

DOSSIER



DÉCARBONNER

Entre le rêve et la réalité

LE DOCUMENT DE RÉFÉRENCE DE VACLAV SMIL,

LE « PENSEUR DE L'ÉNERGIE »

avec l'aimable autorisation du Fraser Institute



Qui est Vaclav Smil

le « penseur de l'énergie » ?

Vaclav Smil est sans doute l'universitaire le plus influent sur les grandes questions relatives à l'énergie. Né dans ce qui était alors la Tchécoslovaquie, il a fui son pays pour les États-Unis en 1969 après le printemps de Prague, étouffé par les chars russes l'année précédente. « Je suis une création de l'État communiste. Après avoir passé vingt-six ans de ma vie dans l'empire du mal, je ne supporte plus les absurdités », explique-t-il. Il garde de son passé de l'autre côté du rideau de fer soumis alors à la propagande communiste un rejet viscéral des discours qui ne sont pas accrochés au réel...

Par Eric Leser

Aucun ouvrage traduit en français...

Depuis son bureau dans sa maison toute proche de l'université du Manitoba à Winnipeg au Canada, ce professeur de 80 ans a écrit des dizaines de livres qui ont changé la compréhension des problématiques planétaires de l'énergie. Vaclav Smil a abordé des sujets extrêmement variés allant des problèmes d'environnement de la Chine, à la modification des habitudes alimentaires au Japon en passant par l'histoire de l'énergie et des civilisations, celle des transitions énergétiques, la façon dont notre monde fonctionne réellement et la question majeure de la croissance sans limites dans un monde fini.

Certains de ses livres ont marqué des générations de scientifiques, politiques, dirigeants et investisseurs. L'un des fans les plus convaincus de Vaclav Smil est Bill Gates, le cofondateur de Microsoft. Il explique « attendre la sortie du nouveau livre de Smil comme certaines personnes attendent le prochain film de *La Guerre des étoiles* ». Mais aucun des ouvrages de Vaclav Smil n'est traduit en français... L'illustration d'un certain retard de la France.

Des « vérités » qui ne font plaisir à personne

Vaclav Smil appartient à une espèce en voie de disparition, les généralistes. Dans le monde académique moderne, tout pousse à une spécialisation de plus en plus étroite. Vaclav Smil reconnaît que ses goûts éclectiques ont sans doute compliqué sa carrière. Mais son talent à synthétiser et à souligner les inflexions et les évolutions majeures dans des domaines différents fait sa force. Il lui a permis, par exemple, de montrer comment les évo-

lutions énergétiques se diffusent par capillarité dans les économies et les sociétés.

Les « vérités » de Vaclav Smil ne font plaisir à personne. Il met en garde les militants du climat sur la réalité de la dépendance du monde moderne aux énergies fossiles et sur les hypothèses farfelues qui leur permettent de construire des scénarios de transition rapide. Il s'en prend également aux optimistes béats qui pensent que la technologie permettra à la civilisation de survivre et qu'il n'y a pas de limites physiques à la croissance économique.

« Je n'ai rien à vendre... »

Vaclav Smil n'est pas critique du discours écologique dominant pour le plaisir. Il est un partisan convaincu du changement climatique et de la nécessité de se passer des énergies fossiles et de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Mais cela ne se fera pas pour lui avec des slogans et en ignorant les faits.

Le travail universitaire méticuleux et obsessionnel qu'il mène depuis plus d'un demi-siècle a pour objet d'offrir une évaluation claire des défis et qu'il ne s'agit surtout pas d'une justification à l'inaction. Il souligne qu'il n'appartient à aucun camp, si ce n'est celui du savoir. « Je ne me suis jamais trompé sur les grandes questions de l'énergie et de l'environnement, parce que je n'ai rien à vendre », affirme-t-il. Si de nombreux organismes et institutions sollicitent ses conseils et ses avis, Vaclav Smil n'est pas, pour autant, un personnage médiatique et public. Il considère que ses livres et ses textes parlent pour lui.

DOSSIER

Transition, à mi-chemin et tellement loin de l'arrivée

Nous sommes aujourd'hui à mi-chemin entre 1997 (il y a vingt-sept ans), lorsque les délégués de près de 200 pays se sont réunis à Kyoto pour s'engager à limiter les émissions de gaz à effet de serre, et 2050. Il reste vingt-sept ans au monde pour atteindre l'objectif de décarbonisation du système énergétique mondial. Il semble impossible qu'il y parvienne, aussi souhaitable que soit cet objectif.

La différence entre la réalité et les vœux pieux : s'il y a bien eu un déclin relatif de la part des énergies fossiles, passées de 86 % en 1997 à 82 % en 2022, le monde en a consommé en fait près de 55 % en plus qu'en 1997 ! Peu de termes sont devenus aussi courants au cours de la première moitié des années 2020 que ceux de « *transition énergétique* », « *décarbonisation* » et « *net zéro* » d'ici 2050. Tous véhiculent le grand objectif mondial d'éliminer la combustion des combustibles fossiles – et les émissions de CO₂ qui en découlent – d'ici le milieu du XXI^e siècle, et donc d'empêcher de nouvelles augmentations indésirables de la température troposphérique. Net et le qualificatif zéro signifient que l'objectif à atteindre préserve la possibilité de continuer à dépendre de certains carburants fossiles dont les émissions seraient captées dans l'atmosphère et séquestrées, ce qui n'entraînerait aucun ajout de CO₂ anthropique. À moins que les émissions ne puissent être dissociées de la combustion, l'élimination de la dépendance de la civilisation moderne à l'égard des combustibles fossiles est un objectif souhaitable à long terme, mais qui (pour de nombreuses raisons) ne peut être atteint ni rapidement ni à peu de frais.

À l'échelle mondiale, le charbon et le pétrole ont dépassé le bois en tant que principales sources d'énergie juste avant la fin du XIX^e siècle, et c'est ainsi que depuis cent vingt-cinq ans, notre civilisation est principalement alimentée par des combustibles fossiles.

En termes de masse, nous ne serons jamais à court de combustibles fossiles : d'énormes quantités de charbon et d'hydrocarbures resteront dans le sol après que nous aurons cessé de les utiliser parce qu'il sera trop coûteux de les extraire.

Bien que le monde du début des années 2020 ne soit pas en danger imminent d'épuisement des combustibles fossiles, il faudra les remplacer à long terme, même en l'absence de tout lien avec le réchauffement climatique.

Leur conversion a rendu possible la civilisation moderne, mais leur production, leur traitement et leur transport perturbent souvent l'environnement, avec des effets allant de l'abandon des terres à la pollution de l'eau ; leur combustion génère non seulement du CO₂, mais aussi des polluants tels que le CO, les oxydes d'azote (NO, NO₂) et de soufre (SO₂ et SO₃) et des particules. Leur répartition très inégale contribue aux inégalités économiques mondiales et la

quête d'un approvisionnement sûr en combustibles fossiles a conduit à de nombreuses politiques préjudiciables et a contribué à des conflits récurrents.

Les alternatives non carbonées progressent depuis cent quarante ans : la première centrale hydroélectrique au monde a commencé à fonctionner en 1882, la même année que les deux premières centrales électriques au charbon d'Edison. Le premier réacteur nucléaire commercial à fission a été mis en service en 1956 et, en 2022, ces deux modes de production d'électricité représentaient près d'un quart de la demande mondiale. La production géothermique remonte également à plus d'un siècle mais, pour de nombreuses raisons, elle n'a jamais vraiment décollé, tandis que la production à relativement grande échelle de biocarburants (surtout d'éthanol d'origine végétale) s'est limitée aux États-Unis et au Brésil.

Nous restons une civilisation alimentée par des combustibles fossiles et cette brève analyse démontre le degré élevé de notre dépendance et la faible probabilité, voire l'impossibilité, d'alimenter l'économie mondiale en énergie sans utiliser de carbone fossile d'ici 2050.

Par Vaclav Smil

Le carbone dans la biosphère

La Terre est propice à la photosynthèse et habitable pour tous les organismes supérieurs grâce à la régulation de sa température atmosphérique par plusieurs gaz d'origine naturelle, en particulier le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O) et l'ozone (O₃).

La prise de conscience que ces gaz pourraient affecter le climat n'a rien de nouveau. En 1861, John Tyndall conclut que la variation du CO₂ atmosphérique « doit produire un changement dans le climat » (Tyndall, 1861). En 1896, Svante Arrhenius a expliqué qu'une augmentation exponentielle du CO₂ entraînerait une augmentation presque arithmétique des températures de surface et que le doublement des niveaux de CO₂ préindustriels pourrait augmenter la température de la Terre de 5 à 60 °C (Arrhenius, 1896). En 1957, Roger Revelle et Hans Suess ont conclu que la civilisation s'était lancée dans une « expérience géophysique à grande échelle d'un type qui n'aurait pas pu se produire dans le passé ni être reproduit dans l'avenir » (Revelle et Suess, 1957). Un an plus tard, des scientifiques américains ont commencé à mesurer les concentrations de CO₂ à l'observatoire de Mauna Loa à Hawaï, ce qui a permis de constater leur augmentation annuelle constante (Global Monitoring Laboratory, 2023). Il est remarquable que les connaissances accumulées n'aient eu aucun effet sur nos actions et nos politiques, et ce n'est qu'à partir de 1988 que le réchauffement climatique a commencé à attirer l'attention du public, lorsque l'Assemblée générale des Nations unies a approuvé la création du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). L'adoption de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) a suivi en 1992, et la création de son organe décisionnel suprême, la Conférence des parties (COP), en 1995. Le protocole de Kyoto, qui engage les pays signataires à réduire les émissions de gaz à effet de

serre « à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique », a été adopté en 1997. Depuis lors, l'attention portée au changement climatique mondial a augmenté de façon exponentielle. Nous avons beaucoup appris et, bien que des incertitudes subsistent, les faits fondamentaux sont indiscutables.

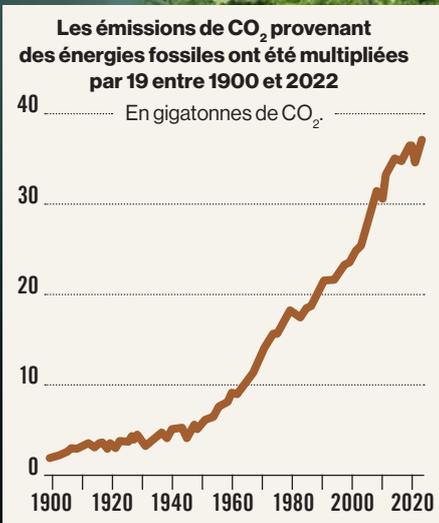
Les meilleurs résumés disponibles des émissions mondiales de CO₂ montrent qu'elles ont été multipliées par 19 entre 1900 et 2022, et que cette augmentation constante a été interrompue (jusqu'à trois ans) moins de 20 fois au cours de cette période de cent vingt-deux ans (voir figure 1) (AIE, 2023). Les analyses des carottes glaciaires montrent que les niveaux de CO₂ étaient proches de 270 parties par million (ppm) en volume au cours de l'ère préindustrielle. En 1958, lorsque la surveillance de Mauna Loa a commencé, ils ont atteint 313 ppm. En 2000, ils atteignaient 370 ppm et, à la fin de 2023, 420 ppm, soit plus de 50 % au-dessus du niveau de la fin du XVIII^e siècle (voir figure 2). Remarquez que l'augmentation après 1958 a été ininterrompue : les concentrations annuelles moyennes montrent une augmentation constante qui s'est poursuivie même pendant les années où les émissions mondiales de CO₂ ont temporairement diminué. Même en 2020, lorsque les restrictions du Covid ont réduit les émissions de 2 %, le niveau de Mauna Loa a augmenté de 2,56 ppm.

Cette augmentation (ainsi que les contributions du CH₄ et du N₂O) s'est traduite par un réchauffement planétaire d'environ 1,1 °C par rapport à la moyenne de la fin du XIX^e siècle. Tous les continents ont été touchés. L'augmentation du réchauffement dé-

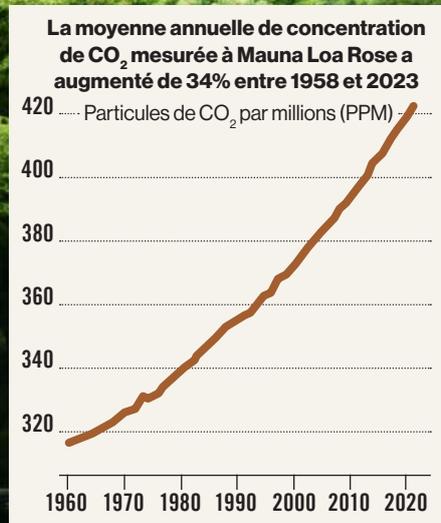
cennal est régulière et les huit années entre 2015 et 2022 ont été les années les plus chaudes enregistrées depuis 1850 (Organisation météorologique et logique mondiale, 2023). Les interactions complexes entre l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère, ainsi que les niveaux inconnus des futures émissions de gaz à effet de serre, font qu'il est impossible de déterminer avec précision le degré de réchauffement planétaire qui se produira d'ici 2050. Cette brève évaluation ne revient pas sur ces incertitudes et ces controverses, qui ont déjà été largement abordées. Il se concentre plutôt sur les réalités, les modalités et les probabilités de réalisation de l'action la plus importante que beaucoup préconisent aujourd'hui pour maintenir l'augmentation de la température moyenne mondiale à un maximum acceptable : l'élimination de la combustion des combustibles fossiles, et plus précisément la décarbonation complète de l'approvisionnement énergétique mondial d'ici à 2050.

La genèse de cet objectif remonte à l'Accord de Paris de 2015 (COP 21) qui stipule que le monde doit « parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et l'absorption par les puits de gaz à effet de serre au cours de la seconde moitié de ce siècle » (CCNUCC, 2015). L'expression désormais courante « net zéro » et l'année 2050 ont été utilisées pour la première fois dans le rapport spécial du GIEC sur un réchauffement planétaire de 1,5 °C en 2018 : afin de limiter le réchauffement à 1,5 °C, les émissions anthropiques nettes de CO₂ doivent « diminuer d'environ 45 % par rapport aux niveaux de 2010 d'ici à 2030... pour atteindre un niveau net zéro vers 2050 » (GIEC, 2018) (voir la figure 3).

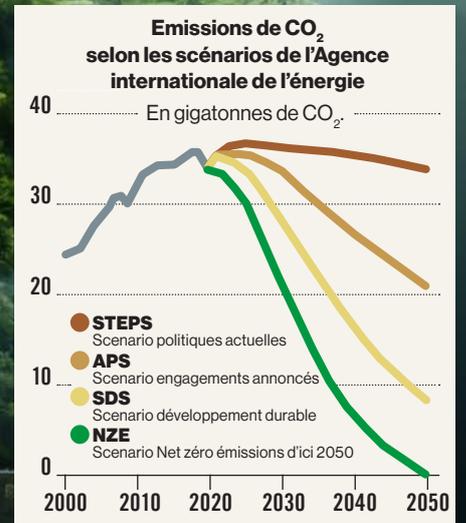
Par Vaclav Smil



Source : Agence internationale de l'énergie 2023



Source : Global Monitoring Laboratory 2023



Source : Agence internationale de l'énergie 2021



Transitions énergétiques

L'objectif de réduire à zéro les émissions anthropiques de CO₂ doit être atteint par une transition énergétique dont la vitesse, l'ampleur et les modalités (techniques, économiques, sociales et politiques) seraient sans précédents dans l'histoire. Je montrerai pourquoi l'accomplissement d'une telle transformation, aussi souhaitable soit-elle, est hautement improbable au cours de la période prescrite. Ce qui est particulièrement clair, c'est que (en l'absence d'une récession économique mondiale prolongée et sans précédent) le monde sera loin de réduire ses émissions de CO₂ liées à l'énergie de 45 % par rapport au niveau de 2010 d'ici 2030. Pour cela, nous devrions réduire les émissions de près de 16 milliards de tonnes entre 2023 et 2030 – ou éliminer presque autant de carbone fossile que les émissions combinées des deux plus grands consommateurs d'énergie, la Chine et les États-Unis.

La combinaison de l'échelle et de la vitesse est le principal facteur qui rend la transition en cours si contraignante. La miniaturisation et la dématérialisation relative sont deux qualités admirées dans une société moderne qui bénéficie des avantages de la microélectronique à semi-conducteurs, mais en termes globaux, la masse sera toujours importante. Lorsque le monde a entamé sa première transition énergétique au cours du XIX^e siècle, il a dû remplacer environ 1,5 milliard de tonnes de bois, principalement coupé et brûlé localement, par du charbon et, après les années 1860, par des hydrocarbures (Smil, 2016). En 2022, le monde a produit près de 8,2 milliards de tonnes de charbon, près de 4,5 milliards de tonnes de pétrole brut et 2,8 milliards de tonnes de gaz naturel, tous extraits très efficacement et pour la plupart de manière très concentrée de grandes mines et d'énormes gisements d'hydrocarbures sur tous les continents. En termes d'utilisations finales de l'énergie et de convertisseurs d'énergie spécifiques, la transition en cours devrait remplacer plus de quatre térawatts (TW) de capacité de production d'électricité actuellement installée dans de grandes centrales au charbon et au gaz par des sources non carbonées ; remplacer près de 1,5 milliard de moteurs à combustion (essence et diesel) dans les véhicules routiers et hors route ; convertir toutes les machines agricoles et de traitement des récoltes (y compris environ 50 millions de tracteurs et plus de 100 millions de pompes d'irrigation) à l'entraînement électrique ou aux combustibles non fossiles ; trouver de nouvelles sources de chaleur, d'air chaud et d'eau chaude utilisées dans une grande variété de processus industriels (de la fonte du fer à la fabrication du ciment et du verre, en passant par les synthèses chimiques et la conservation des aliments) qui consomment actuellement près de

“ Le pétrole n'a commencé à fournir plus de 25 % de tous les combustibles fossiles qu'un siècle après sa première extraction. ”

30 % de toutes les utilisations finales de combustibles fossiles ; remplacer plus d'un demi-milliard de chaudières au gaz naturel qui chauffent actuellement des maisons et des locaux industriels, institutionnels et commerciaux par des pompes à chaleur ou d'autres sources de chaleur ; et trouver de nouveaux moyens d'alimenter près de 120 000 navires de la flotte marchande (vraquiers de minerais, de ciment, d'engrais, de bois et de céréales et porte-conteneurs, dont le plus grand a une capacité de quelque 24 000 unités et fonctionne actuellement essentiellement au fioul lourd et au carburant diesel) et près de 25 000 avions de ligne en activité qui constituent la base du transport mondial à longue distance (alimentés au kérosène) (Hedges and Company, 2023 ; Ener8, 2023 ; CH-Aviation, 2022). À première vue, et même sans effectuer d'analyses techniques et économiques approfondies, cela semble être une tâche impossible étant donné que :

- nous n'avons qu'une seule génération (environ vingt-cinq ans) pour le faire ;
- nous n'avons même pas atteint le pic de la consommation mondiale de carbone fossile ;
- le pic ne sera pas suivi d'un déclin précipité ;
- l'électrification n'a converti, à la fin de 2022, qu'environ 2 % des véhicules de tourisme (plus de 40 millions) en différentes variétés de voitures à batterie, et la décarbonation n'a pas encore touché le transport routier lourd, le transport maritime et l'aviation (AIE, 2023).

Rien de tout cela ne surprendra les étudiants en histoire de l'énergie, car les transitions énergétiques mondiales ont toujours été des affaires de longue haleine.

Le charbon n'a dépassé la combustion du bois qu'en 1900, et sa part dans l'approvisionnement énergétique n'a atteint son maximum qu'au milieu des années 1960. Le pétrole n'a commencé à fournir plus de 25 % de tous les combustibles fossiles qu'à la fin des années 1950, près d'un siècle après sa première extraction commerciale moderne, et le gaz naturel a commencé à contribuer à plus de 25 % de l'approvisionnement en énergie fossile juste avant la fin du xxe siècle, après quelque cent trente ans de développement de l'industrie (Smil, 2016). En outre, même la première grande transition énergétique n'est toujours pas achevée, plus de deux siècles après son commencement. Près de 3 milliards de personnes (en Afrique, en Asie et en Amérique latine) dépendent encore des énergies traditionnelles de la biomasse, principalement pour la cuisine, mais aussi pour le chauffage : le bois de chauffage (et le charbon de bois qui en est issu), la paille et les bouses séchées fournissaient encore environ 5 % de l'énergie primaire mondiale en 2020.

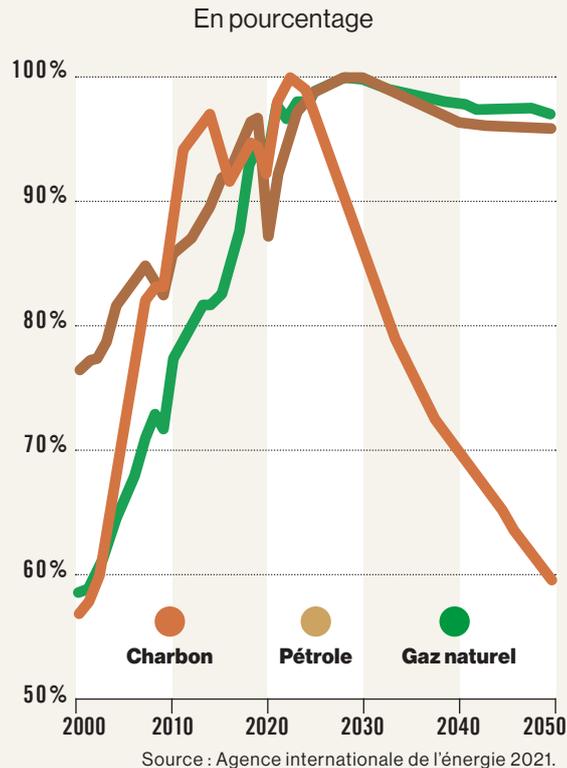
Les perspectives énergétiques mondiales 2023 de l'Agence internationale de l'énergie illustrent à la fois les réalités largement méconnues et les résultats probables de la transition en cours. Le résultat de son scénario basé sur les politiques nationales déclarées (c'est-à-dire sur les politiques déjà adoptées par les différents

États pour atteindre les objectifs de décarbonisation prévus) est qualifié de « *jamais vu auparavant* » parce que chacun des trois combustibles fossiles devrait atteindre un pic d'ici 2030. Le pic des émissions de CO₂ liées à l'énergie devrait être atteint en 2025, puis la demande de combustibles fossiles devrait diminuer en moyenne de trois exajoules par an jusqu'en 2050 (AIE, 2023). Ceux qui se sont contentés de lire les rapports des médias énumérant ces changements et soulignant ce « *tournant* » historique ont eu l'impression qu'un changement imminent et stupéfiant allait se produire – mais ce serait une incompréhension fondamentale du proces-

sus, car les pics de consommation à grande échelle (au niveau mondial et pour les nations peuplées, pas nécessairement pour les petits pays qui peuvent changer plus rapidement) sont suivis par de longues périodes de déclin.

En effet, la figure suivante (voir figure 4), tirée du World Energy Outlook 2023 de l'AIE, aurait ramené les consommateurs des gros titres des médias à la réalité. En 2050, même la consommation de charbon, après un déclin projeté sans précédent, serait encore aussi élevée qu'au début du xxie siècle ; la consommation de pétrole brut et de gaz naturel (qui n'a pas encore atteint son maximum) serait presque aussi élevée (>95 %) qu'en 2030 ; et un déclin régulier laisserait encore la consommation de combustibles fossiles à environ 85 % du niveau actuel (voir figure 4). On est bien sûr très loin des scénarios « *zéro carbone* ».

LES TOURNANTS SELON LE SCÉNARIO « POLITIQUES ACTUELLES »



La nature progressive des transitions énergétiques est une conséquence inévitable du fait qu'aucune d'entre elles n'a été une simple question de remplacement d'une source d'énergie par une autre. Prenons l'exemple d'une analogie courante (mais tout à fait déplacée) avec le téléphone. Nous sommes massivement passés du téléphone fixe au téléphone portable en seulement deux ou trois décennies. Alors pourquoi ne pas se débarrasser des combustibles fossiles sur une échelle de temps tout aussi courte ? S'appuyer sur une telle analogie revient à commettre une grave erreur de catégorie, un sophisme logique qui compare (et confond) un système extraordinairement complexe visant à garantir un approvisionnement mondial en énergie fiable et abordable pour une variété d'utilisations finales de l'énergie avec un seul type d'utilisation.

Les réseaux énergétiques actuels sont complexes, leur mise en place

et leur fonctionnement nécessitent une maintenance et une mise à niveau constantes, et leurs coûts sont considérables, mais ils ne sont qu'un des nombreux éléments qui composent le système énergétique mondial, bien plus complexe encore. C'est pourquoi les transitions énergétiques mondiales sont compliquées, multi-formes, longues et, dans leurs détails, plutôt imprévisibles. Elles nécessitent des changements de système qui impliquent le développement, l'adoption et la mise à l'échelle massive de nouvelles techniques (qu'il s'agisse de l'électrolyse de l'hydrogène vert à grande échelle ou de la multiplication

extensive de petits réacteurs nucléaires de fission modulaires). Ils nécessitent également la construction de nouveaux réseaux d'extraction, de traitement et de distribution (pour produire de grandes quantités de matériaux de base, de métaux, de composés synthétiques et de contrôles automatisés). Tous ces changements nécessitent des décennies d'investissements réguliers et de haut niveau, ainsi que des engagements politiques, afin de produire des changements économiques et sociaux majeurs.

Dans le passé, le remplacement des poêles à bois par des poêles à charbon, des roues à eau et des moulins à vent par des machines à vapeur, des attelages de chevaux par des moteurs diesel et des lampes à huile et à gaz par des lampes électriques nécessitait des infrastructures nouvelles, étendues et compliquées. Elles étaient nécessaires pour extraire (mines de charbon, gisements

de pétrole et de gaz, barrages), préparer (triage et nettoyage du charbon, raffinage du pétrole brut et traitement du gaz naturel), transporter (chemins de fer, pipelines, navires, camions et lignes de transmission à haute tension), et convertir (moteurs à vapeur, turbines à vapeur et à gaz, fours, chaudières, turbogénérateurs, transformateurs et moteurs électriques) de nouvelles formes d'énergie.

La transition énergétique en cours ne nécessite pas seulement un très grand nombre de nouvelles éoliennes et de panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité verte. La production d'énergie renouvelable nécessite également l'extension des lignes de transport à haute tension (câbles aériens et câbles sous-marins à partir des sites éoliens offshore) pour acheminer l'électricité des endroits les plus venteux et les plus ensoleillés vers des villes et des zones industrielles souvent éloignées. Au fur et à mesure que la nouvelle transition énergétique s'accélère, elle aura également besoin de capacités de stockage de l'électricité, telles que des batteries (ou d'autres dispositifs mécaniques, thermiques ou chimiques) suffisamment importantes pour faire face à l'intermittence du rayonnement éolien et solaire ; ce besoin deviendra impératif si ces sources deviennent des générateurs dominants d'électricité et si elles ne sont pas complétées, comme c'est le cas aujourd'hui, par une production nucléaire ou à base de combustibles fossiles ou par un déploiement quasi instantané de turbines à gaz.

En outre, de nombreuses conversions d'énergie finale (allant du transport maritime lourd et de l'aviation commerciale à longue distance à l'industrie chimique qui dépend de matières premières à base de carbone fossile) ne peuvent pas être facilement électrifiées. De plus, nous aurons besoin de quantités substantielles de carbone fossile solide et liquide, même

dans un monde sans carbone, pour le pavage (asphalte) et les lubrifiants industriels et commerciaux. La production de ce que j'ai appelé les quatre piliers de la civilisation moderne – le ciment, le fer, les plastiques et l'ammoniac – dépend aujourd'hui des combustibles fossiles, et leur remplacement par des alternatives nécessitera le développement de nouvelles industries de masse et de réseaux de distribution allant de l'hydrogène vert (produit par électrolyse de l'eau par de l'électricité verte) et de l'éthanol aux nouveaux combustibles synthétiques (Smil, 2022).

Les coûts peuvent atténuer ou aggraver les problèmes liés à la complexité. Si les innovations plus complexes sont moins chères que les méthodes établies, ou si leurs coûts plus élevés sont compensés par une qualité, une efficacité et une commodité accrues, les transitions peuvent se faire rapidement. C'est le cas par exemple de la télévision en noir et blanc par rapport à la télévision en couleur, des moteurs à pistons par rapport aux moteurs à réaction dans l'aviation commerciale à longue distance, des téléphones fixes par rapport aux téléphones mobiles, et des fours à gaz naturel à haut rendement par rapport aux poêles à charbon.

En revanche, les conversions renouvelables présentent les inconvénients inhérents d'une faible densité de puissance et d'une plus grande intermittence, et donc leur coût total (avec un service comparable à l'approvisionnement à la demande et à la fiabilité des convertisseurs de combustibles fossiles) est considérablement plus élevé que le coût

marginal de l'achat et de l'installation de nouveaux panneaux photovoltaïques ou éoliennes (Smil, 2015 ; Sorensen, 2015).

Les différences de coût se sont réduites, mais les dernières comparaisons des coûts nivelés de la production d'électricité aux États-Unis indiquent que le coût global de l'énergie solaire photovoltaïque (avec un facteur de charge de 28 %) mise en service en 2027 ne sera inférieur que de 9 % au coût d'une turbine à gaz à cycle combiné (TGCC, facteur de capacité de 85 %), et que le coût global de l'énergie éolienne terrestre sera le même, mais que celui de l'énergie éolienne en mer avec stockage par batterie sera encore plus de trois fois plus élevé (US EIA, 2022). La promesse d'une production nucléaire à faible coût n'est toujours qu'une promesse. D'ici 2027, la production nucléaire avancée devrait encore coûter au moins deux fois plus cher que la TGCC, les voitures électriques non subventionnées restent plus chères que les véhicules à essence comparables, et le coût de l'hydrogène vert, qui n'en est qu'à ses premiers stades de développement, reste incertain. La transition en cours repose donc sur des techniques qui ne sont pas (encore) de manière convaincante et générale moins chères, plus fiables et plus nombreuses que la conversion qu'elles remplacent. En outre, certaines d'entre elles (surtout les nouveaux réacteurs et le stockage de l'électricité à grande échelle) nécessiteront un développement supplémentaire très coûteux.

Par Vaclav Smil

“ Si les innovations plus complexes sont moins chères que les méthodes établies, les transitions peuvent se faire rapidement. ”



Le bilan à ce jour

La façon la plus évidente de commencer à évaluer les progrès de la transition énergétique requise est d'examiner ce qui a été accompli au cours de la dernière génération, lorsque les préoccupations relatives à la décarbonisation mondiale ont pris une nouvelle ampleur et un nouveau caractère d'urgence. Contrairement à l'impression générale, il n'y a pas eu de décarbonisation absolue à l'échelle mondiale.

En fait, c'est tout le contraire qui s'est produit. Le monde est devenu beaucoup plus dépendant du carbone fossile (même si sa part relative a légèrement diminué). Nous sommes maintenant à mi-chemin entre 1997 (il y a vingt-sept ans), lorsque les délégués de près de 200 pays se sont réunis à Kyoto pour convenir d'engagements visant à limiter les émissions de gaz à effet de serre, et 2050 ; il reste vingt-sept ans au monde pour atteindre l'objectif de décarbonisation du système énergétique mondial, un fossé considérable si l'on en juge par les progrès accomplis jusqu'à présent, ou par leur absence.

Les chiffres sont clairs. Tout ce que nous avons réussi à faire à mi-parcours de la grande transition énergétique mondiale prévue est une légère baisse relative de la part des combustibles fossiles dans la consommation mondiale d'énergie primaire – de près de 86 % en 1997 à environ 82 % en 2022. Mais ce recul relatif marginal s'est accompagné d'une augmentation absolue massive de la combustion de combustibles fossiles : en 2022, le monde a consommé près de 55 % d'énergie enfermée dans du carbone fossile de plus qu'en 1997 (voir figure 5) (Energy Institute, 2023).

Les réductions absolues des émissions de carbone qui ont eu lieu dans les grandes économies telles que l'UE (-23 %) et les États-Unis (-9 %) ont été largement dépassées par les augmentations absolues massives des émissions des deux plus grandes nations en voie d'industrialisation, la Chine (dont les émissions ont été multipliées par 3,3) et l'Inde (dont les émissions ont été multipliées par 3).

Les émissions ont également augmenté chez les producteurs d'hydrocarbures du Moyen-Orient (l'Arabie saoudite a vu ses émissions multipliées par 2,3) et chez d'autres petits émetteurs.

La conclusion est sans équivoque :

en 2023, après un quart de siècle de transition énergétique ciblée, il n'y a pas eu de décarbonisation absolue de l'approvisionnement énergétique à l'échelle mondiale. C'est tout le contraire. Au cours de ce quart de siècle, le monde a considérablement accru sa dépendance à l'égard du carbone fossile. Il s'agit là d'un point fondamental : les changements de la température atmosphérique moyenne mondiale répondent aux changements de la charge atmosphérique totale de gaz absorbant les radiations, et non à des baisses locales ou nationales.

Entre 1997 et 2022, les émissions annuelles de CO₂ provenant du secteur de l'énergie fossile (CO₂ provenant de la combustion et du traitement des combustibles, l'équivalent CO₂ du CH₄ provenant de l'extraction, du brûlage à la torche et des fuites dans les pipelines) sont passées d'environ 25,5 milliards de tonnes d'équivalent dioxyde de

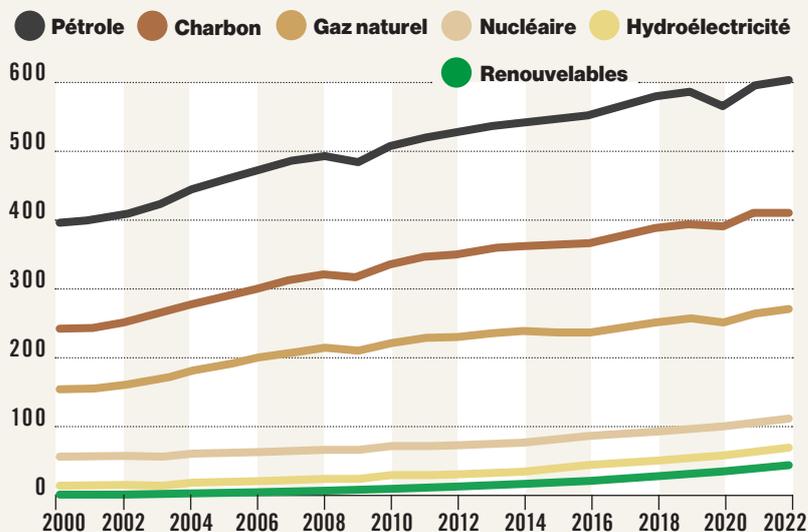
carbone (CO₂e) à environ 39,3 milliards de tonnes (une augmentation de 54 %) (Energy Institute, 2023c).

En raison d'échanges complexes au sein du cycle biogéochimique mondial du carbone, seule une fraction de ces émissions anthropiques reste dans l'atmosphère. La majeure partie est absorbée par les océans et la végétation, ce qui entraîne une augmentation de la concentration du gaz dans l'eau des océans (et donc son acidification) et un verdissement de la biosphère (expansion de la couverture végétale). Par conséquent, la charge atmosphérique totale de CO₂ (y compris les émissions d'autres secteurs) est passée de 2,85 billions de tonnes en 1997 à 3,27 billions de tonnes en 2022, ce qui correspond à l'augmentation de la concentration moyenne de Mauna Loa de 364 ppm à près de 420 parties par million (soit une augmentation de plus de 15 %).

Par Vaclav Smil

LA DÉPENDANCE MONDIALE AUX ÉNERGIES FOSSILES A CONTINUÉ À AUGMENTER AU XXI^{ÈME} SIÈCLE

En Exajoules



Source : Energy Institute 2023



Ce qu'il faudrait faire pour inverser la tendance en matière d'émissions

Compte tenu de ces réalités, quelles sont les chances non seulement d'inverser de manière décisive la tendance passée en matière d'émissions et d'entamer une décarbonisation mondiale, mais aussi d'éliminer la production de carbone à partir de la combustion de combustibles fossiles d'ici à 2050 ?

Après avoir réduit notre dépendance relative à l'égard des combustibles fossiles de seulement 4 % au cours de la première moitié de la période post-Kyoto prescrite, même si les émissions de CO₂ n'augmentaient plus, nous devrions la réduire de 82 % d'ici à 2050.

En termes absolus, l'élimination de la production de carbone à partir de la combustion de carburants fossiles signifierait une réduction des émissions liées à l'énergie de 1,45 milliard de tonnes par an en moyenne (par rapport à l'augmentation annuelle moyenne des émissions de près d'un demi-milliard de tonnes depuis 1995). Cela reviendrait à éliminer chaque année l'équivalent de deux années d'émissions saoudiennes, soit près de la moitié du total de l'Inde en 2022. Il est évident que tout report de ces réductions annuelles nécessiterait des réductions plus importantes au cours des dernières années de la période restante.

Une autre façon révélatrice d'appréhender l'ampleur de ce défi est d'examiner les réductions qui devraient être réalisées par les économies du G20 pour atteindre les objectifs intermédiaires de 2030 : pour presque toutes les grandes économies, cela signifierait généralement une réduction de moitié des émissions de 2020, avec des réductions de 45 % pour le Canada et de 46 % pour l'Arabie saoudite, de 55 % pour l'UE, de 56 % pour les États-Unis et de 63 % pour la Chine (McKinsey, 2023). Seul un effondrement économique sans précédent pourrait entraîner de telles réductions au cours des sept prochaines années.

Après avoir augmenté notre dépendance aux combustibles fossiles de près de 180 exajoules depuis 1997, nous devrions éliminer près de 500 EJ (soit l'équivalent d'environ 12 milliards de tonnes de pétrole brut) pour parvenir à un bilan carbone nul en 2050, même si la

consommation n'augmentait plus. Et les énergies non carbonées devraient non seulement remplacer tous les combustibles carbonés actuels, mais aussi couvrir toute l'augmentation supplémentaire de la consommation mondiale d'énergie prévue d'ici à 2050. Les prévisions à long terme diffèrent, mais la demande mondiale d'énergie (réduite par des rendements de conversion plus élevés) devrait augmenter d'au moins 10 à 15 % d'ici à 2050. Dans un monde sans carbone, ces besoins devraient être satisfaits par une combinaison d'électricité produite à partir de sources renouvelables, d'hydrogène vert et de carburants verts.

Je dois souligner que la transition énergétique en cours ne remplacera pas la consommation actuelle de combustibles fossiles et ses augmentations futures par une quantité équivalente d'énergies non fossiles. Cela s'explique principalement par le fait que l'électrification accrue du système énergétique mondial basée sur les flux renouvelables augmentera l'efficacité globale de l'utilisation de l'énergie en réduisant les pertes de conversion (Pahud et al., 2023). Les réductions spécifiques varieront. Les véhicules électriques offrent des gains d'efficacité particulièrement importants. Ils peuvent parcourir plus de quatre fois plus de distance avec une quantité d'énergie donnée que les véhicules à essence (Singer et al., 2023). En revanche, il n'y a

pas de perspectives immédiates pour l'électrification des transports maritimes et aériens intercontinentaux. Les gains d'efficacité liés à l'électrification des processus industriels seraient très variables, et tous ne pourraient pas être électrifiés. Et les gains seront négligeables pour le chauffage des locaux, avec un rendement de 100 % pour le chauffage par résistance électrique, contre 93 à 99 % pour les chaudières à gaz modernes (Lennox, 2024). Bien entendu, les pompes à chaleur pourraient apporter des gains d'efficacité significatifs, mais leur coefficient de performance devrait être relativement élevé pour être compétitif en termes de coûts. Les éventuelles réductions globales de la consommation d'énergie dues à l'électrification dépendront également de la part (encore inconnue) de la production solaire, éolienne et nucléaire, des biocarburants et de l'hydrogène vert.

La production d'électricité nucléaire n'est efficace qu'à 33 % (et aucune percée imminente n'est attendue), certains biocarburants ont un coût énergétique élevé, et un kilogramme d'hydrogène équivaut à environ 33 kWh d'électricité, mais sa production par électrolyse de l'eau nécessite environ 50 kWh/kg (US EIA, 2023a ; Marouani et al., 2023). Le nouveau système énergétique mondial non fossile serait globalement moins gaspilleur, mais il reste à savoir dans quelle mesure.

Par Vaclav Smil

“ La transition énergétique en cours ne remplacera pas la consommation actuelle de combustibles fossiles et ses augmentations futures par une quantité équivalente d'énergies non fossiles. ”

Les tâches à accomplir : électricité et hydrogène bas-carbone

L'hydroélectricité fournit aujourd'hui environ 15 % de la production mondiale d'électricité, suivie par la fission nucléaire, qui en génère environ 10 % (Energy Institute, 2023). Les nouvelles énergies renouvelables, l'éolien et le solaire, ont connu une croissance rapide au cours des trois dernières décennies et, en 2022, elles représentaient 12 % de la production totale d'électricité, soit toujours moins que le total généré par les deux anciennes solutions sans carbone.

En outre, l'électricité primaire bas-carbone (hydraulique, nucléaire, éolienne, solaire et une petite contribution des centrales géothermiques) ne représentait qu'environ 18 % de la consommation mondiale d'énergie primaire, ce qui signifie que les combustibles fossiles représentaient encore environ 82 % de l'approvisionnement mondial en énergie primaire en 2022. Ces chiffres surprennent les personnes peu familiarisées avec les statistiques mondiales de l'énergie. Les annonces incessantes de nouveaux parcs éoliens et la vue de vastes zones couvertes de cellules photovoltaïques font croire à la plupart des gens que nous sommes allés beaucoup plus loin dans l'électrification renouvelable.

L'ampleur finale de la tâche consistant à passer à une production d'électricité sans carbone dépend des contributions encore inconnues des autres méthodes de production et de l'étendue et des modes d'électrification à terme. Le sort de la fission est peut-être la principale incertitude. Malgré des décennies de promesses concernant l'arrivée imminente d'un grand nombre de petits réacteurs modulaires (SMR, jusqu'à 300 MW), qui permettraient de relancer la production stagnante d'électricité par fission nucléaire, et malgré quelque 80 conceptions différentes, en 2023, pas un seul SMR n'était en service dans les pays occidentaux. La Chine ne

possède qu'un seul prototype d'essai (AIEA, 2023). De même, les partisans de la production géothermique soulignent son énorme potentiel, mais les progrès pratiques ont été lents dans ce domaine également.

Le besoin éventuel d'électricité produite à partir de sources renouvelables dépendra de l'ampleur des utilisations directes et indirectes de l'électricité. Le choix est illustré dans le domaine des transports par l'opposition entre Tesla et Toyota : quelles parts de marché les véhicules à batterie et les véhicules à pile à combustible (dont l'hydrogène est produit par électrolyse de l'eau) finiront-ils par s'approprier ? Plus loin sur la voie de la transition, les avions utiliseront-ils des batteries beaucoup plus performantes (mais actuellement indisponibles à haute densité de puissance), brûleront-ils directement de l'hydrogène ou utiliseront-ils des piles à combustible pour la propulsion électrique ? Ce qui est clair, c'est que l'ajout total d'électricité sans carbone devra aller bien au-delà du simple remplacement de la production actuelle à base de combustibles fossiles, qui représente environ 62 % du total de plus de 29 quadrillions de wattheures (PWh) en 2022. La demande d'électricité continuera d'augmenter : l'Agence internationale de l'énergie prévoit une croissance annuelle de 3,3 % jusqu'en

2050, ce qui multiplierait par près de 2,5 le total de 2022 pour atteindre un peu plus de 72 PWh.

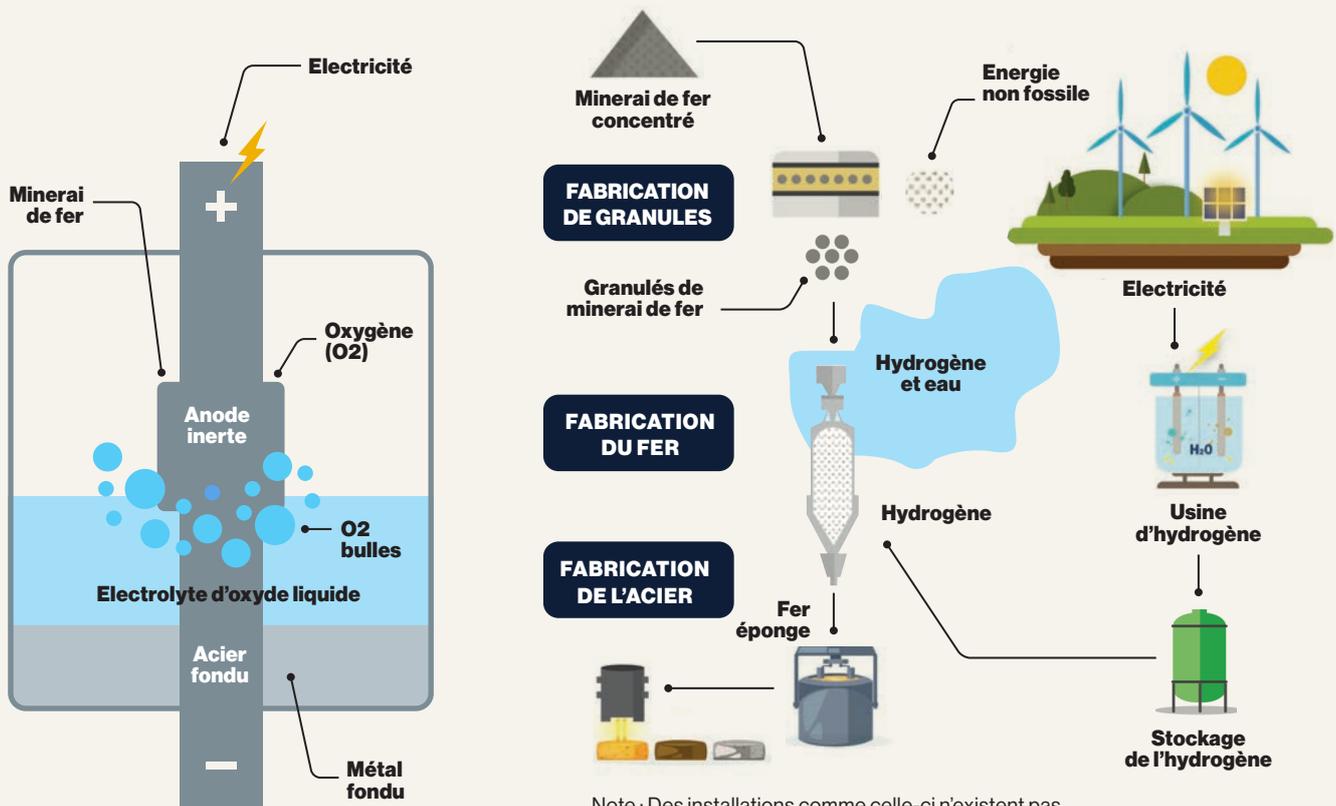
Même si l'hydroélectricité et le nucléaire devaient couvrir 20 % de ce total, l'éolien et le solaire devraient atteindre environ 58 PWh en 2050, soit environ 17 fois leur production de 2022 et presque exactement le double de la production d'électricité de 2022, toutes sources confondues. En outre, leur intermittence inhérente nécessiterait de nouveaux investissements substantiels dans le stockage à grande échelle et la transmission à haute tension pour garantir un approvisionnement interrompu. Cela nécessiterait une croissance annuelle soutenue d'environ 10,5 %, un taux qui semble tout à fait gérable comparé à la croissance annuelle réelle d'environ 29 % pour le solaire et 15 % pour l'éolien entre 2012 et 2022, mais qui sera, comme dans le cas de toute croissance à long terme, plus difficile à maintenir à mesure que les totaux annuels absolus deviendront un ordre de grandeur plus élevé.

Outre les tendances à l'électrification déjà en cours (voitures particulières, chauffage, certains processus industriels), d'importantes parts de production non carbonée seront nécessaires pour électrifier, dans toute la mesure du possible, toutes les industries qui dépendent aujourd'hui du charbon, du pétrole et du gaz. Tandis que la poursuite de

“ Le besoin éventuel d'électricité produite à partir de sources renouvelables dépendra de l'ampleur des utilisations directes et indirectes de l'électricité. ”



ELECTROLYSE DU MINERAI DE FER ET SA RÉDUCTION AVEC DE L'HYDROGÈNE VERT (DÉCARBONÉ)



Note : Des installations comme celle-ci n'existent pas encore et devront produire plus de 1,5 milliard de tonnes.

Source : Iberdrola

l'expansion des générations éolienne et solaire repose sur l'intensification de techniques de conversion bien connues et éprouvées, la décarbonisation de nombreux processus industriels nécessitera la mise au point de nouveaux procédés, dont il faudra d'abord tester les prototypes avant de les déployer commercialement dans le monde entier. Deux exemples clés illustrent les défis posés par ces efforts sans précédent. L'acier est, et restera, le métal dominant de la civilisation moderne, indispensable à toutes les infrastructures, au logement, au transport, à l'agriculture et à la production industrielle (Smil, 2016). Environ 30 % de l'acier produit dans le monde est issu du recyclage de la ferraille, dans des fours électriques à arc (FEA), et cet effort peut donc être entièrement alimenté par l'électricité verte. Mais 70 % de l'acier

mondial provient de convertisseurs basiques à oxygène (BOF) utilisant de la fonte coulée dans des hauts fourneaux (BF) alimentés par du coke (fabriqué à partir de charbon à coke), de la poussière de charbon et du gaz naturel. En 2022, la production de cet acier primaire BF-BOF a atteint 1,4 milliard de tonnes. Selon les prévisions, pas moins de 2,6 milliards de tonnes de ce métal seront nécessaires en 2050. Même en augmentant la part de l'acier FEA à 35 %, la demande nécessiterait environ 1,7 milliard de tonnes de fer vert (World Steel Association, 2023 ; ArcelorMittal, 2023). Au lieu de réduire les minerais de fer avec du carbone (et d'émettre du CO₂), dans un monde sans carbone, nous devrions les réduire avec de l'hydrogène ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O}$). Cela signifie que d'ici 2050, la production annuelle de 1,7 milliard

de tonnes d'acier vert nécessiterait environ 91 millions de tonnes d'hydrogène vert (voir figure 6). L'ammoniac est un produit encore plus important : environ 85 % de sa production annuelle est utilisée pour fabriquer des engrais azotés synthétiques sans lesquels environ la moitié de la population mondiale actuelle ne pourrait survivre (Smil, 2022). L'ammoniac est aujourd'hui synthétisé à partir d'azote prélevé dans l'air et d'hydrogène produit par une réaction de transformation à partir de gaz naturel, de charbon et d'hydrocarbures liquides ($\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$), moins de 5 % provenant de l'électrolyse de l'eau (hydrogène vert). En 2022, la production annuelle d'ammoniac a atteint environ 150 millions de tonnes et selon les prévisions, il faudra au moins 200 millions de tonnes d'ici 2050. Le processus de synthèse de l'ammoniac

Haber-Bosch, sans carbone fossile, nécessiterait environ 44 millions de tonnes d'hydrogène vert d'ici 2050. Ces deux processus clés, la fabrication de l'acier et de l'ammoniac, nécessiteraient une capacité de production annuelle d'environ 135 millions de tonnes d'hydrogène vert d'ici à 2050. Toutefois, en fonction des besoins supplémentaires pour le transport et le chauffage, pour les industries (de la verrerie à la conservation des aliments) et pour la production d'électricité de pointe, la demande totale d'hydrogène vert pourrait facilement atteindre 500 millions de tonnes d'ici à 2050. La production électrolytique d'hydrogène vert nécessite environ 50 MWh/tonne : la production de 500 millions de tonnes d'hydrogène vert d'ici 2050 nécessiterait donc environ 25 PWh d'électricité verte, ce qui équivaut à environ 86 % de la consommation mondiale d'électricité en 2022 (IRENA, 2023). Cette électricité produite à partir de sources renouvelables serait consacrée à la seule production d'hydrogène vert ! À quelle vitesse pouvons-nous y arriver ? En 2023, une étude de l'AIE a estimé qu'en 2030, la production mondiale d'hydrogène vert pourrait atteindre 38 Mt, mais seulement si tous les projets prévus pour le traitement électrolytique (ou à partir de combustibles fossiles avec capture du carbone) étaient menés à bien (AIE, 2023). Mais la moitié de cette production potentielle provient de projets qui font encore l'objet d'études de faisabilité ou qui en sont aux premiers stades de la réalisation, tandis que les projets en cours de construction ou ceux qui ont fait l'objet d'une décision finale d'investissement ne représentent que 4 % de l'ensemble des annonces. Les objectifs de production de HyDeal España sont un excellent exemple de cette situation incertaine. En 2021, l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) a salué l'annonce

par HyDeal España du « *plus grand giga-projet d'hydrogène renouvelable au monde* ». Puis, en septembre 2023, l'entreprise a plus que réduit de moitié son objectif 2030 pour la capacité d'électrolyse, passant de 7,4 GW à 3,3 GW, tout en annonçant un nouvel objectif de production de 150 000 tonnes d'hydrogène vert d'ici 2031 (Fertiberia, 2022 ; HyDeal, Non daté ; Biogradlija, 2023, 15 septembre). Et le label « *giga* » doit être mis en perspective.

Une production annuelle de 150 000 tonnes d'hydrogène vert suffirait à synthétiser 700 000 tonnes d'ammoniac, ce qui fournirait environ 0,65 % de l'azote actuellement épanché chaque année sur les cultures mondiales. Inversement, cela signifie que nous aurions besoin de plus de 150 projets giga de taille égale pour couvrir la demande mondiale actuelle du macronutriment le plus important pour les plantes.

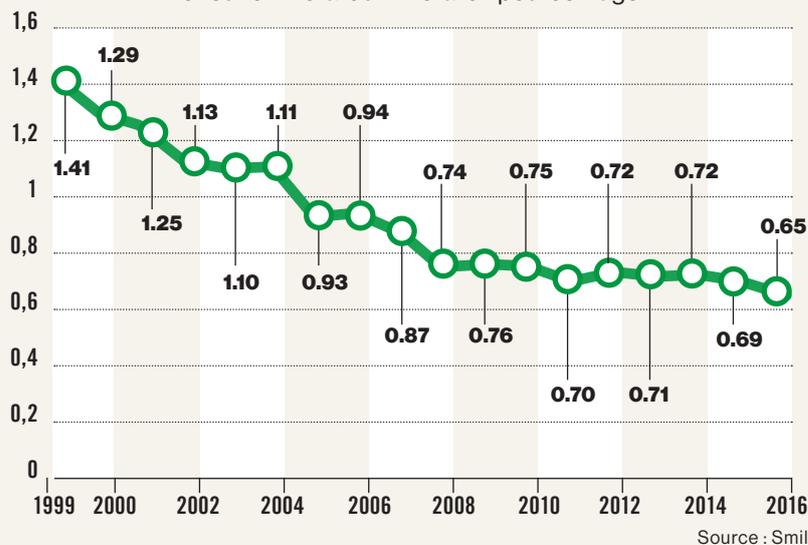
En ce qui concerne l'acier vert, la première aciérie fondant du minerai de fer avec de l'hydrogène produit à

partir d'électricité renouvelable est actuellement en construction dans le nord de la Suède. L'objectif est de produire 1 Mt d'acier en 2026, puis de passer à 5 Mt d'ici 2030 (Jones, 2023, 22 février). Une production annuelle de 1 Mt équivaut à 0,07 % de la production mondiale d'acier primaire en 2022. Pour que tout l'acier primaire (1,7 Gt) soit vert d'ici 2050, le monde devrait ouvrir 340 usines de type Boden (à raison de 5 Mt/an chacune) entre 2030 et 2050. Cela représente une usine toutes les trois semaines pendant cette période de vingt ans, de préférence située à proximité d'usines d'électrolyse de l'hydrogène vert et d'usines produisant du fer en boulettes ou en briquettes sans aucun combustible fossile.

Ce rythme de construction des usines d'hydrogène et d'acier illustre un autre facteur fondamental susceptible d'affecter la transition énergétique mondiale en cours : chacun de ses composants générera une demande sans précédent de matériaux et le défi est rendu plus difficile à la fois par les

DÉCLIN DE LA QUALITÉ DES RESSOURCES EN CUIVRE DU CHILI ENTRE 1999 ET 2016

Teneur en métal du minerai en pourcentage.



Source : Smil

“ La transition énergétique en cours ne remplacera pas la consommation actuelle de combustibles fossiles et ses augmentations futures par une quantité équivalente d'énergies non fossiles. ”

intensités matérielles plus élevées de certaines nouvelles techniques et par l'accès compliqué à de nombreuses ressources essentielles (Smil, 2023). Les éoliennes sont peut-être la meilleure illustration de la première réalité. Tandis que les turbines à gaz – les principaux générateurs d'électricité à la demande d'aujourd'hui – sont des machines très efficaces (>60 %) et compactes qui nécessitent moins de 10 tonnes de matériaux par MW installé, et pas plus de 30 t/MW si l'on ajoute toutes les structures associées, les grandes turbines éoliennes nécessitent généralement environ 500 t/MW de matériaux (Carrara, Alves Dias, Plazzotta et Pavel, 2020). Le béton armé pour les fondations domine, suivi par l'acier pour les grandes tours, les résines époxy, le balsa et les fibres de carbone pour les pales, les plastiques, le cuivre, l'aluminium, les céramiques pour la nacelle, et deux métaux rares, le néodyme et le praséodyme, pour les aimants permanents.

Les matériaux pour les véhicules électriques entrent dans les deux catégories de préoccupations. Un véhicule électrique typique contient plus de cinq fois la quantité de cuivre (80 contre 15 kg) d'un moteur de voiture à combustion interne. Le remplacement des 1,35 milliard de véhicules légers à essence et diesel actuels par des VE et l'approvisionnement du marché élargi (estimé à 2,2 milliards de voitures d'ici 2050) nécessiteraient donc près de 150 millions de tonnes de cuivre supplémentaires au cours des vingt-sept prochaines années. Cela équivaut à plus de sept ans d'ex-

traction annuelle actuelle de cuivre pour toutes les nombreuses utilisations industrielles et commerciales du métal (EIA, 2021, 26 octobre). En outre, l'AIE estime que, par rapport à 2020, l'adoption des VE d'ici 2040 nécessiterait plus de 40 fois plus de lithium que ce qui est actuellement extrait, et jusqu'à 25 fois plus de graphite, de cobalt et de nickel (AIE, 2021). La demande cumulée de matériaux pour parvenir à une décarbonisation totale d'ici 2050 a été estimée à environ 5 milliards de tonnes pour l'acier, près d'un milliard de tonnes pour l'aluminium et plus de 600 millions de tonnes pour le cuivre (pour ne citer que les trois éléments les plus importants). Ces besoins massifs en minerais entraînent non seulement des préoccupations techniques et financières, mais aussi des implications environnementales et politiques (Energy Transitions Commission, 2023 ; Sonter, Maron, Bull, et al., 2023).

Le cuivre offre un exemple frappant de ces externalités environnementales. La teneur en métal des minerais de cuivre exploités au Chili, première source mondiale de ce métal, est passée de 1,41 % en 1999 à 0,6 % en 2023, et une nouvelle détérioration de la qualité est inévitable (voir figure 7) (Lazenby, 2018, 19 novembre ; Jamasmie, 2018, 25 avril ; AIE, 2021). Avec une richesse moyenne de 0,6 %, l'extraction de 600 millions de tonnes de métaux supplémentaires nécessiterait l'enlèvement, le traitement et le dépôt de près de 100 milliards de tonnes de stériles (déblais miniers et de traitement), soit environ deux fois

plus que le total annuel actuel des matériaux extraits dans le monde, y compris la biomasse récoltée, tous les combustibles fossiles, les minerais et les minéraux industriels, et tous les matériaux de construction en vrac.

L'extraction et la mise en décharge de masses aussi énormes de déchets auraient un coût énergétique et environnemental très élevé, car elles éloignent encore plus les nouvelles utilisations d'énergie, supposées vertes, de l'objectif d'un recyclage maximal des matériaux. En outre, la production de cuivre est dominée par quelques pays seulement (Chili, Pérou, Chine et Congo), et la Chine raffine à elle seule 40 % de l'offre mondiale. La Chine traite encore plus d'autres minéraux nécessaires à la conversion en énergie verte : près de 60 % du lithium, 65 % du cobalt et près de 90 % des terres rares (AIE, 2021 ; Castillo et Purdy, 2022). La mainmise de l'OPEP sur le pétrole brut (qui représente aujourd'hui 40 % de la production mondiale) est donc relativement limitée !

En outre, lorsque des pays allant du Canada à l'Allemagne se trouvent dans l'impossibilité de construire suffisamment de logements de base pour leurs populations, il est évident que toute installation accélérée de projets et d'infrastructures d'énergie verte sera limitée par des pénuries de main-d'œuvre expérimentée.

L'Allemagne, grâce à son *Energiewende* (révolution énergétique), est le leader de l'UE dans la poursuite de l'écologie et elle est déjà affectée par ce problème. En 2023, le pays manquait d'environ 216 000 travailleurs qualifiés pour développer l'énergie solaire et éolienne, et l'installation désormais obligatoire de pompes à chaleur a besoin de 80 000 techniciens supplémentaires (KOFA, 2022 ; Smarter Europe, 2023). De même, les États-Unis constatent que la pénurie de main-d'œuvre ralentira tous les plans radicaux qu'ils ont pour les transitions énergétiques vertes (Colman, 2023, 27 février).

Par Vaclav Smil

Coûts, politique et demande

Nous ne connaissons ni l'ampleur ni la part des énergies spécifiques qui permettraient au monde sans carbone de devenir une réalité, ni l'étendue de leurs infrastructures mondiales. Ces réalités ne peuvent être déterminées des décennies à l'avance ; elles se formeront progressivement et, dans une large mesure, de manière imprévisible. C'est pourquoi toute estimation des coûts globaux est sujette à caution.

Nous devons également interpréter correctement la tendance à la baisse des coûts des capacités éoliennes et solaires nouvellement installées. Comme c'est souvent le cas pour la plupart des nouvelles techniques de conversion faisant l'objet d'une commercialisation à grande échelle, ces baisses par unité de capacité installée ont été substantielles, mais on ne peut pas s'attendre à ce qu'elles se poursuivent au cours du prochain quart de siècle à des taux similaires à ceux enregistrés depuis l'an 2000. Plus important encore, ces deux modes de production renouvelables et intermittents ont besoin de moyens de production de secours lorsque la nuit, les nuages et des vents trop faibles ou trop forts réduisent considérablement leur potentiel (BloombergNEF, 2023, 7 juin).

Tant que le solaire et l'éolien ne représentent qu'une part relativement faible de la production totale d'électricité, leur caractère intermittent est facilement couvert par les centrales au charbon ou nucléaires de base existantes, par des turbines à gaz disponibles quasi instantanément ou par des importations en provenance des pays voisins. Lorsque les sources intermittentes deviendront dominantes et que toutes les turbines à gaz auront disparu, elles nécessiteront soit de vastes interconnexions à haute tension pour acheminer l'électricité depuis des régions plus éloignées, soit d'importantes capacités de stockage de l'électricité à plus long terme.

La construction des lignes à haute tension indispensables a notoirement pris du retard par rapport aux

dates d'achèvement prévues (pour des raisons allant des oppositions locales farouches au coût élevé des nouvelles liaisons), que ce soit aux États-Unis (de l'intérieur vers les côtes) ou en Allemagne (du nord vers le sud). Entretemps, l'AIE a estimé que pour atteindre les objectifs mondiaux de décarbonisation, il faudrait ajouter ou rénover plus de 80 millions de kilomètres de réseaux électriques d'ici à 2040. C'est l'équivalent de l'ensemble du réseau mondial existant en 2023 et cela suppose une nouvelle mobilisation massive d'acier, d'aluminium, de cuivre et de ciment (Appunn, 2021, 29 avril ; AIE, 2023).

Jusqu'à présent, seul le pompage-turbinage hydraulique (qui nécessite une configuration spécifique du terrain et qui est impossible dans les basses terres) peut fournir un gigawatt d'électricité pendant plusieurs heures consécutives.

Mais les mégapoles des années 2040 électrifiées par des énergies renouvelables en Asie pourraient avoir besoin (pendant un jour de typhon) d'un stockage de plusieurs gigawatts (5 à 20 GW) pendant dix à vingt heures (jusqu'à 400 GWh), alors que le plus grand stockage d'énergie par batterie lithium-ion (Li-ion) d'aujourd'hui (Moss Landing en Californie) a une capacité de 750 MW/3 GWh, soit deux ordres de grandeur plus faibles. Il est évident que les coûts de ces dispositifs de transmission ou de stockage de secours nécessaires devront être ajoutés au coût des éoliennes et des panneaux photovoltaïques dans tous les systèmes dominés par une production intermittente.

Une autre catégorie d'erreur concernant les coûts consiste à espérer que la transition énergétique mondiale vers le zéro carbone fossile peut être réalisée en s'engageant dans un effort et un coût équivalents à ceux du développement ciblé et dédié si bien illustré par la construction des premières bombes nucléaires (le projet Manhattan) ou l'envoi d'hommes sur la Lune (le projet Apollo). Nous disposons de données complètes sur le coût de ces deux projets et, après conversion en dollars de 2022, ils apparaissent, dans la perspective des dépenses des années 2020, comme d'extraordinaires aubaines. Le projet Manhattan (1943-1945) n'a coûté que 33 milliards de dollars (en dollars de 2022), soit 0,3 % du PIB pour ces années, tandis que le projet Apollo (1961-1972) a coûté 207 milliards de dollars (en dollars de 2022), soit 0,2 % du PIB pour ces douze années (Smil, 2022).

Personne n'est en mesure d'offrir une estimation fiable du coût final d'une transition énergétique mondiale d'ici 2050, bien qu'un total récent (et presque certainement très conservateur) suggéré par le Global Institute de McKinsey montre clairement que comparer cet effort à n'importe quel ancien projet dédié financé par le gouvernement est une autre grave erreur de catégorie. Leur estimation de 275 000 milliards de dollars entre 2021 et 2050 correspond à 9 200 milliards de dollars par an. Par rapport au PIB mondial de 101 000 milliards de dollars en 2022, cela implique une dépense annuelle de l'ordre de 10 % du produit économique mondial total pendant

“ La transition énergétique en cours ne remplacera pas la consommation actuelle de combustibles fossiles et ses augmentations futures par une quantité équivalente d'énergies non fossiles. ”

trois décennies, plutôt que de 0,2 ou 0,3 % pendant quelques années (McKinsey and Company, 2022 ; Banque mondiale, 2023).

En réalité, le fardeau réel serait bien plus lourd, et ce pour deux raisons. Premièrement, on ne peut s'attendre à ce que les pays à faible revenu puissent supporter un tel détournement de leurs ressources limitées et, par conséquent, cette entreprise mondiale ne peut réussir que si les pays à revenu élevé dépensent chaque année des sommes équivalant à 15 à 20 % de leur PIB. Plus important encore, cet ultime projet de transformation mondiale serait confronté à d'énormes dépassements de coûts.

Comme le montre l'étude la plus complète au monde sur les dépassements de coûts (plus de 16 000 projets dans 16 pays et dans 20 catégories, des aéroports aux centrales nucléaires), 91,5 % des projets d'une valeur supérieure à 1 milliard de dollars ont dépassé l'estimation initiale, le dépassement moyen étant de 62 % (Flyvbjerg et Gardner, 2023). L'application d'une correction de 60 % porterait l'estimation de McKinsey du coût de la décarbonation mondiale à 440 000 milliards de dollars, soit près de 15 000 milliards de dollars par an pendant trois décennies, ce qui obligerait les économies riches à consacrer 20 à 25 % de leur PIB annuel à la transition.

Les États-Unis (et la Russie) n'ont dépensé qu'une seule fois dans l'histoire une part plus importante de leur produit économique an-

nuel, et ils l'ont fait pendant moins de cinq ans lorsqu'ils ont dû gagner la Seconde Guerre mondiale. Y a-t-il un pays qui envisage sérieusement de prendre des engagements similaires, mais qui durent maintenant des décennies ?

En 2024, les implications politiques et les complications liées à l'élimination des émissions de carbone d'ici 2050 sont évidentes. Le réchauffement de la planète est un problème mondial et la décarbonation ne peut se faire sans une participation mondiale, la majeure partie du fardeau étant supportée par un petit groupe de grands émetteurs. La Chine est aujourd'hui responsable de 31 % des émissions mondiales dues à la consommation d'énergie, les États-Unis de 14 %, l'UE de 11 %, l'Inde de 8 %, la Russie de 4 % et l'Arabie saoudite et l'Indonésie d'environ 2 % chacune. Quelles sont les chances que ces sept grands pays avancent harmonieusement et résolument au cours des vingt-sept prochaines années vers l'objectif commun de zéro carbone d'ici 2050 ?

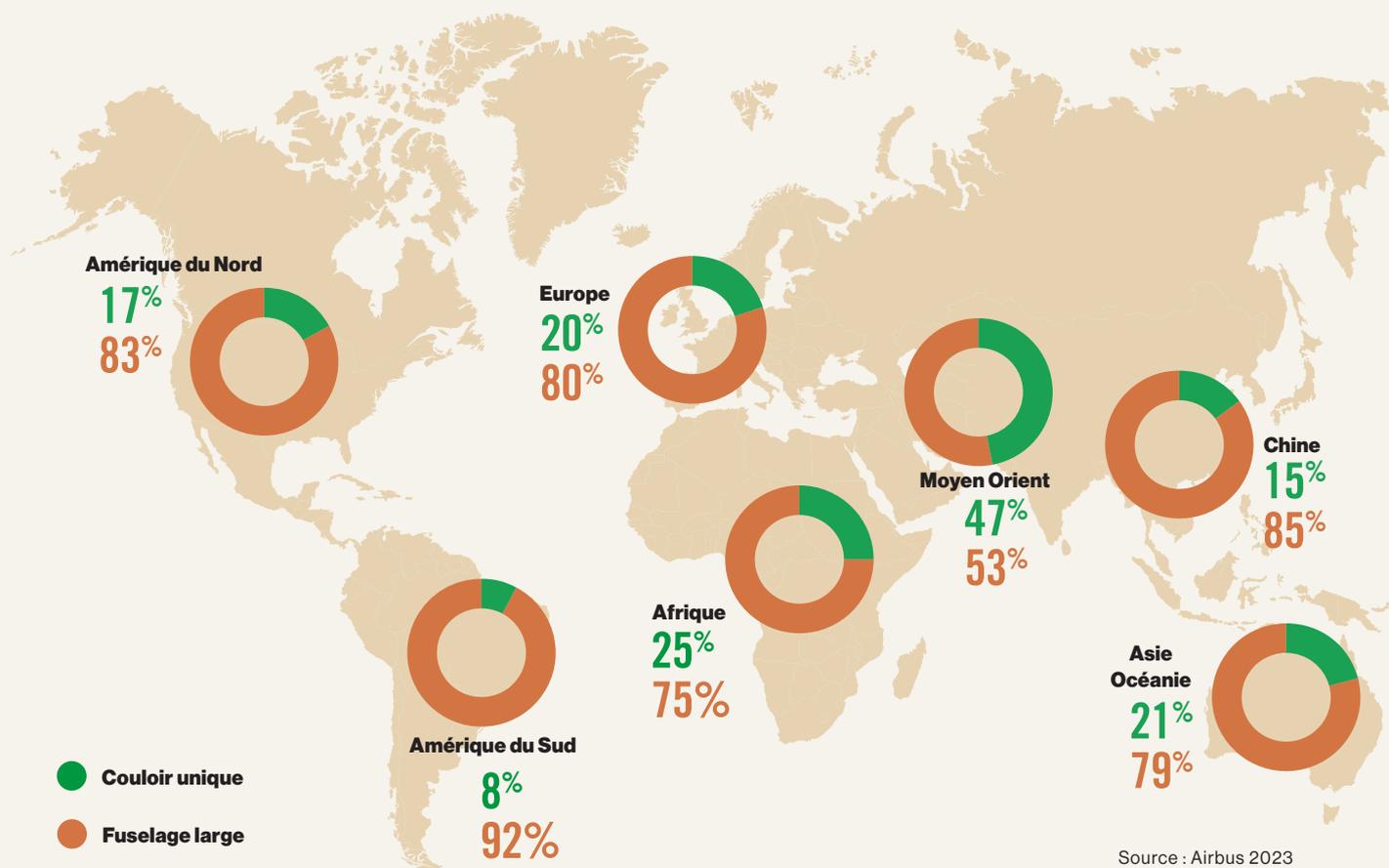
Quelles sont les motivations de la Russie – en état de guerre de facto avec l'UE et les États-Unis en Ukraine – pour se joindre à l'Occident dans la décarbonation tandis que les exportations d'hydrocarbures sont le fondement de son économie par ailleurs faible ? Dans quelle mesure la Chine sera-t-elle désireuse de travailler avec l'Inde (il n'y a toujours pas de traité de paix entre les deux nations) et avec les États-Unis, qui se sont engagés dans une nouvelle voie de

découplage ? Pourquoi l'Inde, qui tente aujourd'hui de reproduire (au moins dans une certaine mesure) l'ascension économique de la Chine après 1990, renoncerait-elle à utiliser son charbon alors que la Chine a quadruplé son extraction au cours des trente dernières années ? En outre, comme l'indiquent des chiffres récents, la Chine est loin d'en avoir fini avec son utilisation massive de combustibles fossiles : sa production de charbon a atteint un nouveau record en 2022 et le pays a approuvé la construction de 106 gigawatts de nouvelles centrales au charbon, soit la capacité la plus élevée depuis 2015 (Reuters, 2023, 26 février).

Nous devons également tenir compte du continent le plus pauvre, dont la population passera de 1,2 à 2,5 milliards d'habitants d'ici 2050. L'Afrique a vu comment la Chine est devenue relativement riche au cours de la dernière génération en quadruplant sa combustion de carbone fossile et en devenant le plus grand producteur mondial de ciment, d'acier, de plastique et d'ammoniac. Les pays riches ne disposent pas eux-mêmes d'alternatives non fossiles à grande échelle qui pourraient être transférées à l'Afrique et lui permettre de poursuivre un développement vert. Et les besoins en énergie et en infrastructures associées sont immenses. À l'exception de l'Afrique du Sud, la consommation d'énergie par habitant en Afrique subsaharienne est inférieure à 10 GJ/an, contre 26 GJ en Inde et 112 GJ en Chine. Il n'est donc pas étonnant que les responsables politiques africains réclament l'exploitation des ressources en combustibles fossiles afin d'élever le niveau de vie du continent au niveau de celui de l'Inde ! L'exploitation de certains grands gisements de gaz naturel en Afrique semble particulièrement intéressante, car le combustible liquéfié peut être facilement exporté dans le monde en-

LIVRAISONS PRÉVUES D'AVIONS NEUFS ENTRE 2023 ET 2042

Typiquement 80% couloir unique et 20% fuselage large.



tier. De nouveaux gisements de gaz sont actuellement en cours d'exploitation au Sénégal, au Ghana, au Nigeria, au Cameroun, en Angola, au Mozambique et en Tanzanie. Ils ne commenceront pas à produire avant 2030 et seront fermés dans le cadre de l'effort de décarbonation une ou deux décennies plus tard (Casey, 2023, 13 septembre).

N'oublions pas non plus que ce n'est pas la production accélérée d'électricité éolienne ou solaire, ni l'hydrogène vert, mais l'importation de gaz naturel liquéfié des États-Unis, du Qatar et du Nigeria qui a permis d'éviter les pénuries d'approvisionnement paralysantes dans l'UE à la suite de l'invasion de l'Ukraine par

la Russie en 2022 et 2023, et que les exportations de gaz naturel à grande échelle, et non la construction de cellules photovoltaïques, sont le fondement de l'alliance Russie-Chine (Miller, 2023, 17 mai).

La demande de machines fonctionnant avec des combustibles fossiles reste élevée partout. Après la pandémie de Covid, les compagnies aériennes ont passé des commandes record pour de nouveaux gros avions de ligne : en 2022, United Airlines a commandé 200 avions ; en 2023, Indigo (la plus grande compagnie aérienne indienne) en a commandé 500 et Air India 470. Selon les dernières prévisions d'Airbus, plus de 40 000

nouveaux avions de ligne seront nécessaires entre 2023 et 2042 – et ces machines alimentées au kérosène fonctionnent généralement pendant trente ans (voir figure 8). Les commandes de navires de croisière massifs à moteur diesel ont atteint 56 nouvelles unités en août 2023 et, là encore, elles ne seront pas lancées avant 2030 avec l'intention de naviguer pendant quelques années seulement (Cruise Industry News, 2023, 24 août). Trop de réalités mènent à la même conclusion : il n'y aura pas de réduction des émissions de carbone fossile de l'ordre de 50 % d'ici à 2030, et pas de zéro carbone d'ici à 2050.

Par Vaclav Smil



Réalités et vœux pieux

Depuis que le monde a commencé à se concentrer sur la nécessité de mettre fin à la combustion des combustibles fossiles, nous n'avons pas fait le moindre progrès vers l'objectif d'une décarbonation mondiale absolue : les baisses d'émissions dans de nombreux pays riches ont été bien inférieures à l'augmentation de la consommation de charbon et d'hydrocarbures dans le reste du monde, une tendance qui a également reflété la poursuite de la désindustrialisation en Europe et en Amérique du Nord et l'augmentation de la part de la production industrielle à forte intensité de carbone provenant d'Asie.

En conséquence, d'ici 2023, la dépendance absolue à l'égard du carbone fossile a augmenté de 54 % dans le monde depuis l'engagement de Kyoto. En outre, une part importante de la baisse des émissions dans de nombreux pays riches est liée à leur désindustrialisation, au transfert à l'étranger de certaines de leurs industries à forte intensité de carbone, en particulier en Chine.

Le Danemark, dont la moitié de l'électricité provient désormais de

l'énergie éolienne, est souvent cité comme un exemple de réussite en matière de décarbonisation. Depuis 1995, il a réduit ses émissions liées à l'énergie de 56 % (contre une moyenne européenne d'environ 22 %) – mais, contrairement à ses voisins, le pays ne produit pas de métaux importants (aluminium, cuivre, fer ou acier), ne fabrique pas de verre ou de papier, ne synthétise pas d'ammoniac et n'assemble même pas de voitures. Tous ces produits

consomment beaucoup d'énergie et le transfert des émissions liées à leur production vers d'autres pays confère au pays qui effectue le transfert une réputation écologique non méritée.

Étant donné que nous n'avons pas encore atteint le pic (ou le plateau) des émissions de carbone au niveau mondial et compte tenu de la progression nécessairement graduelle de plusieurs solutions techniques clés pour la décarbonation (du stockage de l'électricité à grande échelle à

l'utilisation massive de l'hydrogène), nous ne pouvons pas nous attendre à ce que l'économie mondiale ne produise plus de carbone d'ici à 2050. Cet objectif est peut-être souhaitable, mais il reste irréaliste.

Le dernier rapport de l'Agence internationale de l'énergie sur les perspectives énergétiques mondiales confirme cette conclusion. S'il prévoit que les émissions de CO₂ liées à l'énergie atteindront leur maximum en 2025 et que la demande de tous les combustibles fossiles culminera en 2030, il prévoit également que seule la consommation de charbon diminuera de manière significative d'ici 2050 (même si elle représentera encore environ la moitié du niveau de 2023), et que la demande de pétrole brut et de gaz naturel ne connaîtra que des changements marginaux d'ici 2050, la consommation de pétrole se situant toujours autour de 4 milliards de tonnes et celle de gaz naturel au-dessus de 4 000 milliards de mètres cubes par an (AIE, 2023d).

Les vœux pieux ou les affirmations contraires ne doivent pas être utilisés ou défendus en disant qu'il s'agit d'objectifs « aspirationnels ». Les analyses responsables doivent tenir compte des réalités énergétiques, matérielles, techniques, managériales, économiques et politiques existantes. Une évaluation impartiale de ces ressources indique qu'il est extrêmement improbable que le système énergétique mondial soit débarrassé de tout carbone fossile d'ici 2050.

Des politiques judicieuses et leur mise en œuvre énergétique détermineront le degré réel de cette dissociation, qui pourrait atteindre 60 ou 65 %. De plus en plus de personnes reconnaissent ces réalités, et sont de moins en moins influencées par le flux incessant de scénarios de décarbonation miraculeusement orientés à la baisse, si chers aux modélisateurs de la demande.

Les prévisions énergétiques mondiales à long terme présentant des

chiffres pour la demande ou l'offre globale et pour les parts revenant à des sources ou des conversions spécifiques sont au-delà de nos capacités. Le système est trop complexe et trop ouvert à des perturbations imprévues et profondes pour que l'on puisse se permettre une telle précision. Toutefois, le scepticisme dans l'élaboration des estimations à long terme réduira l'ampleur des erreurs inévitables. Voici un exemple de prévision réaliste pour 2023 réalisée par la société norvégienne de gestion des risques DNV, qui a été reprise récemment par d'autres évaluations réalistes. Après avoir noté que les émissions mondiales liées à l'énergie continuent d'augmenter (mais pourraient atteindre leur maximum en 2024, date à laquelle la transition commencerait effectivement), elle conclut que d'ici 2050, nous passerons d'une répartition actuelle d'environ 80 % de combustibles fossiles/20 % de combustibles non fossiles à un ratio de 48 %/52 %, l'énergie primaire provenant des combustibles fossiles diminuant de près de deux tiers mais restant à environ 314 EJ d'ici 2050 – en d'autres termes, à peu près au même niveau qu'en 1995 (DNV, 2023).

Encore une fois, c'est ce à quoi s'attend tout étudiant sérieux des transitions énergétiques mondiales. Les composantes individuelles changent à des vitesses différentes et des transformations particulièrement rapides sont possibles, mais le modèle historique global quantifié en termes d'énergies primaires est un modèle de changements graduels. Malheureusement, les prévisions modernes en général et l'anticipation des progrès énergétiques en particulier ont une tendance indéniable à l'optimisme excessif, à l'exagération et au battage médiatique (Smil, 2023). Au cours des années 1970, de nombreuses personnes ont cru qu'en l'an 2000, toute l'électricité proviendrait non seulement de la fission nucléaire, mais aussi des réacteurs à neutrons rapides, et peu après sont venues les

promesses d'une « énergie douce » qui prendrait le relais (Smil, 2000).

La croyance en des lendemains presque miraculeux ne disparaît jamais. Aujourd'hui encore, on peut lire des déclarations affirmant que le monde pourra compter uniquement sur l'énergie éolienne et photovoltaïque d'ici 2030 (Global100RE - StrategyGroup, 2023). Et puis il y a les déclarations répétées selon lesquelles tous les besoins en énergie (des avions à la fonte de l'acier) peuvent être satisfaits par de l'hydrogène vert bon marché ou par la fusion nucléaire à un prix abordable. À quoi tout cela sert-il, si ce n'est à remplir les journaux et les écrans d'affirmations irréalisables ? Nous devrions plutôt nous efforcer de tracer un avenir réaliste qui tienne compte de nos capacités techniques, de nos ressources matérielles, de nos possibilités économiques et de nos besoins sociaux, puis de concevoir des moyens pratiques pour les atteindre. Nous pouvons toujours nous efforcer de les dépasser, ce qui est un bien meilleur objectif que de nous exposer à des échecs répétés en nous accrochant à des objectifs irréalistes et à des visions impraticables.

Ne pas atteindre l'objectif irréaliste d'une décarbonation complète de la planète d'ici à 2050 signifie ne pas réussir à limiter le réchauffement moyen à 1,5 °C. L'augmentation de la température ne dépendra pas seulement de nos efforts continus pour décarboner l'approvisionnement énergétique mondial, mais aussi de notre capacité à limiter le CO₂ et les autres gaz à effet de serre générés par l'agriculture, l'élevage, la déforestation, les changements d'affectation des sols et l'élimination des déchets. Après tout, ces contributions représentent au moins un quart des émissions anthropiques mondiales, mais, jusqu'à présent, nous nous sommes presque exclusivement concentrés sur le CO₂ provenant de la combustion de combustibles fossiles.

Par Vaclav Smil





Conclusion

Je terminerai par quelques perspectives historiques et d'ordre de grandeur. Ma reconstitution de l'approvisionnement énergétique mondial (y compris les énergies traditionnelles de la biomasse) montre que les combustibles fossiles, et plus tard également l'électricité hydraulique et nucléaire, sont passés de seulement 2 % en 1800 à 95 % en 2020 (Smil, 2016). Après plus de deux siècles, la première transition énergétique n'est toujours pas achevée.

Et la seconde ? Même si nous supposons qu'en raison des rendements de conversion plus élevés d'une économie largement électrifiée, nous ne devons remplacer que 300 EJ, au lieu de 500 EJ, de l'approvisionnement actuel en combustibles fossiles d'ici à 2050, 85 % de la tâche reste à accomplir. En 2022, les énergies renouvelables ne fournissaient qu'environ 45 EJ, soit un gain annuel de 1,7 EJ au cours des vingt-sept dernières années. Mais pour éliminer le carbone fossile d'ici à 2050, il faudrait que les nouveaux ajouts d'énergie atteignent en moyenne 9,4 EJ par an au cours des vingt-sept prochaines années, ce qui implique un rythme de transition annuel près de six fois plus rapide qu'au cours des vingt-sept dernières années. Pouvons-nous instantanément sextupler (ou « juste » quintupler ou quadrupler) nos réalisations annuelles et maintenir ces nouveaux niveaux jusqu'en 2050 ?

La transition en cours n'est que le deuxième événement de transformation fondamentale de ce type dans l'histoire, et ces deux événements partagent un objectif similaire : un changement complet des fondements énergétiques de la civilisation tout entière. En comparaison avec les réalisations et les options techniques actuelles, la première grande transition a commen-

cé à se dérouler avec des capacités techniques rudimentaires, mais, finalement, elle a certainement dépassé les attentes initiales à son égard ; elle a créé de nouvelles sociétés riches et à haute énergie.

Même si nous sommes techniquement bien mieux équipés qu'il y a cent cinquante ou deux cents ans, la tâche que représente la deuxième transition énergétique ne semble pas moins difficile. Juste avant la fin de l'année 2023, l'Agence internationale de l'énergie a publié son estimation de l'investissement mondial dans les énergies propres – en d'autres termes, le coût annuel récent de la transition énergétique. En 2023, il s'élevait à près de 2 200 milliards de dollars (AIE, 2023). Même si nous devons remplacer seulement 60 % de la consommation actuelle de combustibles fossiles, nous devrions investir environ six fois plus, soit environ 13 000 milliards de dollars par an, pour atteindre l'objectif zéro carbone d'ici 2050. Le chiffre de 15 à 17 milliards de dollars par an (pour tenir compte des dépassements de coûts prévus) ne semble guère excessif et nous amène, une fois de plus, à un grand total de 400 à 460 milliards de dollars d'ici à 2050, ce qui confirme bien une valeur dérivée antérieurement. Il ne s'agit pas d'une prévision, mais d'une estima-

tion plausible destinée à indiquer le coût généralement sous-estimé de cette entreprise mondiale.

Aucune loi naturelle ne nous empêche de réaliser les énormes investissements nécessaires pour soutenir ces changements annuels massifs. Nous pourrions recourir à une mobilisation existentielle sans précédent, longue de plusieurs décennies et à l'échelle de la civilisation, d'efforts constructifs et transformateurs ou, à l'inverse, nous pourrions délibérément réduire notre consommation d'énergie en abaissant notre niveau de vie et en le maintenant à un niveau bas afin de faciliter le remplacement de tout le carbone fossile. En l'absence de ces deux choix radicaux, nous ne devrions pas ignorer l'expérience de la grande transition énergétique passée (des énergies traditionnelles de la biomasse aux combustibles fossiles) ni sous-estimer la multiplication des défis présentés par les exigences en matière d'ingénierie, de matériaux, d'organisation, de société, de politique et d'environnement de la transition en cours vers un monde sans carbone fossile, qui ont été partiellement passés en revue dans le présent essai. Lorsque nous évaluons ces défis de manière réaliste, nous devons conclure qu'un monde sans carbone fossile d'ici 2050 est hautement improbable.

Par Vaclav Smil

NOS REMERCIEMENTS AU FRASER INSTITUTE
