réacteurs de recherche dits TRIGA (*Training, Research, Isotopes, General Atomic*s) dont 35 fonctionnent actuellement aux États-Unis et environ 70 dans le monde.

2. La nécessité de disposer le plus rapidement possible de SMR pouvant être produits en série. Ceci exclut pratiquement le recours à des technologies de rupture (tels de petits surgénérateurs, des TWR, ou des réacteurs au thorium) qui demanderaient une dizaine d'années de plus à développer que des technologies s'inspirant des centrales existantes (REP ou REB, Réacteurs à Eau Bouillante — en anglais PWR, *Pressurized Water Reactor*, ou BWR, *Boiling Water Reactor*). Cette approche présentera la difficulté de s'affranchir progressivement du domaine des applications militaires de propulsion des sous-marins ou porte-avions (ou connexes tels les réacteurs de Bilibino ou ceux des brise-glaces russes).

3. La nécessité de disposer de réacteurs pouvant s'adapter rapidement aux variations de la demande d'électricité. Ceci sera nécessaire pour satisfaire les courbes de demande de nombre de villes de pays dits en développement. Plus le nombre d'heures d'utilisation annuelle en équivalent pleine puissance sera

faible et plus les SMR seront économiquement désavantagés par rapport aux centrales thermiques classiques.

La capacité d'adaptation rapide aux fluctuations des besoins sera également nécessaire dans les pays dits «développés» pour pouvoir accompagner le développement des énergies renouvelables (en particulier celui de l'énergie éolienne). Si ce rôle ne pouvait être joué par les SMR, cela rendrait nécessaires de nouvelles centrales pilotables recourant aux énergies fossiles, augmentant ainsi les émissions de CO<sub>2</sub>.

4. La nécessité d'un effet de série massif pour abaisser les prix de revient et compenser ainsi les «déséconomies d'échelle» résultant de la faible puissance unitaire des SMR. C'est donc au plan économique un chemin inverse de celui parcouru, par exemple en France, en passant des réacteurs de 900 MW à ceux de 1 200 MW, puis 1 400 MW et enfin les 1 650 MW des réacteurs EPR. Cette nécessité débouche elle-même sur une série de questions dont plusieurs vont à l'encontre des pratiques actuelles des industriels du nucléaire et des autorités de sûreté des pays concernés.

5. La nécessité d'un effet de série massif suppose l'adoption au plan mondial d'un très petit nombre de modèles et de sites d'assemblage des SMR sous forme de modules. Cette nécessité s'imposera également pour la production des éléments clefs (tels les générateurs de vapeur, les cuves, les turbines ou les alternateurs). Là aussi, la mutualisation des efforts s'imposera, comme dans le cas de l'aviation civile (une large part des éléments d'un avion Boeing viennent d'Europe et ceux d'un Airbus des États-Unis). L'impératif d'un très petit nombre de modèles standardisés interdira que les autorités de sûreté des différents pays puissent demander des adaptations ou modifications de design concernant ces réacteurs.

6. La nécessité d'un effet de série massif pour abaisser les prix de revient des kWh demandera d'assurer à ces nouvelles filières SMR des plans de charge d'une dizaine d'années au moins. Il faudra donc l'assurance d'un grand nombre de commandes (50? 100?) d'une même série

pour qu'une filière, internationale par nature, puisse se constituer. Ceci sera une nécessité tant pour les groupes promoteurs des futurs SMR que pour leurs nombreux sous-traitants.

7. La nécessité que les fournisseurs des SMR mais plus encore leurs constructeurs et leurs exploitants puissent en assurer une opération aussi fiable que possible, sans possibilité de détournement de combustibles nucléaires y compris après leur fin de vie économique. Ceci imposera que ces opérateurs aient la responsabilité de l'ensemble du cycle des combustibles (fourniture, chargement, déchargement, retraitement éventuel, stockage des combustibles usés ou des déchets ultimes). Ce dernier problème sera probablement le plus difficile à résoudre car il demandera une modification des règles et pratiques actuelles, tant au plan des législations nationales qu'au plan international.

8. La nécessité de recourir à l'expérience accumulée non seulement par l'aéronautique civile, mais aussi par l'industrie pétrolière, recouvre une variété de domaines. Capacité à établir des contrats dans des environnements économiques et politiques très divers, capacité à organiser les financements correspondants (et en particulier les «*project financing*») mais aussi à apporter des garanties financières de long terme, capacité à réaliser en continu des chantiers complexes (modularisation, optimisation de la sous-traitance) et à opérer des installations dans tous types de contextes de climats, d'environnements, de régimes politiques ou au plan humain.

9. La nécessité de garanties d'une exploitation fiable et sans risques de dissémination devrait conduire non à la vente des réacteurs SMR mais à la vente de l'électricité qu'ils produiront. Ceci constituerait une évolution de la formule BOO (*Build, Own, Operate*) utilisée par les Russes pour le projet Akkuyu en Turquie (4 réacteurs de 1200 MW). Les acheteurs de SMR, fournisseurs de kilowattheures par le biais de contrats «*Take or Pay*» de grande souplesse, devront être de grandes compagnies électriques (permettant de bénéficier au mieux

des effets de série et de retours d'expérience). Des sociétés pétrolières pourraient également jouer ce rôle. L'industrie pétrolière s'engage en effet actuellement dans des contrats semblables pour la vente d'électricité produite à partir de champs de gaz ou de FLNG (installations flottantes de gaz naturel liquéfié).

10. La nécessité que les mouvements écologistes, partis politiques ou ONG, ne constituent pas un obstacle au développement des SMR. Idéalement, il faudrait qu'ils les considèrent comme indispensables et à tout le moins comme un moindre mal pour satisfaire les futurs besoins au plan mondial en électricité non carbonée.

## Conclusions

Que conclure à la fin de ce «décatalogue» forcément incomplet, comportant des redondances, appelant à des échanges complémentaires?

Nous n'avons pas évoqué toutes les utilisations potentielles des SMR mais le besoin massif de standardisation devrait conduire à leur utilisation dans un premier temps pour la production d'électricité, pour l'alimentation de réseaux mais aussi pour d'autres utilisations (production d'acier, production de ciment ou production d'hydrogène vert). Ils pourraient ultérieurement être employés comme simples «chaudières» non carbonées pour des réseaux de chaleur ou le dessalement d'eau de mer ainsi que pour des utilisations mixtes (électricité et chaleur ou électricité et dessalement).

Nous n'avons pas non plus évoqué la comparaison économique des SMR avec les grandes centrales nucléaires, sinon de façon implicite. Intuitivement, il paraît aujourd'hui difficile que les SMR puissent produire de l'électricité à un prix de revient inférieur à celui des grosses centrales. Leurs marchés de prédilection seront les petits réseaux pour lesquels les gros réacteurs sont inadaptés.

Les avantages des SMR, nous l'avons vu, se situent ailleurs. Le dilemme n'est pas la

## Regards d'un pétrolier sur l'avenir des petits réacteurs modulaires

concurrence entre les deux familles de réacteurs. Il sera d'organiser au mieux leur complémentarité, en particulier en ce qui concerne les implantations géographiques (même à l'intérieur d'un territoire limité, comme dans le cas de la France, une telle complémentarité pourrait exister). Il faudra également organiser au mieux la complémentarité du nucléaire (traditionnel ou SMR) avec les énergies renouvelables. En ce qui concerne ces dernières, les coûts très importants liés à leur intermittence sont trop souvent ignorés ou largement sous-estimés.

La principale conclusion est que notre avenir énergétique exigera de recourir très largement aux SMR, sauf à accepter d'accentuer plus encore les disparités de niveau de développement entre pays et à accepter de laisser encore croître les émissions de CO<sub>2</sub>. Ceci reviendrait à

accepter le risque majeur d'un emballement du changement climatique d'origine anthropique. Ce risque est beaucoup plus important que ceux liés à l'industrie nucléaire.

L'opposition de principe de la plupart des mouvements écologiques (ONG ou gouvernements) ne sera pas forcément durable. Telle la colombe portant un rameau d'olivier et revenant vers l'arche, l'espoir de revenir sur terre nous vient d'un pays peu suspect d'aventurisme ou d'inconscience, la Finlande. Il y a été annoncé récemment que des partis politiques «verts» auraient accepté de considérer que des chaudières à combustibles fossiles qui alimentent le réseau de chaleur d'Helsinki puissent être remplacées par de petites chaudières nucléaires.



### ENQUÊTE SUR LES ENJEUX ÉNERGÉTIQUES



Le Conseil Français de l'Énergie organise depuis plusieurs années une enquête auprès de dirigeants et experts français du secteur de l'énergie pour connaître leur avis sur les principaux enjeux énergétiques. Cette enquête permet de suivre l'appréciation que les dirigeants et les experts du secteur de l'énergie ont des enjeux énergétiques les plus importants, pour lesquels sont évalués l'impact potentiel, le niveau d'incertitude et le degré d'urgence. L'enquête permet en outre de savoir comment les Français se situent, sur chaque enjeu, par rapport à l'Europe et au reste du monde.

Ce questionnaire a pour objectif de rassembler les appréciations personnelles d'un grand nombre de dirigeants et d'experts tout en apportant un éclairage complémentaire en fonction de l'âge et du secteur des répondants. Il ne s'agit pas d'un questionnaire institutionnel visant à recueillir des positions d'organisations. Seul le résultat agrégé de l'ensemble des réponses sera publié, et envoyé aux participants.

Le temps nécessaire pour y répondre reste très modeste. Merci par avance de votre participation !

<https://bit.ly/35HvHaM>

**Merci de renvoyer le questionnaire rempli avant le vendredi 9 octobre 2020**

par mail à [moncomble@wec-france.org](mailto:moncomble@wec-france.org) (téléchargez le fichier puis enregistrez vos réponses) ou par courrier : Jean Eudes Moncomble, Conseil Français de l'Énergie, 12 rue de Saint-Quentin, 75010 Paris