

COP climat, quelles options énergétiques ? : le cas du nucléaire (le point de vue d'un observateur)

Les COP (Conférence des Parties, en anglais Conference of the Parties), sont au nombre de trois : la COP biodiversité, la COP sur la lutte contre la désertification et la COP sur les changements climatiques. Elles rythment l'agenda du dossier de la transition environnementale chaque automne. De toutes les COP des Nations Unies, la COP climat rassemble le plus d'acteurs et reste, à date, la plus connue du public. Rappelons que la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC, en anglais United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) est créée en 1992. La mise en place de la COP1 suit de peu cette initiative en mars 1995 à Berlin. Deux ans après avait lieu la signature du protocole de Kyoto [1]. La dernière en date, la COP28 vient de se dérouler à Dubaï (EAU) en décembre 2023 après les éditions de 2022 à Sharm el Sheikh, de 2021 à Glasgow, et des années 2020 – 2017 perturbées (pandémie en 2020, annulation au Chili en 2019, retrait des USA de l'accord de Paris en 2017). C'est en 2015, lors de la COP21 qu'un tournant s'opère avec l'adoption de l'Accord de Paris. L'accord de Paris (adopté par les 196 parties représentées) vise à intensifier les actions et les investissements nécessaires pour un avenir à faible émission de carbone. Son objectif peut être formulé selon la double injonction de : poursuivre les efforts actuels pour limiter l'augmentation de la température à 1,5 degré Celsius d'ici 2050 et par ailleurs maintenir l'augmentation de la température mondiale au cours de ce siècle bien en dessous de 2 degrés Celsius par rapport aux niveaux préindustriels.

Cet article est le fruit d'une synthèse de deux sessions d'observation et de contribution aux deux dernières COP, la COP 26 (2021, Glasgow) et 27 (2022, Sharm el Sheikh) et d'une réflexion sur les stratégies actuellement en discussion concernant la place du nucléaire dans un futur de mix énergétique⁽¹⁾. Cette réflexion répond aux enjeux liés à l'Objectif du Développement Durable 7 [2] qui repose notamment sur le constat qu'à date, les sources renouvelables fournissent approximativement 30 % de la consommation d'énergie en matière électricité, mais que des limites subsistent dans d'autres secteurs, y compris le secteur du transport. Il ne s'agit pas ici de faire le plaidoyer d'une solution énergétique (notamment nucléaire) parmi les autres mais plutôt de mettre en miroir les données projetées par les derniers rapports du GIEC et qui sont au centre des discussions des COP et les stratégies proposées à différents niveaux (états, organisations mondiales) concernant plus spécifiquement la place de l'option nucléaire. L'importance du débat sur l'option nucléaire, comme faisant partie des stratégies nécessaires au respect de l'accord de Paris, s'est traduite au cours des dernières COPs par la présence de l'AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique) dans la zone dite « bleue » [3] de la COP26 avec sa plateforme de discussion #Atoms4Climate et ce dans la continuité de la publication de son rapport de 2021 *Nuclear Science and Technology for Climate Adaptation and Resilience* [4]. À la COP27, l'AIEA était à nouveau présente, IAEA@COP27 [5].

À titre de complément, le pavillon GWEC (Global Wind Energy Council) était également présent à la COP27 pour présenter son manifeste sur l'urgence de déploiement des énergies solaire et éolienne [6]. Outre la présence institutionnelle du Pavillon de l'AIEA, la COP27 a également accueilli le Pavillon Associatif *Nuclear4Climate* animé par les réseaux jeunesse International Youth Nuclear Congress, European Nuclear Society – Young Generation Network et la SFEN (Société Française d'Energie Nucléaire). Enfin, la question du nucléaire a également été abordée au cours de plusieurs événements organisés par les Pavillons des Etats membres à l'image du Pavillon France qui a organisé une table-ronde sur le thème « Déployer à grande échelle des énergies bas carbone : focus sur le nucléaire et l'hydrogène » qui a réuni l'International Energy Agency (IEA), la SFEN et VINCI [7].

Une mission d'observation aux COP26 et 27

L'accréditation en qualité d'observateur qui donne accès aux zones bleues et vertes (qui ne nécessite pas d'accréditation) de la COP climat permet de s'informer et d'interagir sur les actions en cours, les initiatives, les réflexions menées par les états, partenaires, organisations ou associations présents dans cet espace de la COP sous forme de représentations. Les représentations de la zone bleue (ou « pavillons accrédités ») sont des forums de discussion qui visent à promouvoir, partager ou débattre certaines stratégies, à présenter la diversité des initiatives et solutions scientifiques, technologiques ou politiques à toutes les échelles envisagées. Plus encore, ces forums de discussion se veulent force de proposition pour influencer les négociations et s'assurer que les décisions adoptées font écho aux besoins réels des territoires et de ses habitants.

Pour replacer les thématiques abordées dans un panorama global, il convient dans un premier temps de poser quelques chiffres très généraux.

En 2021, la population mondiale rapportée par les Nations Unies était de 7 877 millions, avec une projection autour de 10 500 millions sur la période 2080-90 (ce qui pourrait constituer un maximum). En regard de cette évolution de la démographie mondiale, l'entrée dans ce que certains auteurs ont nommé la période anthropocène [8] (depuis 1784, date de l'invention de la machine à vapeur par J. Watt) représente le début d'une trajectoire très rapide du système terrestre, induite par l'homme, et qui s'éloigne du cycle limite glaciaire-interglaciaire [9]. Selon les travaux du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, IPCC en anglais) la température moyenne à la surface de la terre sur la période 2011-2020 est supérieure de 1,1 °C à la période de référence sur 1850-1900 et sur cette même période de référence, la concentration de GES (CO₂ notamment) est passée de moins de 300 ppm en 1850 à 410 ppm en 2019 [10]. Dans ce même rapport, il est estimé que la part de l'influence humaine sur cette évolution est totale.

L'Accord de Paris demande notamment de réduire considérablement les émissions mondiales de gaz à effet de serre afin de limiter l'augmentation de la température mondiale à 2 degrés Celsius au cours de ce siècle. Il prévoit de revoir les engagements des parties tous les 5 ans et de fournir un financement aux pays en développement pour limiter le changement climatique, renforcer la résilience et améliorer les capacités d'adaptation aux effets du climat. Notons que la COP27 s'est clôturée sur un accord historique visant justement à financer les pertes et préjudices avec la création d'un fonds et de dispositions de financement nécessaires pour les pays vulnérables confrontés à des catastrophes climatiques, et son inscription à l'ordre du jour permanent.

Le GIEC estime que les émissions mondiales de GES d'ici à 2030, en prenant en compte la mise en œuvre des Contributions Nationales Déterminées annoncées avant la COP26 (Glasgow 2021), seraient probablement responsables d'un réchauffement supérieur à 1,5 °C au cours du 21^{ème} siècle et rendraient plus difficile la limitation du réchauffement en deçà de 2 °C au cours du siècle. En 2019, les concentrations atmosphériques de CO₂ ont atteint 410 ppm, celles de CH₄ 1 866 ppb et celles d'oxyde nitreux 332 ppb. Depuis 1750, l'augmentation des concentrations en CO₂ (47 %) et en CH₄ (156 %) dépasse largement les taux de changements naturels plurimillénaires observés entre les périodes glaciaires et interglaciaires au cours des 800 000 dernières années au moins. Les projections futures (2021-2100) de l'évolution de la température à la surface de la terre ont été présentées dans le rapport de 2023 du GIEC pour 5 scénarios (Shared Socio-economic Pathways) d'émissions de GES très faibles, faibles, intermédiaires, élevées et très élevées. Les deux scénarios de grande (SSP3-7.0) et très grande (SSP5-8.5) émission de CO₂ prévoient des émissions qui doublent d'ici à 2100 et 2050 respectivement. Le scénario intermédiaire (SSP2-4.5) simule une émission de CO₂ égale au niveau actuel jusque vers le milieu du siècle. Enfin les deux scénarios les plus restrictifs (SSP1-1.9 et SSP1-2.6) ont des émissions de CO₂ qui déclinent à un bilan nul (l'option *NetZero* pour 2050 ou 2070, respectivement), suivi d'émissions négatives à différents niveaux (figure 1) [11].

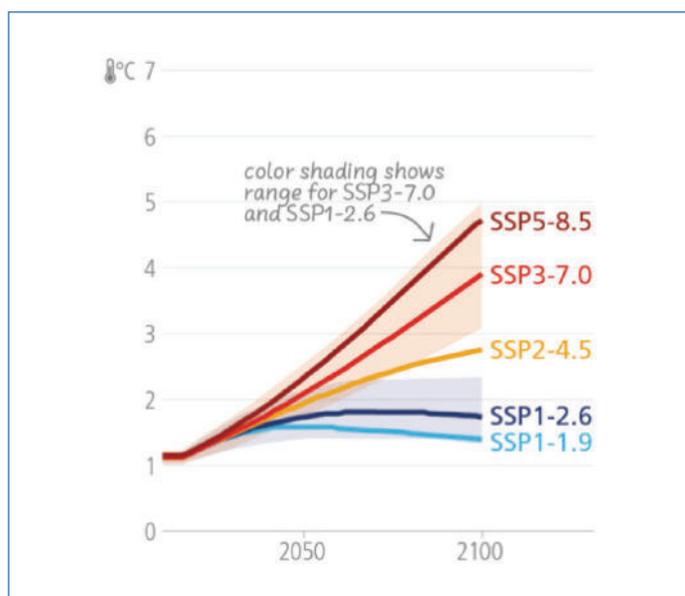


Figure 1 - Temperature for SSP-based scenarios over the XXIth century. © IPCC AR6 SYR Synthesis Report (long report), 2023.

Il est à noter que seuls les scénarios SSP1-1.9 et SSP1-2.6 permettent de rester en deçà d'une augmentation de la température de 2 °C au cours du siècle et seul le scénario le plus restrictif répond pleinement aux exigences de l'accord de Paris.

Face à ce constat, de très nombreux acteurs du climat avancent la nécessité d'adopter des stratégies de décarbonation [12]. Ce terme renvoie à de très nombreuses facettes de l'activité industrielle et sociétale d'un pays (industrie, transports, chauffage individuel et collectif, agriculture). Parmi ces postes d'activité, le besoin en énergie est un prérequis à toute activité humaine. Le scénario *NetZero* d'ici 2050 est un scénario normatif de l'IEA qui montre une voie possible à suivre pour que le secteur mondial de l'énergie parvienne à des émissions nettes nulles de CO₂ d'ici à 2050, les pays à économies avancées [13] parvenant à des émissions nettes nulles avant les autres [14]. Selon ce scénario l'utilisation globale des véhicules électriques doit être multipliée par 6 d'ici à 2030, les énergies renouvelables doivent couvrir 60 % de la production électrique (30 % aujourd'hui) et la demande en électricité passe d'environ 20 % de l'énergie finale consommée aujourd'hui à 30 % [15]. On voit donc que la production électrique représente un enjeu clé (mais pas unique) des stratégies énergétiques mondiales.

Les options mettant en jeu un mix nucléaire

Dans ce contexte, l'AIEA a présenté à la COP26 de Glasgow une stratégie pour atteindre les objectifs du scénario *NetZero* [16]. Quelques chiffres permettent de dresser un panorama global des différents pôles énergétiques mondiaux. Précisons tout d'abord qu'il convient de différencier l'énergie primaire de l'énergie finale consommée (dont l'électricité). Les combustibles fossiles représentent toujours (en 2022) 70-80 % de la source d'énergie primaire totale utilisée, bien que ce chiffre soit en légère baisse [17]. En 2021, le pétrole représente environ 30 % des sources d'énergie primaire (le charbon 26 %, le gaz 23 %) et l'énergie nucléaire se situe autour de 5 %. En 2021, 19,5 % de l'énergie finale consommée est électrique. Dans le scénario *NetZero*, discuté ici, la production d'énergie électrique est presque multipliée par 2 entre 2021 et 2050 (pour atteindre une production annuelle de 50 000 TWh) [18]. L'énergie nucléaire, dont la proportion a légèrement diminué depuis les années 1980-90 (18 % de la part mondiale de l'électricité dans les années 1990, 9,8 % en 2021) représente un potentiel de déploiement qui est ainsi mis à contribution dans les différentes options pour décarboner le mix énergétique. L'AIEA décompte à la fin 2021, 437 réacteurs nucléaires de production électrique en opération dans le monde et 53 en construction (dont 18 en Chine).

Dans les pays dits à économie avancée, la part de l'énergie nucléaire comme source d'électricité représente la plus grosse proportion (40 %) des sources d'énergie bas carbone (viennent ensuite l'hydroélectricité puis l'éolien) [19]. Sur le plan mondial, l'hydroélectricité reste pourtant le principal contributeur de source d'électricité bas carbone, avec une part de 16 %. Pour autant, la production d'électricité reste à l'origine de 42 % des émissions de GES (chiffre de 2018) [20]. Dans son document édité à l'occasion de la COP26, l'AIEA présente donc sa stratégie pour respecter les accords de Paris en développant une approche intégrée et mondiale du recours à l'énergie nucléaire aussi bien pour la production d'électricité que de di-hydrogène ou encore de chaleur... [21]

Pour assurer l'augmentation de la production électrique décarbonée, proposée dans le scénario *NetZero*, L'AIEA préconise de déployer approximativement 550 GWe de capacité nucléaire [21], en plus des 400 GWe actuels.

Pour fixer les ordres de grandeurs, la construction des 550 GWe représente environ 344 réacteurs de type EPR (de puissance installée de 1.6 GWe chacun), ou plus de 1830 réacteurs de 300 MWe. La construction de ces nouveaux réacteurs impliquerait donc une augmentation de la consommation d'uranium naturel d'un facteur 2,5 environ par rapport à la situation actuelle (estimée à 65 kt par an environ), en supposant que les nouveaux réacteurs déployés reposent sur l'utilisation de combustibles proches de ceux actuellement utilisés. Selon ces hypothèses, le parc mondial en 2050 proposé par le scénario *NetZero* conduirait donc à une consommation de l'ordre de 160 kt à mettre en regard des 6 millions de tonnes des ressources identifiées (6 078 500 tU au 01/01/2021 au prix < \$US 130/kgU [22].

Ces ressources permettraient alors de répondre à la demande en supposant que l'extraction minière ainsi que l'enrichissement en ^{235}U soient capables de s'adapter à cette hausse de la consommation mondiale d'uranium naturel, une hypothèse forte qu'il conviendrait de discuter. Le développement d'un cycle du combustible, c'est-à-dire le recyclage des matières fissiles (uranium et plutonium) et la gestion des déchets nucléaires, permettrait de détendre la contrainte sur la disponibilité de l'uranium naturel en utilisant des combustibles de type MOX, comportant une fraction de plutonium, en particulier avec des réacteurs à neutrons rapides (RNR) dans des réacteurs de 4^{ème} génération. La maturité des usines françaises de traitement/recyclage des matières fissiles, issues du combustible irradié, permet d'envisager à moyen terme le déploiement de nouvelles usines qui permettront une augmentation de la quantité de combustible nucléaire. Toutefois, le changement d'échelle, l'adaptation des combustibles aux différentes filières électronucléaires et l'amélioration du cycle de vie des matières nécessitent encore des développements qui restent à évaluer. Si ce développement semble technologiquement accessible, il faut bien noter qu'il est également conditionné aux nécessités de sûreté et de non-prolifération. Par ailleurs la localisation de ces usines dans quelques pays désignés conduirait à une augmentation du transport des combustibles et de leurs stockages, ce qui nécessite un débat transparent avec les différentes composantes de la société civile.

Une problématique de constante de temps

La part nucléaire de la stratégie *NetZero* repose sur plusieurs catégories de réacteurs comme les réacteurs de puissance refroidis à l'eau (majoritaires actuellement), les réacteurs modulaires refroidis à l'eau (SMR, de puissance inférieure à 300 MWe) et les réacteurs modulaires avancés (AMR : sodium, sels fondus...). Cette dernière catégorie de technologie de réacteurs regroupe les réacteurs très innovants de petite puissance, en rupture technologique avec les réacteurs à eau largement déployés dans le monde.

Pour tenter d'estimer les possibilités de construction de nouveaux réacteurs, commençons par un état des lieux de la situation actuelle. Au 31 Décembre 2022, 438 réacteurs sont en fonctionnement dans 38 pays [23]. 53 réacteurs sont

actuellement en construction, dont 42 sont dits de grande puissance (c'est-à-dire supérieur à 1GWe). Parmi eux, 11 sont en chantiers depuis plus de 10 ans. D'autre part, sur la période 2011 – 2017, 46 réacteurs ont été mis en service (et 39 ont été arrêtés, portant le solde de nouveaux réacteurs disponible à 7). Depuis 2017, 3 EPR ont été mis en service (Taishan 1&2 et Olkiluto 3) après des temps de construction respectivement de 9 ans, 9 ans et de 17 ans.

À partir de ces données, il est raisonnable d'estimer très improbable d'assister à la mise en service de dizaines de nouveaux réacteurs (en plus des 53 en cours) d'ici une dizaine d'années. Pour tenir les objectifs du scénario *NetZero*, il faudrait alors démarrer dans le monde la construction d'environ 300 nouveaux EPR d'ici 5 ans. Outre les problématiques financières, ces nouveaux chantiers devraient nécessairement se situer dans des pays nucléarisés, là où l'électricité est déjà en cours de décarbonation. Le recours à des technologies de plus faible puissance pourrait éventuellement réduire les temps de construction.

Aujourd'hui, de nombreux acteurs industriels se sont impliqués dans la conception de petits réacteurs modulaires, appelés communément SMR (Small Modular Reactor) et dont la puissance est inférieure à 300 MW(e). Le principe de déploiement des SMR repose sur une fabrication en amont, en usine de modules contenant la cuve et le (ou les) générateur(s) de vapeur. Ces modules peuvent être ensuite assemblés sur le site d'exploitation dans une configuration souhaitée. L'objectif est de réaliser une économie d'échelle sur la construction des réacteurs et la compétitivité économique des SMRs repose donc sur l'hypothèse d'un déploiement massif de chaque technologie de SMR. Il y a actuellement plus de 70 types de SMR à l'étude ou en développement dans le monde [24], dont une poignée peuvent être considérés matures technologiquement alors que d'autres sont des concepts papier. La petite puissance de ces réacteurs fait des SMR de bons candidats pour être déployés dans des pays n'ayant pas encore de programme nucléaire en cours, à condition de garantir les conditions de sûreté et de non-prolifération. Pour accompagner ces pays dits primo-accédants, l'AIEA propose des programmes personnalisés basés sur une démarche en trois étapes (avant-projet, projet, construction) au cours desquelles doivent se développer les infrastructures nationales dans 19 domaines identifiés comme supports à la concrétisation de tout programme nucléaire. Dans son document « Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power » [25], l'AIEA estime qu'une durée minimale de 10 à 15 ans est nécessaire pour valider ces étapes avant de pouvoir envisager/procéder à la mise en service de la première installation de production. Ces délais permettent aux primo-accédants d'organiser nationalement le fonctionnement opérationnel de la filière et permettent, entre autres, de construire une autorité de sûreté et de concevoir une stratégie de gestion des déchets nucléaires.

Basée sur le constat que le déploiement des réacteurs de puissance est soumis à de fortes contraintes d'investissement monétaire, l'idée des SMR est séduisante. Cependant, l'exemple de NuScale, considéré comme une des technologies les plus matures et dont la fabrication de la première unité de production vient d'être repoussée [26] essentiellement pour des raisons économiques renforce le besoin de prudence sur la communication face au potentiel déploiement de l'énergie nucléaire dans les deux prochaines décennies.

Si le recours aux réacteurs matures technologiquement comme les REP (ou les EPR) et les petits réacteurs à eau type SMR semble déjà difficile pour remplir les objectifs du scénario *NetZero*, le recours à des technologies non matures industriellement semble difficile pour décarboner la production d'électricité mondiale aux échelles de temps en question. Les AMR (Advanced Modular Reactors) présentant des innovations sur le combustible ou sur l'extraction de chaleur sont tous au stade de projet et de nombreux efforts de recherche doivent encore être mobilisés avant même d'espérer leur homologation par les autorités de sûreté. Au-delà d'un rôle dans la lutte contre le climat à moyen terme, les AMRs gardent néanmoins un intérêt certain qui justifie leur étude en particulier pour développer de nouvelles approches et concepts de réacteurs et permettre à la filière industrielle de gagner en compétence pour les réacteurs de 4^{ème} génération, très intéressants pour l'économie des ressources naturelles et l'optimisation potentielle de la gestion des déchets. Enfin pour compléter ce panorama de production d'énergie (électricité, chaleur, di-hydrogène, ...) le développement de réacteur hybrides à neutron rapide (cogénération chaleur électricité) de type neutron rapide (RNR) permet une diversification des énergies décarbonées produites pour une diversification des applications. Ce type de réacteur permet également une valorisation plus importante des matières nucléaires recyclées (uranium de retraitement, plutonium) ou encore des stocks de matière radioactive (uranium appauvri).

Les efforts en cours et ceux à venir accéléreront la contribution de la production d'énergie nucléaire à la décarbonation des énergies et faciliteront son intégration au mix énergétique. C'est pourquoi il sera indispensable de maintenir cet effort d'accélération des constantes de temps du nucléaire. Enfin il faut souligner que le scénario *NetZero*, comme tous les scénarios, est une construction d'un futur possible qui permet de discuter des hypothèses des réflexions prospectives. Ce scénario en particulier, est un scénario normatif qui cherche à mettre en lumière les besoins et les difficultés pour construire un mix énergétique décarboné permettant de limiter le changement climatique. Il montre ainsi que le nucléaire pourrait jouer un rôle important dans la décarbonation du mix électrique d'ici 2050 avec cette approche d'accélération des développements et d'innovations nécessaires sur l'ensemble du cycle (extraction minière, recyclage et enrichissement). Celles-ci sont liées aux besoins législatifs et sociétaux, à la démonstration de sûreté des réacteurs ainsi qu'aux problématiques d'ingénieries et de savoir-faire pour la construction et l'opération des réacteurs et du cycle des combustibles irradiés. L'épopée nucléaire des années 60-80 montre que des déploiements rapides, semblables à ceux du scénario *NetZero* ont été possibles mais dans un contexte sociétal et législatif très différent.

Après la COP28 à Dubaï, les questions énergétiques portant en particulier sur l'évolution de la demande en énergie électrique sont plus que jamais au centre du débat. En France, la prolongation des centrales actuelles, la simplification de l'EPR2 pour accélérer son déploiement, l'investissement dans le projet de SMR NUWARD (NUclear forWARD) ainsi que le

déploiement d'études innovantes sur des SMRs et AMRs semblent être les voies identifiées et mises en oeuvre pour consolider la part du nucléaire à moyen et long terme dans le mix énergétique.

⁽¹⁾ Ce texte est une édition augmentée d'un séminaire organisé par la Division Transverse Energie et donné en ligne le 17/03/2023.

[1] Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Kyoto, 11/12/1997.

[2] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>

[3] All of the official sessions, meetings, side events and press conferences are taking place in the "blue zone", the formal conference and negotiation space managed by UN Climate Change. Only Party delegations, Heads of State, admitted observers and the accredited press can enter the blue zone.

[4] IAEA, Nuclear Science and Technology for Climate Adaptation and Resilience, A Reference Document, IAEA, Vienna, 2021.

[5] www.iaea.org/topics/climate-change/the-iaea-and-cop/cop27, consulté 11/2023.

[6] <https://gwec.net/gwec-cop27-hub/>, consulté 11/2023.

[7] Pavillon France COP27, 15/11/2022, <https://www.ecologie.gouv.fr/cop27-france>, consulté 11/2023.

[8] P.J. Crutzen, *Nature*, **2002**, 415(23).

[9] W. Teffen *et al.*, *PNAS*, **2018**, 115, 8252.

[10] IPCC AR6 Synthesis Report (long report), 2023.

[11] IPCC AR6 Synthesis Report (long report), 2023.

[12] Climat, crises : le plan de transformation de l'économie française, the shift project, Ed. Odile Jacob, Paris, 2022.

[13] Advanced economies consist of Australia, Canada, Chile, the 28 members of the European Union, Iceland, Israel, Japan, Korea, Mexico, New Zealand, Norway, Switzerland, Turkey and the United States.

[14] IEA, Global Energy and Climate Model, www.iea.org

[15] IEA Energy Technology Perspectives, 2023.

[16] IAEA, Nuclear Energy for a Net Zero World, 2021.

[17] IEA Energy Technology Perspectives, 2023.

[18] IEA, Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector, 2021.

[19] IEA, Nuclear Power in a Clean Energy System, 2019.

[20] IAEA, Transitions to low carbon electricity systems: Key economic and investments trends, Vienna, 2021.

[21] IAEA, Nuclear Energy for a Net Zero World, 2021.

[22] IAEA, Uranium 2022, Resources production and demand, Red Book, IAEA-NEA, OECD-NEA, 2023.

[23] IAEA Reference data series n° 2, Nuclear Power Reactors in the World, 2023.

[24] IAEA, No. NR-T-1.18, Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment, 2021.

[25] IAEA, Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power, 2015.

[26] <https://www.sfen.org/rgn/decryptage-le-projet-smr-de-nuscale-dans-lidaho-annule>, publié 21/11/2023.

Christophe DEN AUWER^{1*}, Philippe MOISY², Xavier DOLIGEZ³, Annick BILLEBAUD⁴, Sara-Anne COMEL⁵.

¹ Université Côte d'Azur, ICN, CNRS, 06100 Nice.

² CEA, DES, ISEC, Université Montpellier, Marcoule, France.

³ Université Paris Saclay, IJCLab, CNRS - IN2P3, 91405 Orsay.

⁴ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LPSC-IN2P3, 38000 Grenoble, France.

⁵ Université Côte d'Azur, Europe et Relations Internationales, 06100 Nice.

*christophe.denauwer@univ-cotedazur.fr