



La quatrième génération de réacteurs pour un nucléaire durable ... et sortir des fossiles !

Gérard Bonhomme (ECN 70)

Professeur émérite, Institut Jean Lamour, Université de Lorraine

Atteindre l'objectif de la neutralité carbone en 2050 imposera une réduction drastique de notre consommation de combustibles fossiles, qui représentent pourtant aujourd'hui notre source d'énergie principale. Ainsi pour la France les combustibles fossiles fournissent plus de 60% de la consommation d'énergie finale, en particulier dans les transports et les usages liés à la production de chaleur pour les procédés industriels et le chauffage des bâtiments. C'est la raison pour laquelle on devra faire face non seulement à une forte augmentation de la demande en électricité bas carbone, du fait de l'électrification de nouveaux usages (en particulier dans les transports), mais aussi à des besoins très importants en chaleur bas carbone, notamment à haute température. Si l'on souhaite en outre réduire notre dépendance énergétique, il est clair que **les sources renouvelables seules ne suffiront pas**, et que le recours à l'énergie nucléaire est indispensable si l'on veut défossiliser notre économie et atteindre la neutralité carbone en 2050 [1].

Il faut pour cela relever le défi du nucléaire durable, car en effet le nucléaire actuel ne peut pas l'être complètement [2,3]. Cette condition de durabilité ou plutôt de soutenabilité impose un prélèvement supportable pour la ressource primaire, ainsi qu'un impact minimal sur l'environnement. Or les réacteurs à fission actuels des filières à neutrons thermiques ne brûlent que l'isotope 235 fissile de l'uranium, dont l'uranium naturel ne contient que 0,7%. Les réserves mondiales seraient ainsi épuisées au bout d'une centaine d'années rien que pour satisfaire les besoins du parc mondial actuel ! Cette trop faible disponibilité de la ressource primaire en uranium constitue bien la principale limitation à la soutenabilité du nucléaire actuel et la plus limitante pour son développement massif. Par ailleurs la fission par neutrons thermiques favorise grandement les processus de capture neutronique qui produisent des noyaux transuraniens, ou actinides mineurs, lesquels constituent la seule partie à très longue période radioactive des déchets à haute activité, qui ne peuvent en outre être valorisés.

Avec les filières à neutrons thermiques la fermeture du cycle du combustible est impossible et seulement 1% du contenu énergétique de l'uranium naturel est utilisé. Le recyclage partiel du plutonium dans le combustible MOX est à cet égard d'intérêt très limité et les projets de multi-recyclage n'apporteraient aucune solution, générant au contraire encore plus d'actinides mineurs.

La quatrième génération de réacteurs pour un nucléaire durable ... et sortir des fossiles ! P1
Illustration de cet article P4
Point de vue sur le livre de Cédric Philibert « Eoliennes – Pourquoi tant de haine ? » P5

Chaque article reflète la pensée de son auteur

Nos dernières conférences :

- [Vous trouverez les diapos et vidéos de nos conférences passées sur notre site internet :](#)

[onglet Conférences](#)

- *Vous avez l'idée d'un sujet pour une prochaine conférence Centrale-Energies, idéalement avec des intervenants à proposer? Vous avez envie de proposer un article pour un prochain flash ?*

Contactez-nous !

contact@centrale-energie.fr

Les neutrons rapides, comme le sont tous ceux produits dans les réactions de fission, peuvent en revanche fissionner ^{238}U et tous les noyaux transuraniens (noyaux dits fissibles ou fertiles) et offrirait ainsi la possibilité de récupérer 100% du contenu énergétique de l'uranium naturel. Faire fonctionner des réacteurs avec des neutrons rapides permettrait ainsi non seulement de valoriser la totalité du contenu énergétique de l'uranium naturel et du plutonium, mais aussi, en brûlant tous les transuraniens, de réduire de façon drastique la radio-toxicité et la durée de vie des déchets qui se réduirait à celle des produits de fission, c'est-à-dire au plus quelques centaines d'années.

En outre la fission provoquée par un neutron rapide libère au moins trois neutrons (contre 2,4 en moyenne pour un neutron thermique), d'où la possibilité de produire plus de noyaux fissiles (par transmutation de noyaux fertiles) que de noyaux détruits par fission ou capture. C'est le concept de "surgénération". Bien entendu cela ne peut fonctionner dans un réacteur que si le bilan neutronique global permet de disposer en fine en moyenne de suffisamment de neutrons rapides pour transformer les noyaux fertiles en nouveaux noyaux fissiles, au-delà du nombre requis pour maintenir la réaction en chaîne et des neutrons perdus ou consommés dans des captures stériles.

De fait ce concept de réacteur surgénérateur a été testé dès le début de l'histoire du nucléaire civil. En France la filière à neutrons rapides avec caloporteur sodium (choisi pour ses propriétés thermiques et parce qu'il ne ralentit pas les neutrons) démarre à la fin des années 50 avec le réacteur Rapsodie (20 MW thermique). Il sera suivi du réacteur expérimental Phénix (250 MWe), puis du prototype Superphénix de 1200 MWe couplé au réseau en 1985. Une dizaine d'années plus tard il a été arrêté pour des raisons strictement **politiques**. Le projet Astrid de réacteur de 4^{ème} génération à neutrons rapides et prenant en compte les règles de sécurité post-Tchernobyl et post-Fukushima a été lancé en 2010. L'objectif était la mise au point d'un réacteur électrogène de 600 MWe, mais le projet a été stoppé en 2019 de nouveau pour des raisons **politiques**.

Le Forum International Génération IV (<https://www.gen-4.org/gif/>) établi en 2000 a identifié au départ six concepts de réacteurs pouvant répondre à cinq objectifs, dont une meilleure utilisation du combustible, une réduction de la production de déchets, une

amélioration de la compétitivité économique, de hauts standards de sûreté, et des critères de non-prolifération nucléaire. Quatre de ces nouveaux concepts font l'objet de R&D, les trois derniers correspondent à des réacteurs à neutrons rapides susceptibles de satisfaire aux conditions pour un nucléaire durable : (i) les réacteurs à haute température (850°C) refroidis au gaz (hélium), bien adaptés à la production de chaleur industrielle et d'hydrogène ; (ii) les réacteurs à neutrons rapides et caloporteur sodium, dont relève (... ou plutôt relevait le projet Astrid) ; (iii) les réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb ; (iv) les réacteurs à sels fondus (RSF), qui peuvent être à neutrons rapides ou à neutrons lents, selon les sels et le combustible utilisés ; en effet si pour le cycle U-Pu l'utilisation de chlorures permet le fonctionnement en mode surgénérateur avec un spectre neutronique rapide, un tel mode surgénérateur est atteignable avec un spectre neutronique thermique pour le cycle Thorium- ^{233}U en utilisant des fluorures.

Un point essentiel à souligner ici est la nécessité pour chacun de ces types de réacteurs de disposer de leur propre combustible, avec un cycle de traitement amont et aval spécifique. L'utilisation de neutrons rapides impose pour les réacteurs un chargement initial avec un cœur en uranium très enrichi (13%) en ^{235}U ou en plutonium (fissile), entouré d'une couverture en uranium appauvri (fertile). Le besoin en noyaux fissiles est de l'ordre d'une dizaine de tonnes par GWth, ce qui correspond en gros à la quantité de plutonium produite au bout de cinquante années de fonctionnement d'un REP actuel. Il doit ainsi être très clairement affirmé que les deux filières, actuelles à neutrons thermiques et futures à neutrons rapides sont nécessairement complémentaires et que les secondes ne pourront pas être développées sans s'appuyer sur les premières.

Une évolution majeure, résultant de leurs températures de fonctionnement plus élevées et de leur plus grande souplesse de fonctionnement, est apparue dans ces projets de réacteurs innovants et renforce encore cette complémentarité entre filières. Alors que les REP actuel et l'EPR en projet sont bien adaptés à la production d'électricité en base, de tels réacteurs innovants à neutrons rapides (RNR) pourraient être parfaitement adaptés à des usages mixtes, électrogènes et calogènes, et conçus à des tailles plus petites selon les besoins industriels, voire celles des réseaux de chaleur. C'est le principe même de ce concept de SMR

(Small Modular Reactor), ou d'AMR (Advanced Modular Reactor), avec des puissances s'étageant d'une dizaine à quelques centaines de MWe. Le caractère modulaire indique en outre des modalités de fabrication en série hors site d'implantation, bien différentes de celles des REP de grande puissance.

Les projets, souvent portés par des startups, sont nombreux dans le monde. En France, huit projets de réacteurs innovants ont déjà été sélectionnés à la suite de l'appel à projets France 2030 [4,5]. Six d'entre eux sont des projets de réacteurs de 4ème génération, à neutrons rapides pour les quatre premiers :

(1) Le projet XAMR (eXtrasmall Advanced Modular Reactor) », porté par Naarea SA <https://www.naarea.fr/fr>

(2) Le projet "Newcleo - LFR-30 (Lead Fast Reactor 30 MWe)", porté par Newcleo SA <https://www.newcleo.com/>

(3) Le projet HEXANA, <https://www.hexana.fr/>
(4) Otrera Nuclear Energy <https://otreraenergy.fr/>

(5) JIMMY, <https://www.jimmy-energy.eu/>

(6) BLUE CAPSULE <https://sites.google.com/bc.technology/bc1>

Avant de conclure précisons un peu les différences en termes d'avantages et de niveau de maturité industrielle pour chacune des deux grandes familles, à savoir RNR à combustible solide et caloporteur sodium d'une part et les RSF, RNR à sels fondus d'autre part.

Les premiers sont avec un important retour d'expérience, en particulier en France, plus matures. Ils sont cependant plus complexes dans leur construction et délicats dans leur fonctionnement. Une différence notable avec les REP, qu'ils partagent avec les RSF, est qu'ils fonctionnent à la pression atmosphérique.

Les RNR de type RSF de leur côté bien, que n'ayant encore pas atteint la maturité industrielle, présentent des avantages considérables en termes de sûreté, de stabilité et de performances.

Ils sont en effet intrinsèquement stables (sûreté passive) et leur réactivité ajustable en quelques dizaines de secondes leur permettrait d'assurer un suivi de charge optimal pour un réseau à fort taux de pénétration de renouvelables intermittentes. Ils ne nécessitent pas d'eau non plus pour assurer leur refroidissement. Les

principaux défis à relever concernent la chimie des sels utilisés (retraitement, phénomènes de corrosion, etc.).

En conclusion de cette rapide présentation, rappelons que seul le déploiement massif de réacteurs de quatrième génération permettra de faire face à la demande en énergie, en garantissant :

- Sécurité d'approvisionnement (autonomie énergétique pour plusieurs milliers d'années)
- Pilotabilité, Impact minimum sur l'environnement (les déchets à haute activité et très longue durée de vie sont détruits et valorisés)

De gros efforts en R&D sont encore nécessaires pour porter à la maturité industrielle les filières à neutrons rapides pertinentes. Mais démarrer ces filières avant épuisement des ressources (limitées) en uranium fissile 235, dont la nature nous a gratifié est une nécessité absolue !

[1] Gérard Bonhomme, "Sortir de l'addiction aux combustibles fossiles : une nécessité, mais quel défi !", Annales des Mines, août 2023, <https://www.annales.org/ri/2023/resumes/aout/19-ri-resum-FR-AN-aout-2023.html#19FR>

[2] Claire Kerboul, "L'urgence du nucléaire durable", De Boeck Supérieur, (2023)

[3] Avis de la SFP sur la 5ème édition du Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs (PNGMDR), avril 2021, <https://www.sfpnet.fr/avis-de-la-sfp-sur-la-5eme-edition-du-plan-national-de-gestion-des-matieres-et-dechets-radioactifs-pngmdr>

[4] Revue de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication, REE 2023-4, Dossier 2: la relance du nucléaire en France, (2023)

[5] SFEN, Webinaires, <https://www.sfen.org/rgn/reacteurs-innovants-nouveaux-acteurs-nouvelles-technologies/>

Illustration de cette introduction générale sur ces concepts de réacteurs innovants surgénérateurs de quatrième génération à neutrons rapides par une présentation très succincte de trois des projets portés par des startups françaises lauréates de l'appel à projets France 2030 :

. **NAAREA** (pour Nuclear Abundant Affordable Resourceful Energy for All), <https://www.naarea.fr/fr>, entreprise labellisée France 2030, propose un projet de XAMR (eXtrasmall Advanced Modular Reactor) micro-générateur nucléaire à sels fondus et neutrons rapides, 40 MWe ou 80 MWth, brûlant les combustibles nucléaires usagés et l'uranium appauvri actuellement entreposés. Des méthodes très innovantes de fabrication additive, avec une cuve en céramique (carbure de silicium) et revêtement de graphène sont prévues avec un premier prototype en 2027 et un début de fabrication en série à partir de 2030.

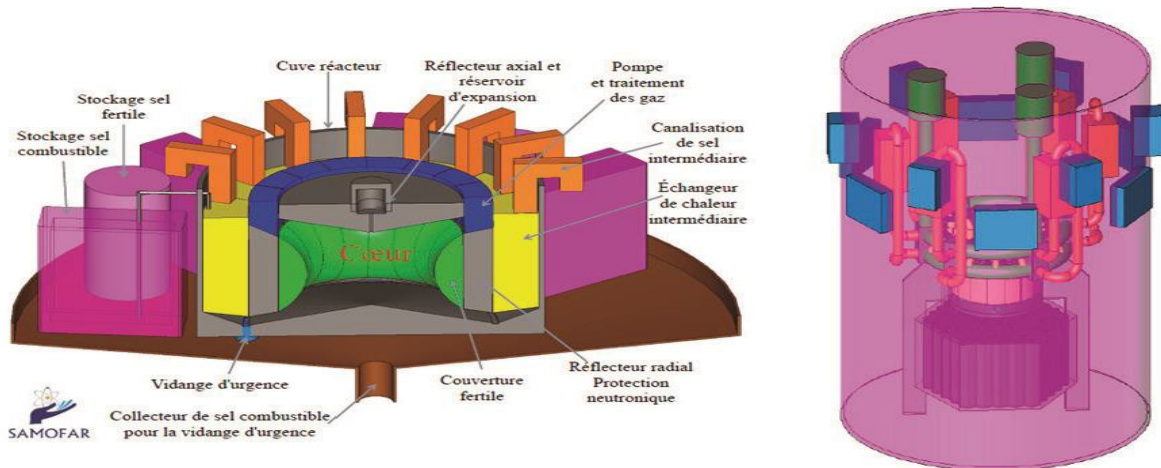


Fig. 6 a,b : À gauche, schéma du cœur, et à droite, enceinte de confinement contenant le cœur et le réservoir de vidange sous-critique dans lequel les sels s'écouleraient par gravité en cas d'incident (LPSC/CNRS).

Schéma du projet NAAREA

. **Le projet LFR-30 de Newcleo**, <https://www.newcleo.com/>, entreprise Italo-franco-britannique vise la mise en service en 2030 d'un démonstrateur de réacteur à neutrons rapides, caloporteur plomb de 30 MWe, en y associant la fabrication de combustible MOX sur des sites industriels nucléaires français. Plus globalement, Newcleo a pour objectif de concevoir et de mettre en oeuvre une technologie contribuant à fermer le cycle du combustible. 16/01/2024 : Newcleo et NAAREA annoncent la création d'un partenariat stratégique et industriel. 10/01/2014 : "Newcleo signs agreement with MAIRE S.p.A., <https://www.mairetecnimont.com/it/>), to study application of Gen-IV nuclear technologies for hydrogen and sustainable chemicals production".

. **Le projet HEXANA** (<https://www.youtube.com/watch?v=mj1bRxHNAnE>) développé par une startup essaimée du CEA (<https://www.hexana.fr/>), également labellisée France 2030, est un système innovant associant deux réacteurs modulaires à neutrons rapides et caloporteurs sodium de 400 MWth couplés par un module de stockage de chaleur et permettant une production flexible de chaleur et d'électricité (modulation de puissance de 20% par minute) pour des applications industrielles.

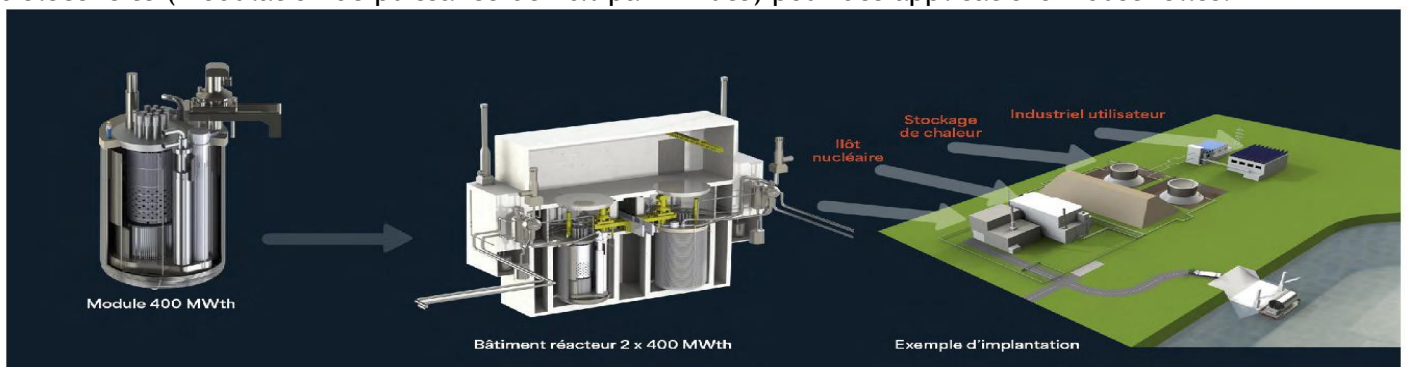


Schéma du projet Hexana (source Hexana)

France 2030 : les [deux startups Stellaria et Thorizon en consortium avec Orano désignées lauréates](#) de l'appel à projet pour développer des réacteurs à sels fondus

Point de vue sur le livre de Cédric Philibert « Eoliennes – Pourquoi tant de haine ? »

Par Jean-Antoine BORD, ECP02¹

Le titre interpelle. Pourquoi entrer dans le registre de l'émotion, surtout aussi négative, pour traiter de l'énergie, avec des problématiques scientifiques, technologiques, industrielles, économiques ?

Les experts de ces domaines ont des avis consensuels, il y a peu de débat sur la question. Que ce soit l'Agence Internationale de l'Énergie au niveau mondial (AIE, dépendant de l'OCDE), la commission énergie de la Commission Européenne ou en France avec les rapports de l'ADEME et DGEC et les scénarios RTE, tous prévoient l'électrification des usages de l'énergie, l'efficacité énergétique et une augmentation de la consommation d'électricité. Tous prévoient le fort développement de toutes les énergies renouvelables et notamment la place de l'éolien dans le mix énergétique pour les pays d'Europe.

En revanche, c'est au niveau du politique et du grand public en France que les débats sont les plus passionnés. Pourquoi la France, qui était pionnière dans l'éolien avec les turbines d'AREVA, devenues GE Vernova, reste l'un des pays d'Europe avec la plus faible part d'éolien dans son mix électrique (11%, 16^{ème} place) ? Pourquoi la France, qui a connu année après année des lois sensées faciliter le développement des parcs, reste le pays d'Europe avec les plus fortes contraintes environnementales, avec les délais d'instruction les plus longs et les éoliennes les plus petites d'Europe – 2,3MW en moyenne, 3,4MW pour les permis alloués en 2023, alors que les éoliennes raccordées en Europe avaient une puissance moyenne supérieure de 4,5MW ? Et enfin, pourquoi en France, malgré l'ambition affichée par les politiques (loi APER en 2023, loi de programmation de l'énergie en 2019), certains préfets refusent systématiquement d'accorder l'autorisation environnementale - 1242MW en 2023, +100%, parfois contre l'avis même de la DREAL, service instructeur sous la responsabilité du Préfet - alors que dans le même temps les tribunaux administratifs prononcent massivement l'annulation des refus préfectoraux - 553MW en 2023, +80% ?

¹) Jean-Antoine BORD est ingénieur centralien. Il s'intéresse au secteur de l'énergie et plus particulièrement à l'éolien offshore.

A l'heure où l'Europe doit accélérer sa décarbonation, les acteurs politiques français peinent à définir des choix énergétiques avec des objectifs clairs par filière et à assumer ces choix. Pourquoi, cette source d'énergie abondante, bas carbone, compétitive, qui transforme nos territoires en producteur d'électricité, crée des emplois et pourvoie des revenus importants pour les collectivités, pourquoi l'éolien donc est la cible d'un lobbying à son encontre.

Le livre « Eoliennes – Pourquoi tant de haine ? », paru en février 2023, corrige de nombreuses idées reçues en France au sujet des éoliennes. Il s'appuie sur des analyses et études qui font consensus, sans parti pris politique. Sans complaisance pour l'éolien, il répond avec objectivité aux critiques et arguments, souvent fondés. Chacun des 6 chapitres, documentés avec rigueur, est agrémenté de l'analyse critique des positions prises par une personnalité publique. Ce livre éclaire le débat sur nos choix énergétiques. Il s'adresse à toute personne intéressée par l'énergie, du décideur politique au simple citoyen électeur.

En premier lieu, il démontre « **l'absolue nécessité de l'éolien** » puis répond à la question « pourquoi l'éolien ». Il esquisse ensuite des scénarios « vers zéro émission nette », s'appuyant sur des études et analyses réalisés par des scientifiques internationaux et français. Il s'offre un détour sur « **l'avenir du nucléaire** » et en retrace également l'histoire industrielle en France.

L'auteur construit un scénario énergétique dominé par les énergies renouvelables. Il démontre comment, en associant les forces de l'éolien, du solaire et de l'hydraulique, on parvient à dépasser les limites de chaque énergie prise individuellement. En particulier l'éolien produit plus en hiver, le solaire produit plus en été et l'hydraulique est notre source d'énergie la plus pilotable. Il décrit les évolutions qui ont amené l'éolien à augmenter son facteur de charge, à améliorer son intégration au mix électrique et à la rendre plus compétitive. Avec bon sens et en s'appuyant sur des mesures réelles, il explique comment réduire la variabilité des énergies éoliennes et photovoltaïques quand on augmente l'échelle spatiale à l'Europe et l'échelle temporelle à la semaine. Le renforcement du réseau de

transport haute tension et des interconnexions entre pays d'un côté, l'ingénierie du stockage déjà possible avec des technologies plus récentes et déjà matures de l'autre, apportent des solutions réduisant la variabilité de la production d'électricité. Il présente aussi comment la consommation d'électricité s'adapte aujourd'hui aux limites de notre production. De nouveaux usages et technologies en développement, dans le résidentiel, les transports et l'industrie, permettront encore davantage de consommer l'électricité quand elle est abondante et peu chère

Enfin, l'auteur passe en revue les nombreuses critiques de l'éolien, notamment sur les problématiques environnementales – milieu humain et biosphère en particulier. Il reprend les arguments divers expliquant qu'on pourrait faire sans l'éolien. Il se livre à l'exercice d'y répondre, sans chercher à les dénaturer ou les caricaturer, en reconnaissant avec honnêteté leur fondement. Il corrige les affirmations fausses ou excessives, reconnaît que **l'éolien seul ne peut nous permettre de réaliser notre transition énergétique**. En premier lieu, il détaille les dispositions ERC – éviter, réduire, compenser – sur les nuisances sonores, l'intégration paysagère ou la protection des oiseaux et des chauves-souris. Puis il décompose les éoliennes et décrit la quantité de matériaux nécessaire et la recyclabilité de chaque élément. Par ailleurs, il démontre pourquoi certaines solutions ne suffisent pas à assurer notre transition énergétique et limiter notre impact sur le réchauffement climatique. L'économie d'énergie est un levier déjà identifié et de mesures sont planifiées mais les scénarios en montrent les limites et soulignent la nécessité d'augmenter notre production d'électricité.

Les énergies alternatives sont évidemment intégrées à tous les scénarios de notre mix électrique, **mais aucun scénario ne permet de se passer de l'éolien**. Miser sur les nouvelles technologies comme l'hydrogène ou la capture et le stockage du CO₂, c'est prendre un risque qui pourrait retarder la mise en œuvre des autres leviers.

Ce livre interpelle politiques, experts et personnalités publiques sur leur propre responsabilité pour expliquer aux Français les choix énergétiques qui ont été fait et les décisions qu'il reste à prendre. Il invite chacun à un effort de compréhension et d'honnêteté intellectuelle, plutôt que de prendre des positions démagogiques. Il favorise un débat public plus éclairé et constructif. En bref, nous vous recommandons vivement la lecture de ce livre.

Cédric Philibert est chercheur associé à l'Institut Français des Relations Internationales (IFRI). Il a travaillé vingt ans à l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA).



« Eoliennes – Pourquoi tant de haine ? » est paru aux éditions les petits matins en février 2023 et fait 188 pages.

Depuis la parution de ce livre, plusieurs éléments viennent renforcer encore les arguments en faveur de l'éolien : des ambitions rehaussées et de nouveaux scénarios de sortie des énergies fossiles, des progrès techniques et industriels, des évolutions réglementaires, mais aussi de nouvelles difficultés pour le nucléaire français actuel, malgré la volonté de le relancer portée par le Gouvernement.