



LES TRANSITIONS ENERGETIQUES A L'HORIZON 2030 ET 2050, LE RETOUR EN GRACE DES SCENARIOS ET DE LA PROSPECTIVE

Chafia BESSALEM, Arnaud DIEMER, Cécile BATISSE, Mustapha BENAMARA

Revue Francophone du Développement Durable

2022 - n°19 - Mars

Pages 1 - 67

ISSN 2269-1464

Article disponible en ligne à l'adresse :

<https://erasme.uca.fr/publications/revue-francophone-du-developpement-durable/>

Pour citer cet article

Bessalem C., Diemer A., Batisse C., Benamara M. (2022), Les transitions énergétiques à l'Horizon 2030 et 2050, le retour en grâce des scénarios et de la prospective. *Revue Francophone du Développement Durable*, n°19, mars, p. 1 – 67.

Les transitions énergétiques à l'horizon 2030 et 2050, le retour en grâce des scénarios et de la prospective

Chafia BESSALEM, Arnaud DIEMER, Cécile BATISSE, Mustapha BENAMARA
Université Clermont Auvergne, CERDI, ERASME, HVL, Postgrowth Institute, Sonatrach

Résumé : La question énergétique est au cœur du triptyque du développement durable, d'un côté, il s'agit d'assurer la sécurité énergétique nationale en tenant compte de l'état des ressources et des perspectives géostratégiques de dépendance, de l'autre, il convient de maintenir une compétitivité induisant une croissance pourvoyeuse d'emplois, et ce malgré une énergie plus rare et donc plus chère. Enfin, il est nécessaire de tenir compte de la contrainte environnementale (émissions de gaz à effet de serre, changement climatique) qui impose des choix drastiques et immédiats pour réduire les risques encourus. La démarche prospective et la formulation de scénarios constituent à ce jour une réponse des institutions internationales, des gouvernements et des différents acteurs de la sphère privée aux incertitudes qui touchent le secteur énergétique mondial. Penser les transitions énergétiques revient ainsi à admettre que le système énergétique est complexe, que les changements technologiques doivent être compatibles avec les mutations économiques, sociales et géopolitiques. Le passage aux énergies renouvelables n'est pas un simple mécanisme de substitution, il constitue une transformation majeure du système énergétique mondial dans un contexte de hausse des prix de l'énergie.

Mots clés : Energie, Narrations, Pétrole, Prospective, Scénarios, Shared Socioeconomic Pathways

Introduction

Le contexte énergétique mondial est caractérisé par une forte demande d'énergie primaire due principalement à l'augmentation de la croissance économique des nouvelles puissances émergentes, à savoir l'Inde et la Chine. Dans son rapport *World Energy Outlook* (2021), l'Agence internationale de l'énergie (AIE) souligne que « les pressions sur le système énergétique ne vont pas fléchir dans les décennies à venir » (la population mondiale pouvant croître de près de 2 milliards de personnes d'ici à 2050). Cette projection n'est pas sans conséquence sur l'épuisement des ressources énergétiques qui, dans leur majorité, restent non renouvelables, ainsi que sur l'empreinte environnementale engendrée par les émissions de gaz à effet de serre (GES). C'est d'ailleurs ce constat qui oblige les gouvernements (mais également les grandes multinationales) à repenser les modes de production et de consommation afin de se mettre en conformité avec la feuille de route des Nations Unies, notamment les Objectifs du Développement Durable (ODD). Il devient même nécessaire d'anticiper ces changements afin de prévenir les impacts négatifs d'une croissance économique irrespectueuse de son environnement et de prendre conscience des limites planétaires (Persson & al., 2021 ; Steffen & al., 2015 ; Rockström & al., 2009).

L'énergie, et plus précisément le système énergétique, constitue un véritable enjeu de société (Diemer, 2008). Notre rapport à l'énergie est à la fois le carburant de l'économie et le responsable du réchauffement climatique. Une éventuelle pénurie de

ressources (fossiles) dès 2030 ravive les débats autour du Pic Oil (chute de la production de pétrole) et des investissements colossaux à mener dans les énergies renouvelables. Selon le rapport 2020 du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), les investissements mondiaux dans les capacités électriques d'origine renouvelable ont atteint 282 milliards de dollars en 2019 (hors grandes centrales hydroélectriques), dont 138 milliards d'euros pour l'éolien et 131 milliards d'euros pour le solaire (PNUE, 2020). La moitié de ces investissements a été réalisée en Chine (83 milliards d'euros) et aux Etats-Unis (55 milliards d'euros). Malgré des investissements évalués à près de 1 700 milliards de dollars d'ici 2030 (AIE, 2021), soit l'installation de nouvelles capacités électriques d'origine renouvelable à hauteur de 630 GW pour le solaire photovoltaïque et de plus 960 GW pour l'éolien (soit quatre fois plus que le niveau de 2020), nous sommes encore loin de ce qui serait nécessaire pour répondre aux besoins de la population mondiale tout en limitant la hausse de la température à moins de 2°C (Accords de Paris, 2015).

Dans cette course internationale visant à atténuer les effets du réchauffement climatique, la démarche prospective et la production de scénarios sont devenues des outils qui font partie de la panoplie des grandes organisations internationales, des think-tanks, des instituts de recherche, des gouvernements et des grandes multinationales. Il s'agit à la fois de cerner les principales évolutions énergétiques à l'horizon 2030 - 2050, d'appréhender la période de l'après pétrole (et donc de la place des énergies fossiles dans un mix énergétique) et de construire la société décarbonée de demain via des investissements massifs dans les énergies renouvelables.

Le présent papier entend aborder ces différents enjeux en cherchant à répondre à la question suivante : *Comment la méthode des scénarios peut-elle être mobilisée pour cerner l'évolution du système énergétique mondial et penser les transitions énergétiques à l'horizon 2030 et 2050 ?*

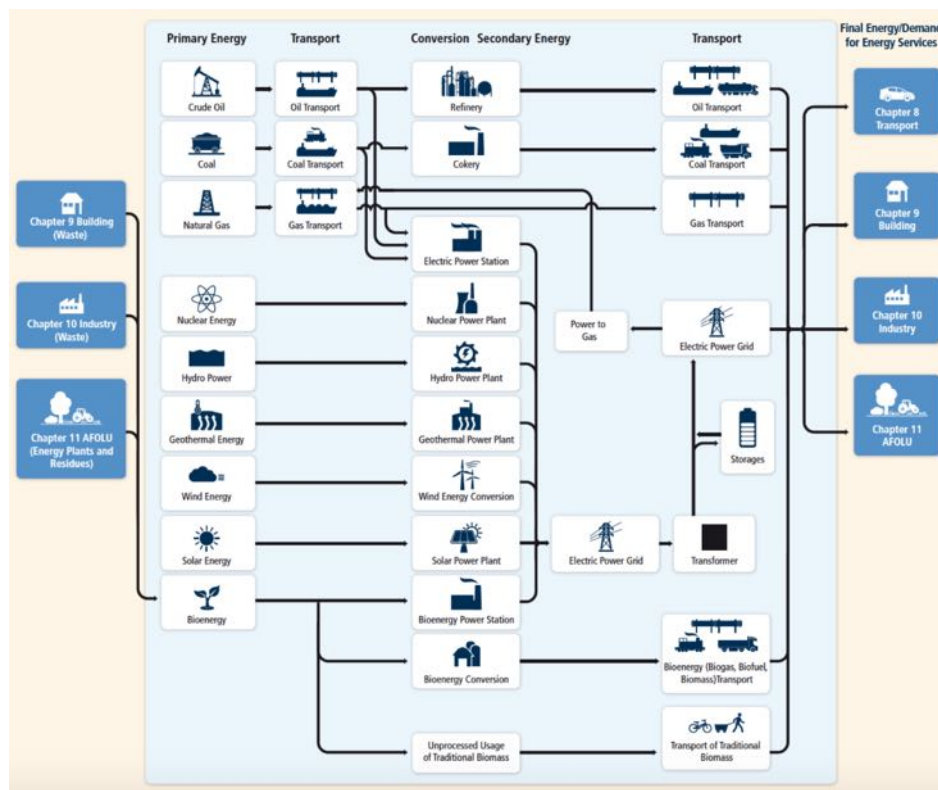
Pour aborder cette problématique, nous procéderons en trois temps. Dans un premier temps, nous présenterons les principales caractéristiques et les enjeux du système énergétique mondial. Par système énergétique, nous entendons ici un ensemble complexes de flux (combustibles, carburants, électricité) reliant des stocks de ressources primaires (charbon, pétrole, gaz naturel, biomasse, nucléaire, hydraulique, éolienne, solaire...) à des consommations finales satisfaisant de besoins de mobilité (véhicules), de chaleur (fours, chaudières, chauffage), d'éclairage, de force motrice (moteurs). La notion de système énergétique s'appuie sur une infrastructure, un ensemble d'interactions et une mise en réseau des différents acteurs. C'est cette rigidité du système actuel couplée avec l'augmentation de la population mondiale et la croissance économique des pays émergents qui remet en cause la stratégie de substitutions des énergies fossiles par les énergies renouvelables et qui inscrit le mix énergétique dans le long terme (2050). Dans un deuxième temps, nous montrerons que cette projection dans l'avenir du système énergétique mondial nécessite d'introduire les notions de scénarios et de prospective, lesquelles nous invitent à considérer les

phénomènes à partir d'un ensemble de facteurs et de leurs interrelations, à intégrer la dimension du temps long ou encore à prendre en compte les discontinuités et les ruptures de trajectoires. Enfin, dans un troisième et dernier temps, nous analyserons les scénarios proposés par les grandes institutions internationales afin de cerner les grandes tendances pour les 30 prochaines années.

Contexte : un système énergétique en transition

Un système énergétique se définit comme un ensemble d'interactions entre des acteurs, des flux et des stocks, allant de l'extraction de l'énergie primaire à l'utilisation d'énergie finale pour fournir des biens et des services (Pfenninger & al., 2014, GEA, 2012). En d'autres termes, le système énergétique englobe "les processus combinés d'acquisition et d'utilisation de l'énergie dans une société ou une économie donnée" (Jacquard, 2005). Bruckner et al. (2014, p. 516) définissent le système énergétique en deux composantes, le secteur de l'offre comprend " tous les processus d'extraction, de conversion, de stockage, de transmission et de distribution de l'énergie qui fournissent de l'énergie finale aux secteurs d'utilisation finale (industrie, transport et bâtiment, ainsi que l'agriculture et la sylviculture) " et le secteur de la demande mesure les secteurs d'utilisation finale de l'énergie (Fig. 1).

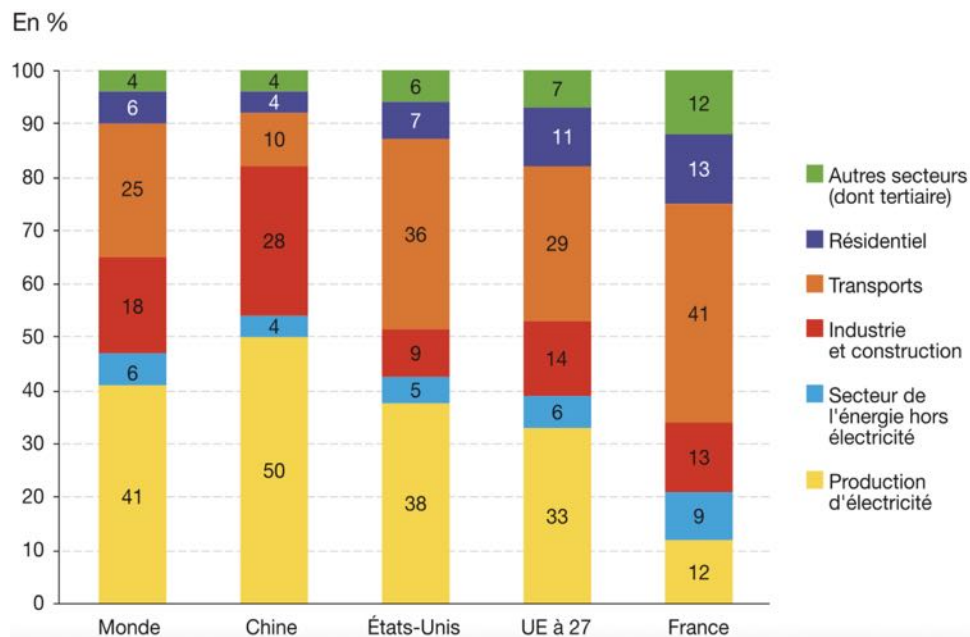
Figure 1 : Architecture du système énergétique



Source : Bruckner & al. (2014, p. 519)

Le système énergétique est la pierre angulaire du système mondial. Premièrement, la croissance économique a besoin d'une certaine quantité d'énergie (flux et stocks) à un prix bas pour continuer à croître (Diemer, 2008). Toutefois, une croissance trop forte exerce une pression sur le prix de l'énergie qui peut réduire la croissance économique (même si cette corrélation n'est pas vraiment forte, Stern, 1993). Deuxièmement, le secteur de la production d'énergie est le plus grand contributeur aux émissions mondiales de gaz à effet de serre (IAE, 2020). En 2018, ce secteur (production d'énergie hors électrique + production d'électricité) était responsable de 47% du total des émissions de CO2 (Fig. 2).

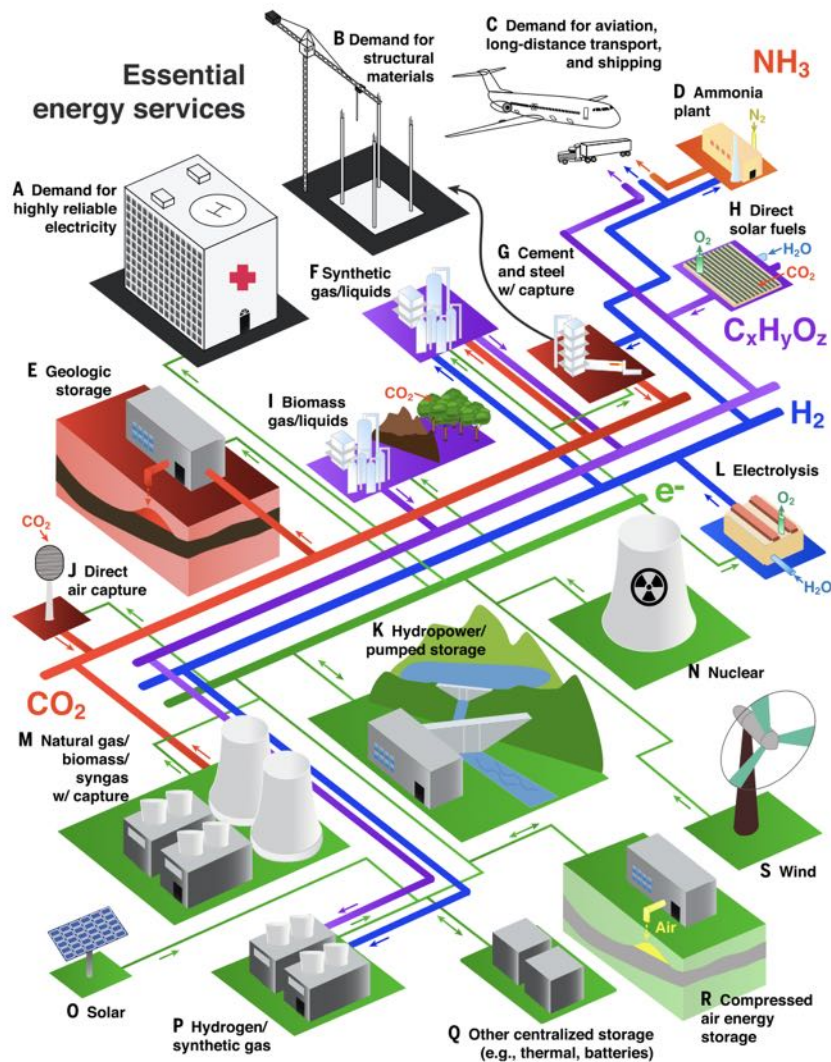
Figure 2 : Origine des émissions de CO2 due à la combustion d'énergie



Source : IAE (2020)

De multiples options sont possibles pour réduire les émissions de GES du secteur de la production énergétique (Herbst, Toro, Reitze, Jochem, 2012), notamment l'amélioration de l'efficacité énergétique, la réduction des émissions dans l'extraction des combustibles, la conversion de l'énergie, les énergies renouvelables, la capture et le stockage du dioxyde de carbone (Davis & al., 2018). Troisièmement, l'avenir de l'espèce humaine exige une transformation fondamentale du système énergétique (Balzani, 2019), le défi n'est pas seulement de remplacer les ressources en combustibles fossiles par des alternatives à faible émission de GES, mais aussi d'engager les sociétés vers plus de sobriété (Maresca, 2014), ce qui signifie que nous devons réduire notre consommation d'énergie. Si les politiques de découplage et de décarbonisation sont les éléments clés des stratégies d'atténuation du changement climatique, ces stratégies sont nécessaires mais pas suffisantes (Eloi, 2012). Les forces qui déterminent l'évolution de la consommation finale d'énergie dans tous les secteurs ont un impact significatif sur l'évolution des systèmes de production d'énergie (Fig. 3).

Figure 3 : Schéma d'un système énergétique intégré ne rejetant pas de CO₂ dans l'atmosphère



Source : Davis & al. (2018, p. 1)

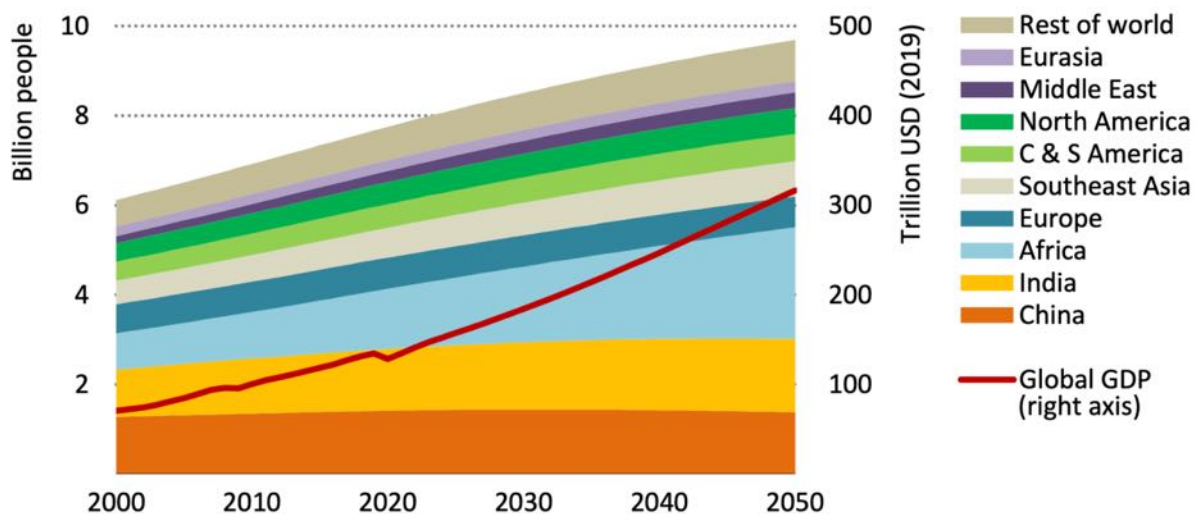
Le secteur de la production d'énergie convertit plus de 75 % de la production totale d'énergie primaire (PTEP) en d'autres formes, à savoir l'électricité, la chaleur, les produits pétroliers raffinés, le coke, le charbon enrichi et le gaz naturel. L'industrie (y compris l'utilisation non énergétique) consomme 84 % de l'utilisation finale de charbon, 26 % des produits pétroliers, 47 % du gaz naturel, 40 % de l'électricité et 43 % de la chaleur. Le transport consomme 62 % de l'utilisation finale des combustibles liquides. Le secteur du bâtiment est responsable de 46 % de la consommation finale de gaz naturel, 76 % des combustibles renouvelables et des déchets, 52 % de l'électricité. Le secteur de la fourniture d'énergie est également un grand consommateur d'énergie. Les pertes d'énergie, évaluées comme la différence entre les entrées (78 % de la PTEP) et les sorties (48,7 % de la PTEP) de ce secteur, représentent 29,3 % de la PTEP. La production totale d'énergie primaire est non seulement fonction de la demande des utilisateurs finaux pour des vecteurs énergétiques de meilleure qualité, mais aussi de l'efficacité moyenne mondiale relativement faible des processus de conversion, de

transmission et de distribution de l'énergie (efficacité de 37 % pour l'électricité produite à partir de combustibles fossiles et de 83 % pour la production de chaleur urbaine à partir de combustibles fossiles). La dynamique du système énergétique présente ainsi de nombreux défis et une chaîne complexe d'éléments moteurs dans le domaine macroéconomique (prix, demande, exportations, importations), industriel (secteurs, compétitivité, chaîne de valeur), social (précarité énergétique), environnemental (pollution, climat) ou sanitaire (santé humaine).

Si 80% de l'énergie consommée dans le monde est issue de ressources fossiles émettrices de gaz à effet de serre (pétrole, gaz, charbon) et responsables du dérèglement climatique, il existe de profondes disparités internationales en fonction des zones géographiques (Gazprom Energy Report, 2020). Le Moyen Orient utilise 98,8% d'énergies fossiles (45,9% de pétrole, 51,8% de gaz naturel et 1% de charbon). Rien de surprenant pour cette zone qui est la principale productrice d'hydrocarbures au monde. De son côté, le continent Africain dispose également de réserves de pétrole et de gaz naturel, mais sans commune mesure avec la zone du Moyen Orient. Son mix énergétique reste néanmoins très carboné (avec 91,3% d'énergie fossile). Le pétrole y occupe une place de choix (41,7%). La zone Asie et Pacifique a un mix énergétique comparable à celui de l'Afrique (87,4% d'énergie carbonée). La grosse différence entre les deux zones réside dans le charbon qui est extrêmement utilisé en Asie où il représente 47,5% de l'énergie consommée. Du côté, des pays de la Communauté d'États Indépendants regroupant la fédération de Russie et des pays tels que l'Ouzbékistan, le Tadjikistan, le Kazakhstan... Le mix énergétique est résolument tourné vers le fossile (89,5%), et en particulier vers le gaz naturel, ces pays disposant des principales réserves mondiales. Enfin, l'Amérique du Nord et l'Europe sont légèrement moins tournées vers les énergies rejetant du carbone (respectivement 81,7% et 73,6%)... Le nucléaire y occupe une place non négligeable (9,9 % pour l'Europe et 7,4% pour l'Amérique du Nord). L'Europe étant également la zone la plus impliquée en matière de développement de l'énergie renouvelable (9,8% de son mix énergétique).

Au-delà de ces disparités, il faut souligner le rôle majeur joué par deux drivers du système énergétique, la croissance de la population mondiale (Fig. 4) et bien entendu son corollaire, la hausse de la demande énergétique mondiale (Bobin, Nifenecker, Stéphan, 2021). Selon l'ONU (2020), la population mondiale devrait augmenter d'environ dix milliards en 2050¹, un accroissement de 2,5 milliards se produisant quasi exclusivement en Afrique subsaharienne (+ 1,6 milliard) et en Asie du Sud (+ 800 millions).

¹ Dans leur ouvrage *Empty planet : the Shock of Global Population Decline* (2019), John Ibbitson et Darrel Bricker n'hésitent pas à remettre en cause les prédictions de la Banque Mondiale et de l'ONU, en insistant sur le déclin démographique (thèse que l'on retrouve également chez Wolfgang Lutz, 2018, 2017).

Figure 4 : Population mondiale par régions et évolution du PIB

Source : IAE (2021a)

Ces régions chaudes, les plus pauvres et les plus fécondes ont un fort potentiel de développement, sous réserve de disposer des énergies adaptées à leur environnement (Wiesenfeld, 2013). Simultanément, le taux mondial d'urbanisation, proche de 54 % en 2021, devrait dépasser les 65 % en 2050, soit un accroissement de 2,5 milliards de citoyens, portant à 6 milliards la population totale vivant dans des agglomérations. Dans certaines grandes métropoles, les densités de population pourront dépasser les 15 000 habitants par km². Près de 70 % d'entre elles seront situées à moins de 100 kilomètres d'un littoral. Plus des deux tiers de l'énergie mondiale y sera consommée (Zaninetti, 2008). Fort de ce constat, l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA, 2020) estimait que la croissance des consommations énergétiques devrait avoisiner les 1% par an et ce, jusqu'en 2040. Malgré une forte croissance des énergies renouvelables, qui couvriraient 60 % de la croissance des besoins d'électricité, la part des combustibles fossiles ne serait que faiblement réduite. Il est donc nécessaire de concevoir de nouvelles trajectoires permettant au secteur mondial de l'énergie, responsable d'environ trois quarts des émissions mondiales de gaz à effet de serre, d'atteindre l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 (IEA, World Energy Outlook, 2021). La bonne santé du système énergétique mondial passe par une forte remise en cause des fondements du système actuel.

L'idée d'une transition énergétique incarne ce changement, elle renvoie plus précisément à des mesures de modifications structurelles des modes de production, de stockage, de transport, de distribution et de consommation de l'énergie (Jancovici, 2012). Elle concerne aussi les modifications apportées aux mix des sources énergétiques primaires et l'usage final de celles-ci (Lazar, 2014).

L'expression « *Transition énergétique* » est apparue au milieu des années 1970 pour conjurer les inquiétudes liées à la crise énergétique de 1973-1974. Comme le rappelle Jean-Baptiste Fressoz (2014, p. 2), « *Dire transition plutôt que crise rendait le futur beaucoup*

moins anxiogène en l'arrimant à une rationalité planificatrice et gestionnaire". Jimmy Carter a consacré près de cinq discours à la Nation sur ce thème, afin d'encourager ses concitoyens à renoncer au consumérisme et à renouer avec les valeurs chrétiennes de la sobriété. Du point de vue historique et selon Smil (2008), on recense trois transitions énergétiques majeures : (i) le passage de l'utilisation de l'énergie humaine et animale à l'utilisation de l'énergie mécanique, (ii) le remplacement des mouvements mécaniques par des machines à vapeur au XVIIIe siècle avec l'utilisation du charbon, (iii) l'expansion des usages de l'électricité et l'essor du pétrole dans les transports depuis le milieu du XXe siècle. Les deux derniers siècles ont connu le passage de l'ère de la biomasse à celle du charbon, puis du pétrole, du gaz et demain, peut-être, des renouvelables... selon un processus d'addition énergétique. De nos jours, la notion de transition énergétique renvoie à une série de thèmes clés (Revest, 2013) parmi lesquels on peut citer le mix énergétique, les bâtiments à énergie positive, la contrainte climatique, la décarbonisation, l'efficacité énergétique, l'empreinte écologique, l'énergie des flux, l'indépendance énergétique, la précarité ou la justice énergétique, la sobriété énergétique et la décroissance (Wirz, 2018) ou encore le triangle des régimes énergétiques (Lipietz, 2012).

Les singularités des transitions énergétiques

Pendant longtemps, la question énergétique s'attachait à répondre à la croissance de la demande énergétique (Ruedinger, Aykut, 2017), la question environnementale n'était pas prise en compte dans le processus de mutation énergétique et l'épuisement des ressources fossiles ne représentait pas une menace immédiate (même si le rapport Meadows, *Limits to Growth*, évoquait clairement la disparition des ressources naturelles dès 1972). De nos jours, des changements profonds sont à l'œuvre dans le domaine de l'énergie, résumés par le terme de *transition énergétique* (Duruissseau, 2014). Ces changements sont impulsés par un contexte énergétique complexe, caractérisé par la crainte d'un épuisement des ressources fossiles (et donc une hausse du prix de l'énergie, Pescatori, Stuermer, Valckx, 2021) et la nécessité de lutter contre les émissions de gaz à effet de serre. D'une certaine manière, la transition énergétique s'impose d'elle-même (Naudet, Reuss, 2018, Arik, 2012). Cependant, elle peut prendre plusieurs formes selon les stratégies des pays et les visions des gouvernements. En France, la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte se présente comme une loi « d'action et de mobilisation » (Denolle, 2016) qui engage le pays tout entier (citoyens, entreprises, territoires, pouvoirs publics).

Elle doit permettre à la France de renforcer son indépendance énergétique, de réduire ses émissions de gaz à effets de serre et donne à tous des outils concrets pour accélérer la croissance verte (Diemer, 2015a). En 2016, la publication d'un arrêté fixant la programmation pluriannuelle des énergies renouvelables a même fixé l'objectif d'augmenter de 50% la capacité installée des énergies renouvelables d'ici 2023.

Ainsi, les tendances les plus saillantes en matière de transition énergétique sont basées sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique (Bellevrat & al., 2013), elles-mêmes encadrées dans une transition sociétale (Association NegaWATT, 2021). L'association de ces deux éléments est censée assurer plus de 90 % des réductions nécessaires d'émissions de CO₂ liées à l'énergie à l'aide de technologies sûres, fiables, économiques et largement disponibles (IRENA, 2018). L'introduction des énergies renouvelables (Freris, Infield, 2021) peut être réalisée selon deux manières, par addition aux sources d'énergie existantes ou en remplacement de celles-ci :

- *L'additivité énergétique* consiste en l'exploitation de toute nouvelle source énergétique sans recourir au remplacement d'une source existante et exploitée. Malgré la découverte du pétrole et du gaz, le charbon continue à être exploité. L'avènement des énergies renouvelables n'a pas provoqué la disparition des énergies fossiles. Christian de Perthuis et Boris Solier (2018) considèrent que les transitions énergétiques opérées depuis le début de la révolution industrielle reposent sur un empilement des sources primaires, dans lequel les terriens mobilisent de nouvelles énergies sans renoncer à celles préexistantes.

- *La substituabilité énergétique* consiste en le remplacement partiel ou total d'une ressource énergétique par une autre plus disponible, plus respectueuse de la nature ou moins chère. Derry (2007) estime que la substitution énergétique est un concept en vogue principalement pour deux raisons. La première renvoie à la question du réchauffement climatique, la seconde au défi de la sécurité énergétique. Toutefois, il conclut que dans le contexte actuel du libre marché, la production de ces sources nouvelles s'additionne à la production existante et ne la remplace pas. Il ajoute qu'une planification énergétique à long terme est nécessaire pour réaliser une substitution énergétique effective. Concrètement, l'économie d'énergie constitue un moyen de réduire le « gaspillage » de l'énergie et de diminuer les émissions des gaz à effet de serre et des polluants atmosphériques (Renou, 1991). Elle consiste soit à avoir le même confort en consommant moins d'énergie ou d'améliorer le service rendu avec la même énergie consommée. De ce point de vue, il y a trois façons d'agir :

L'efficacité énergétique est le ratio entre le service énergétique produit et la quantité d'énergie utilisée pour le produire (Feidt, 2009), c'est la principale politique développée dans le cadre d'une transition énergétique (Boulanger, 2007). Elle passe par une modification profonde des modes de consommation mais aussi par des progrès technologiques (Pineau, 2021). Le secteur le plus apte à apporter le plus d'efficacité énergétique (via la réduction de la consommation d'énergie) est le secteur de l'habitat (Charlier, 2014). L'efficacité énergétique constitue un axe prioritaire de la transition énergétique allemande, notamment via le programme de soutien « *rénovation énergétique efficace* » financé par la Banque fédérale d'investissement (Oriol, 2020).

La *sobriété énergétique* est souvent associée à l'idée de modération ou à une utilisation plus intelligente de l'énergie (Villalba, Semal, 2018)). La sobriété est bien plus qu'un simple éco-geste (Maresca, 2014), elle traduit « *une démarche volontaire et collective de réduction de la consommation énergétique par des changements de comportements, de valeurs, de pratiques ou de modes de vie* » (Diemer, 2015b). Elle s'inscrit donc dans un changement de paradigme (Spittler & al., 2019), celui de la condamnation de la société de croissance et de ses injustices (Gladkykh & al., 2021, Jenkins & al., 2016), d'une action collective de citoyens (Sterling-Gregg & al., 2020), voire d'un basculement dans la décroissance (Diemer, 2021).

La *maîtrise de l'énergie* permet à la fois de réduire le prix de l'énergie et de faciliter l'efficacité et la sobriété énergétique. Il s'agit à la fois d'une maîtrise (Cormier, Teske, 2013) : (i) de la demande d'énergie en freinant les dépenses énergétiques ; (ii) de la production d'énergie en décidant de stopper le recours aux énergies destructrices de l'environnement et nuisibles aux humains, à savoir, les énergies fossiles et le nucléaire.

A côté de ces transformations majeures du système énergétique, il convient d'associer les changements technologiques ainsi que les mutations économiques, sociales et géopolitiques (Delepouve, 2016). Les systèmes énergétiques sont donc de plus en plus complexes, ce qui nous amène à parler de transitions énergétiques au pluriel.

Transitions énergétiques, secteurs énergivores et croissance économique

Les secteurs du bâtiment et des transports représentent à eux deux 60 % de l'énergie consommée dans le monde, près des deux tiers provenant des énergies fossiles émettrices de CO₂ (Lévy, 2021). Selon Gaudin (2018), dans les pays développés, trois grands types d'usages constituent schématiquement la consommation actuelle d'énergie : un tiers pour la production, l'industrie et l'agriculture, un tiers pour les transports et un tiers pour le chauffage des bâtiments, habitations et lieux de travail. Le secteur de transport dépend aujourd'hui à 95 % du pétrole pour son approvisionnement énergétique (Appert, 2018), en plus de sa consommation importante d'énergie, ce secteur est très émetteur de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques. De son côté, Aoun (2018) estime que la dynamique n'est pas encore enclenchée dans les autres secteurs comme le transport et l'incertitude porte sur la vitesse et le rythme de cette transformation globale. Les habitats sont les lieux où l'énergie est la plus utilisée et où l'efficacité énergétique est de moindre importance mais d'autre part ils représentent le secteur le plus apte pour l'utilisation des énergies renouvelables notamment s'agissant des installations individuelles (Julian, 2021, Meunier, 2008).

Les transitions énergétiques sont ainsi une véritable opportunité pour la relance de l'économie en raison de l'importance des investissements qu'elles requièrent et des emplois que les nouvelles installations de services et de maintenance permettent de

créer. Selon ENEA CONSULTING (2018), les économies émergentes et en développement ont la possibilité et le potentiel de mettre les transitions énergétiques au cœur de leur dynamique de développement, sans avoir à payer, comme les pays industriels, le coût d'une refonte radicale d'infrastructures déjà développées. Cela montre les difficultés pour les pays développés d'opérer de véritables transitions énergétiques. Ces dernières devront s'appuyer sur les trois piliers que sont l'efficacité énergétique, la sobriété énergétique et l'introduction des énergies renouvelables, soit de façon additive (aux énergies existantes) ou en substitution de celles-ci. Ceci ouvre la voie à de nouveaux axes d'investissements ; des équipements, de la matière première, des services... Les secteurs clés sur lesquels la communauté internationale doit agir afin de réussir ces transitions énergétiques sont principalement : le bâtiment et la construction ; les transports ; la mobilité, l'industrie et les biens de consommation ; l'agriculture et alimentation ; la forêt et les puits de carbone.

L'efficacité énergétique (c'est une consommation à la fois modérée et optimale de l'énergie pour un service rendu) permettrait, si elle était généralisée, d'infléchir la courbe de demande en énergie. Sur le plan économique, elle impliquerait des investissements colossaux, pour adapter le mode de vie à ses différentes recommandations. Sur le plan technique, elle se traduirait par des changements technologiques (Chateau, 2016) : chaudière industrielle à meilleur rendement, bâtiment mieux isolé, moteur à meilleur rendement. Toutefois, les changements invoqués pourraient également prendre la forme d'une meilleure organisation (par exemple dans les transports, utilisation des transports en commun plutôt que de la voiture), d'une meilleure gestion (par exemple meilleure régulation des besoins de chaleur dans les usines ou dans les bâtiments), voire de la modération des besoins (baisse du chauffage la nuit dans les bâtiments). L'amélioration des rendements des équipements est un des axes de l'efficacité énergétique. Cet aspect est un levier de croissance (Fazeli, Davidsdottir, 2015). Dans le secteur du bâtiment, des modifications dans le cadre d'une réhabilitation des logements, des bureaux...ont pour effet de réduire la consommation d'énergie.

Dans un étude intitulée *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency*, l'Agence internationale de l'énergie (2014) a rassemblé dans le monde entier des données confirmant les multiples avantages de l'efficacité énergétique. Il s'agit notamment de données concernant :

- *Les incidences macroéconomiques* : La réduction de la consommation d'énergie et l'amélioration de la productivité résultant de l'efficacité énergétique peuvent avoir des effets positifs substantiels sur l'économie. La progression de la production attribuable à l'efficacité énergétique représenterait entre 0,25 % et 1 % de la croissance du produit intérieur brut (PIB). A l'avenir, le développement économique pourrait reposer sur les économies résultant de l'efficacité énergétique (Cochet, 2000), contrairement au paradigme actuel qui lie les dépenses de consommation à l'exploitation des énergies bon marché.

- *L'emploi* est stimulé directement ou indirectement à des degrés variables par les différentes politiques et par les conditions sur les marchés locaux du travail (ADEME, 2009). La création d'emploi doit être analysée en fonction des spécificités de chaque situation. Les estimations basées sur certaines études montrent que chaque million d'euros investi donne lieu à la création de 7 à 22 années d'emplois (IEA, 2014).

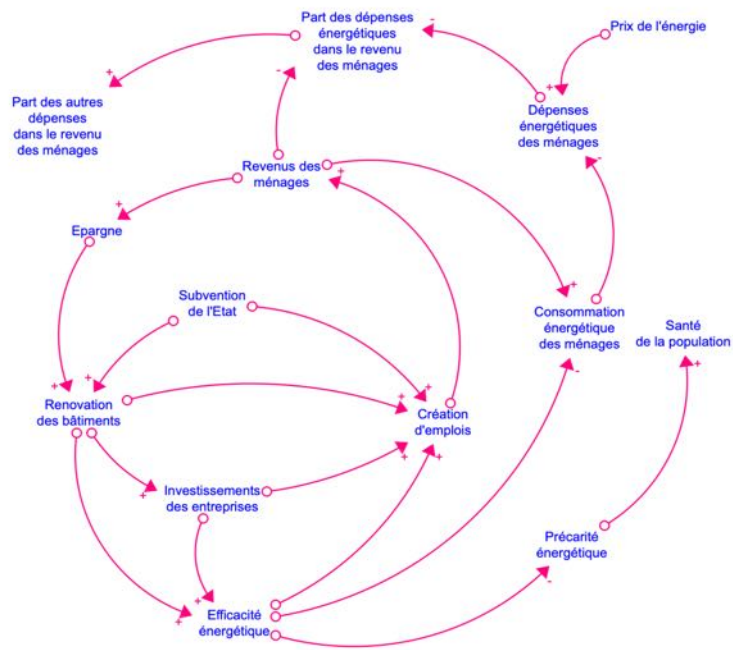
- *Les Incidences sur les budgets publics* : Les investissements dans l'efficacité énergétique peuvent accroître les recettes fiscales, augmenter la rentabilité de l'investissement et abaisser les coûts du chômage et de la protection sociale (Giraudet, Bourgeois, Quirion, 2020). Une étude des incidences macroéconomiques de la rénovation de bâtiments publics à l'échelle de l'Union Européenne a montré qu'un investissement annuel de 56 milliards de dollars pourrait créer 760 000 emplois chaque année et permettre une amélioration directe nette des budgets publics de l'ordre de 41 à 56 milliards de dollars par an, chiffres qui se situent entre 91 et 174 milliards de dollars, soit plus du double, lorsque l'ensemble des avantages pour toute l'économie sont pris en considération.

- *Les Incidences sur la santé et le bien-être* : Les effets positifs sur la santé sont invariablement plus prononcés dans les groupes vulnérables de la population : les enfants, les personnes âgées et les personnes déjà atteintes de maladies. Les symptômes de maladies respiratoires sont atténués, et le taux de mortalité excessif en hiver diminue dans les climats froids (Ezratty et al., 2009). L'efficacité énergétique peut avoir des effets bénéfiques sur la santé mentale en atténuant la précarité énergétique (Derdevet, 2013) et la désagréable sensation chronique de froid associée à l'anxiété, au stress, à la dépression et à la crainte de ne pas jouir d'une bonne santé. Les incidences sur la santé représentant 75 % de l'incidence totale et le rapport avantages/coûts pouvant atteindre 4 :1, plusieurs gouvernements ont placé l'efficacité énergétique au centre de leur politique en matière d'énergie pour remédier à la précarité énergétique (Devalière, 2008).

- *la productivité industrielle* : Les investissements dans l'efficacité énergétique peuvent avoir un intérêt stratégique pour les entreprises, les rendant plus compétitives, réduisant leurs coûts d'exploitation et d'entretien et améliorant leurs conditions de travail (Levacher, Clodic, Marechal, 2009). Lorsque les multiples avantages de l'efficacité énergétique sont pris en compte, la période de retour sur investissement est généralement réduite de moitié (Ballot-Miguet & al., 2019).

- *Les Incidences sur les prestations énergétiques* : Les fournisseurs de services énergétiques adoptent un nouveau paradigme qui fait dépendre leurs bénéfices des prestations et des multiples avantages qu'ils apportent aux consommateurs plutôt que de la vente d'un volume croissant d'unités d'énergie (Aymoz, 2018). Les avantages directs de l'efficacité énergétique pour les prestataires (Fig 5) comprennent la diminution des coûts de distribution et de production, et les avantages indirects, la réduction des coûts associés à la gestion des clients (Duplessis, 2009).

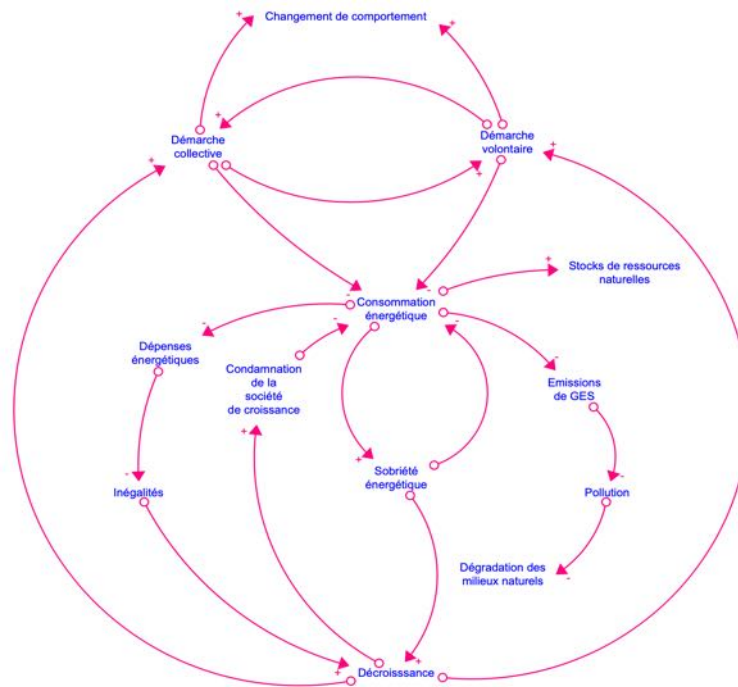
Figure 5 : Boucles causales de l'efficacité énergétique



Source : Les auteurs

La sobriété énergétique consiste en une limitation de l'utilisation de l'énergie aux besoins fondamentaux (Fig. 6), elle vise à réduire la consommation de l'énergie, via un changement de comportement et de modes de vie de la population (Toulouse, 2020).

Figure 6 : Boucles causales de la sobriété énergétique

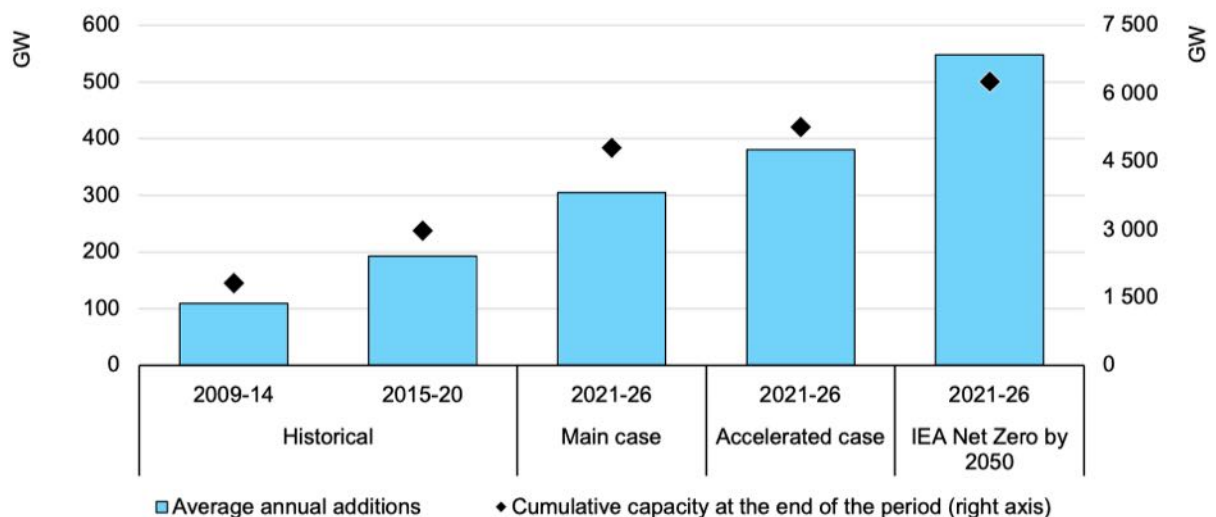


Source : les auteurs

Selon le rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (GIEC, 2022, 2021, 2018), un changement de comportement et de modes de vie dans les pays développés permettrait de réduire la demande énergétique de 20 % sur le court terme et, éventuellement, de 50 % des niveaux actuels d'ici la moitié du siècle. Une remise en cause de notre rapport à l'énergie et l'adoption de comportements plus responsables et plus sobres en énergie apparaît ainsi comme une solution simple, efficace et à moindre coût qui permettrait de limiter significativement les émissions de gaz à effet de serre (GES). Les conséquences économiques d'une politique de sobriété énergétique seraient avantageuses et permettraient non seulement de limiter les émissions de GES mais aussi de réduire la facture de consommation d'énergie (Association NegaWATT, 2018).

Au-delà des stratégies d'efficacité énergétique et/ou de sobriété énergétique, l'un des véritables drivers des transitions énergétiques, c'est la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique. L'Agence Internationale de l'Énergie (Décembre, 2021) prévoit une augmentation de la capacité des énergies renouvelables de plus de 1 800 GW, soit plus de 60 % jusqu'en 2026. Un tel scénario représenterait près de 95 % de l'augmentation de la capacité électrique totale dans le monde. La République populaire de Chine reste le leader incontestée des énergies renouvelables (avec 43 % de la croissance mondiale), suivie par l'Europe, les États-Unis et l'Inde. Ces quatre marchés assurent à eux seuls près de 80 % de l'expansion de la capacité des énergies renouvelables dans le monde (Fig. 7).

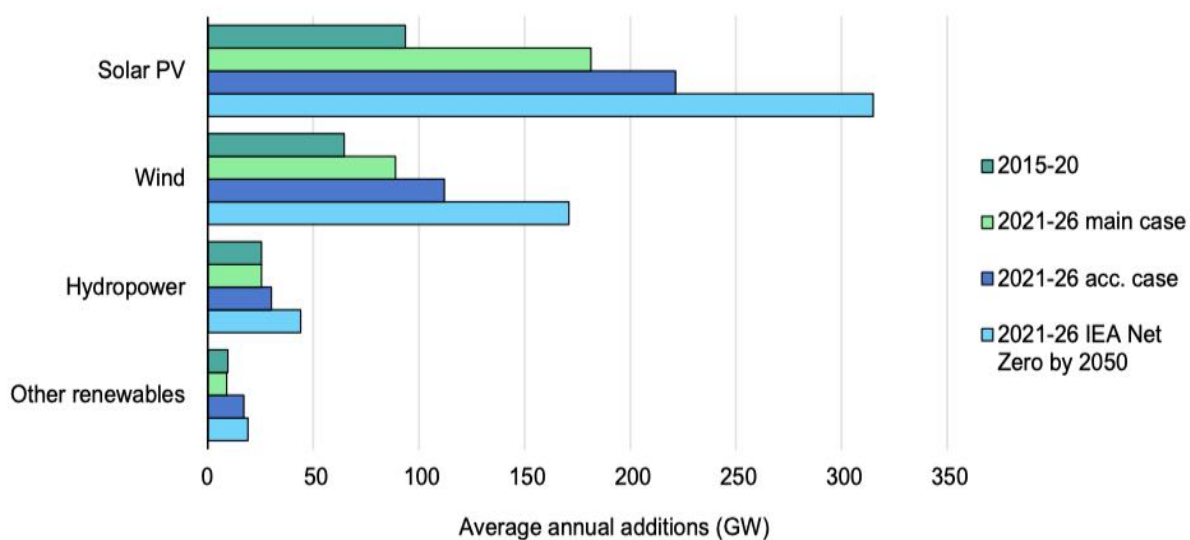
Figure 7 : Ajouts annuels moyens de capacités d'énergie renouvelable et capacité installée cumulée, historique, prévisions et scénario "Net zéro" de l'AIE, 2009-2026



Source : IEA (2021)

Malgré des investissements colossaux dans les énergies renouvelables, les prévisions relatives à la capacité de production d'énergie renouvelable restent nettement inférieures au niveau requis pour le *scénario zéro émissions* en 2050. Selon l'IEA (2021), les ajouts annuels moyens pour l'énergie solaire photovoltaïque doivent presque doubler au cours des cinq prochaines années par rapport aux prévisions du scénario principal (alors que le solaire photovoltaïque est déjà l'une des technologies les plus compétitives sur le marché). Même constat du côté de l'éolien, les capacités de production doivent plus que doubler pour atteindre le scénario zéro émissions (Fig. 8). Bien que les coûts de production de l'énergie éolienne terrestre soient moins élevés que ceux des combustibles fossiles dans la plupart des pays, des obstacles non économiques, notamment l'octroi de permis de construction et l'acceptation sociale, empêchent une expansion plus rapide. De son côté, l'hydroélectricité (y compris les projets de pompage-turbinage) est également confrontée à des obstacles non économiques et à des problèmes de configuration du marché. Enfin, d'autres sources d'énergie renouvelables, telles que la biomasse et la géothermie, peuvent également fournir de l'électricité renouvelable, mais le soutien politique reste limité et les coûts demeurent nettement supérieurs à ceux des sources d'énergie renouvelables variables. Au final, pour atteindre le niveau zéro net émissions, il semblerait qu'il faille déployer un portefeuille de toutes les technologies renouvelables, y compris celles qui peuvent fournir de l'électricité à faible teneur en carbone.

Figure 8 : Ajouts annuels moyens de capacité par technologie, réels, prévisions et scénario "Net Zero" de l'AIE, 2015-2026



Source : IEA (2021)

Méthodologie : scénariser les transitions énergétiques

L'architecture du système énergétique mondial est principalement caractérisée par sa rigidité (il est organisé autour de lourdes infrastructures qui acheminent l'énergie depuis le gisement jusqu'au consommateur final) et la place occupée par les énergies fossiles (il est alimenté à plus de 80 % par les trois grandes énergies polluantes que sont le pétrole (31 %), le charbon (29 %) et le gaz naturel (22 %)). L'évolution vers un mix énergétique émettant moins de gaz à effet de serre prendra donc du temps. Or, le réchauffement climatique tend à rappeler certains faits et certaines échéances à tenir. L'accord de Paris sur le réchauffement climatique entré en vigueur le 4 novembre 2016 et approuvé et signé par 197 pays (en 2020), visait à maintenir l'augmentation de la température mondiale à un niveau bien inférieur à 2 degrés Celsius par rapport aux niveaux préindustriels. En 2021, ces mêmes pays se sont retrouvés à la COP 26 de Glasgow pour accélérer leurs efforts et arriver à un nouveau consensus pour un plan d'actions face aux risques du changement climatique. Malgré l'écart entre les objectifs ambitieux inscrits dans le texte du projet de décision finale et la réalité (Jouzel, 2021), la COP 26 a mis au centre des débats, la fin programmée des énergies fossiles (notamment la suppression progressive du charbon et des subventions aux énergies fossiles) mais également les relations entre les pays Nord et les pays du Sud (Alvares, 2021). L'ensemble de ces résolutions se sont basées sur le nouveau rapport du GIEC (2021) mais également sur les scénarios développés par l'Agence Internationale de l'Énergie (IAE, 2020, 2021) ou encore le Conseil Mondial de l'Énergie (CME, 2020). D'une certaine manière, les scénarios de transitions énergétiques à l'horizon 2050 sont des images projetées sur l'avenir, et donc dépendants des volontés des décideurs politiques (IEA, 2019).

Si un scénario comporte la description d'un futur et décrit les moyens nécessaires pour atteindre des objectifs (2050), il existe tout un appareillage méthodologique qu'il convient de mobiliser afin que le scénario soit intégré à la structure d'un modèle, aux hypothèses qui engageront la société à consentir des efforts pour réduire sa consommation d'énergie. Ce sont ces apports que nous souhaitons aborder dans ce qui suit. Les scénarios constituent une étape importante dans un modèle. Tout d'abord, ils complètent de longs développements liés à la structure du modèle. Ensuite, ils permettent de rappeler qu'un modèle est avant tout utile, c'est un outil d'aide à la décision. Enfin, ils introduisent une démarche prospective, une manière de penser l'avenir.

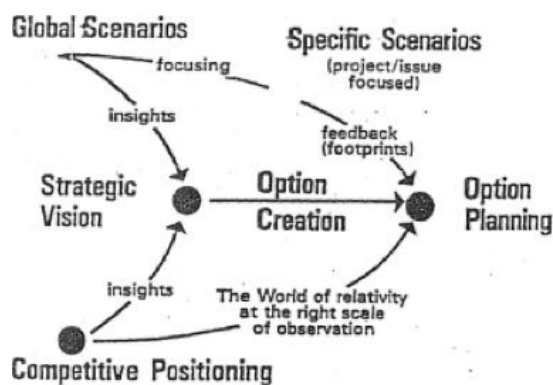
La littérature sur les scénarios s'appuie principalement sur quatre approches complémentaires et interdépendantes : *le scenario planning* (Wack, 1985), *la prospective* (Godet, 1990, 1994), la méthode des *Three Horizons* (Curry, Hodgson, 2008) et *les Narrative Shared Socioeconomic Pathways* (Kleger & al., 2013 ; O'Neil et al., 2014-2017).

Le Scenario Planning

Ce que l'on a coutume d'appeler en anglais "Scenario Planning" a été développé par Pierre Wack dans les années 1960 - 1970 pour la société Shell juste avant la grande crise pétrolière de 1973-1974. Le défi posé aux dirigeants de la société Shell était simple : que se passerait-il si le monde était confronté à une crise pétrolière ? : " *In the 1960s a pioneering team of economists, engineers and scientists had started work on Shell's first scenarios. They looked at how the future might unfold and the impact this could have on the company. By 1973 they had shared these early scenarios with Shell's management, daring them to think the unthinkable : What if the world faced an oil crisis ?*" (Shell, 2012, p. 8). Lorsque la guerre du Kippour éclate en octobre 1973, le soutien de l'Occident à Israël provoque la colère des États arabes riches en pétrole et déclenche un embargo pétrolier (Daures, Frisch, 1974). La pénurie de carburant a provoqué une récession mondiale et un effondrement massif des marchés boursiers (Stoffaes, 1982). Le monde vacille. Mais les décideurs de Shell étaient mentalement préparés au pire parce qu'ils l'avaient déjà imaginé (Jefferson, 2012, Schoemaker, Van Der Heijden, 1993). La croyance générale - que les réserves de pétrole étaient infinies - ne faisait désormais plus partie des hypothèses que les cadres de Shell appliquaient pour comprendre les soubresauts du marché du pétrole (Jefferson, Voudouris, 2011).

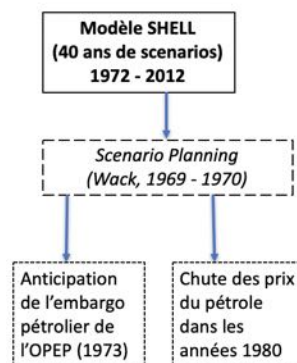
Cette nouvelle perception, ils la doivent principalement à Pierre Wack, surnommé le "Père des scénarios Shell". Dans son article *Scénarios, shootings the rapid*, publié en 1985 par la Harvard Business Review, Wack affirme que " *les scénarios traitent de deux mondes : le monde des faits et le monde des perceptions. Ils explorent les faits mais ciblent les perceptions dans la tête des décideurs*" (1985, p. 140). Leur but est de rassembler et de transformer des informations stratégiquement importantes en nouvelles perceptions. Ce processus de transformation n'est pas anodin, le plus souvent, il ne se produit pas, mais lorsqu'il se produit, il s'agit d'une expérience créative qui débouche sur des visions stratégiques hors de portée de l'esprit. Le scénario planning nous permet d'imaginer différentes possibilités et de développer des plans pour y faire face (Fig. 9).

Figure 9a : Global scenarios



Source : Wack (1984, p. 93)

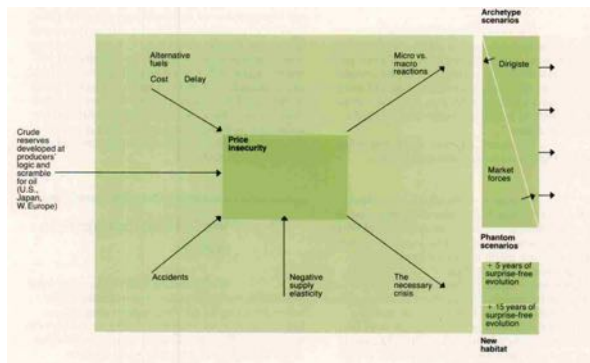
Figure 9b : Shell Model



Source : Les auteurs

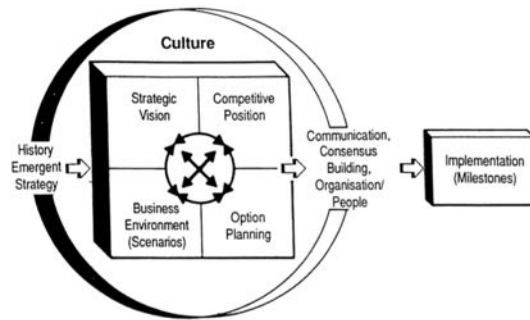
C'est cette approche qui a été développée au sein de la compagnie Shell et qui lui a permis de concevoir les scénarios "as a practical tool for systematic thinking in teams about the future" (Schoemaker, Van Der Heidjen, 2011, p. 166). Les scénarios donnent à une certaine crédibilité de la vision stratégique (sommet de l'entreprise) et fournissent une analyse détaillée à tout un ensemble d'options stratégiques (Fig. 10).

Figure 10a : Scénarios proposés par Wack Shell



Source : Wack (1985, p. 87)

Figure 10b : Les scénarios déclinés par



Source : Schoemaker, Van Der Heidjen (2011, p. 165)

D'un point de vue méthodologique, cette approche met l'accent sur deux points : (i) les scénarios décrivent des mondes différents, et pas seulement des résultats différents dans le même monde, (ii) l'objectif n'est pas tant d'avoir un scénario qui fonctionne, mais d'avoir un ensemble de scénarios qui mettent en évidence les principales forces motrices du système, leurs interrelations et les incertitudes critiques. L'utilisation de scénarios est particulièrement efficace lorsque : (a) l'incertitude est élevée, (b) des changements importants sont prévus, (c) une nouvelle stratégie à long terme a été conçue, (d) l'analyse des tâches cognitives révèle un problème récurrent dans un processus en cours, (e) les pratiques de modélisation démontrent un résultat inattendu, ou (f) des perspectives contradictoires conduisent à des attentes radicalement différentes. Cette méthode est d'un grand intérêt lorsque la prise de décision englobe des questions sociales, économiques, politiques, technologiques et environnementales. Le scenario planning permet à un groupe pluridisciplinaire d'identifier les questions centrales à traiter et de construire des récits sur l'avenir qui intègrent le spectre le plus large possible d'incertitudes et de tendances.

Dans ce qui suit, nous définirons un scénario comme (1) une description d'une situation future possible (futur conceptuel), (2) incluant les voies de développement qui peuvent conduire à cette situation future. L'objectif est de générer une orientation concernant les développements futurs à travers certains facteurs clés pertinents (key drivers) et certaines limites (leverage points). Le scénario a tout d'abord une fonction exploratoire (il sert à systématiser et à approfondir la compréhension existante des développements, conditions et influences contemporains). Le processus explore les développements futurs possibles en prenant le présent comme point de départ. La

question centrale est "Et si ?". Mais il peut également avoir une fonction normative, notamment lorsque le scénario est capable de produire un effet transformateur (un environnement futur initialement inconnu peut être transformé en un environnement futur dans lequel les développements sont assemblés en scénarios). Ce processus permet d'identifier des futurs souhaitables ou d'étudier comment réaliser des conditions futures. La question centrale est " Comment y arriver ? ".

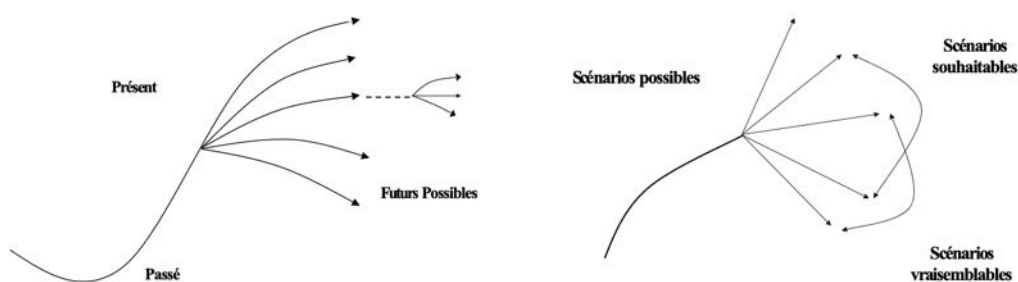
Le scenario planning se présente ainsi comme une technique de prospective utilisée pour l'analyse et la planification stratégiques à moyen et long terme. Elle est utilisée pour développer des politiques et des stratégies qui sont robustes, résilientes, flexibles et innovantes (FHSC, 2009). Les scénarios sont des histoires ou des récits (Schwartz, 1991) se déroulant dans le futur, qui décrivent comment le monde pourrait être, par exemple, en 2050. Ils explorent comment le monde changerait si certaines tendances se renforcent ou s'atténuent (approche que l'on retrouve dans la logique des boucles de polarité en dynamique des systèmes) ou si divers événements se produisent. Normalement, un ensemble de scénarios est proposé (entre deux et cinq) représentant différents futurs possibles, associés à différentes tendances et événements. Ces scénarios sont ensuite utilisés pour examiner ou tester une série de plans et d'options politiques : la conclusion est généralement que différents plans sont susceptibles de mieux fonctionner dans différents scénarios. Les scénarios peuvent également être utilisés pour stimuler le développement de nouvelles politiques, ou comme base d'une vision stratégique. Ils constituent également un moyen utile d'identifier les indicateurs d'alerte précoce qui signalent une évolution vers un certain type d'avenir. À tout moment, il existe un nombre infini de scénarios futurs possibles. Le scenario planning ne tente pas de prédire lesquels se produiront, mais identifie, par le biais d'un processus formel, un ensemble limité d'exemples de futurs possibles qui constituent un point de référence précieux pour évaluer les stratégies actuelles ou en formuler de nouvelles.

La prospective

La prospective, remise au goût du jour par Gaston Berger (1957, 1959), consiste à regarder au loin, à discerner quelque chose en avant : *"Avant d'être une méthode ou une discipline, la prospective est une attitude. C'est-à-dire que l'objectif doit ici précéder le substantif. Le sens de prospectif est évident. Formé de la même manière que rétrospectif, ce mot s'oppose à lui pour signifier que nous regardons en avant et non plus en arrière. Une étude rétrospective se tourne vers le passé, une recherche prospective vers l'avenir"* (1959, p. 20). Pierre Massé ajoute que si c'est une attitude qui refuse tout aussi bien la croyance aveugle que le scepticisme paralysant, la prospective est également *"une méthode qui cherche à se définir par rapport à la Prévision"* (1959, p. 92). Quelques années plus tard, Michel Godet, l'un des ambassadeurs français de la démarche prospective, précisera que *" l'attitude prospective est née d'une révolte de l'esprit contre le joug du déterminisme et le jeu du hasard "* (2007, p. 6). C'est donc tout naturellement qu'elle se présente comme

le rapprochement entre la méthode des scénarios (scenario planning) et la planification stratégique (Strategic planning), permettant aux entreprises de passer de la réflexion prospectiviste à la déclinaison d'actions stratégiques (Godet, 1990). La prospective devient tour à tour une aptitude de l'esprit (combinaison d'imagination et d'anticipation), un comportement (volonté d'agir, refus du fatalisme) et une compétence (elle nécessite l'utilisation d'outils) réunis pour envisager l'avenir plus sereinement. Cette façon de penser l'avenir permet de se situer par rapport au passé et de donner du sens au présent (Fig. 11). En cela, la prospective se distingue de la prophétie (qui appartient aux gourous) et de la prévision (trop teintée de données quantitatives et de tendances extrapolées).

Figure 11 : Scénarios possibles, souhaitables et vrais



Source : Godet (1977, 1994)

Selon Michel Godet (1983), toute réflexion prospective serait influencée par les 7 idées clés suivantes : (1) éclairer l'action présente à la lumière de l'avenir (approche préventive, anticipation des problèmes futurs) ; (2) explorer des futurs multiples et incertains (le futur ne peut être considéré comme une extension du passé) ; (3) adopter une vision globale et systémique² (les phénomènes à étudier sont complexes et interdépendants) ; (4) prendre en compte les facteurs qualitatifs et les stratégies des acteurs ; (5) se rappeler constamment que l'information et la prévision ne sont pas neutres ; (6) adopter le pluralisme et la complémentarité des approches ; (7) remettre en question les idées préconçues.

La prospective, en tant que réflexion pour éclairer l'action présente à la lumière des futurs possibles, impose une certaine anticipation (Hatem, 1993), en raison des effets conjugués de deux forces en présence. D'un côté, l'accélération du changement technique, économique et social nécessite une vision à long terme. De l'autre, les facteurs d'inertie liés aux structures et aux comportements commandent de "semer maintenant pour récolter demain" (Godet, 1993, p. 10). Le plus souvent, les forces du changement et les forces d'inertie s'opposent et génèrent une résistance au

² Michel Godet considère que le mot "prospective" reste indissociable du mot "système" (1977, p. 62). Un système se présente sous la forme d'un ensemble d'éléments en relation. Le tissu relationnel entre les éléments, constitue la structure du système. L'analyse structurelle a pour objet de mettre en lumière la structure entre les variables qualitatives, quantifiables ou non, qui caractérisent le système.

changement. Une démarche prospective est donc nécessaire afin d'éviter que les fortes inerties se transforment en rigidités.

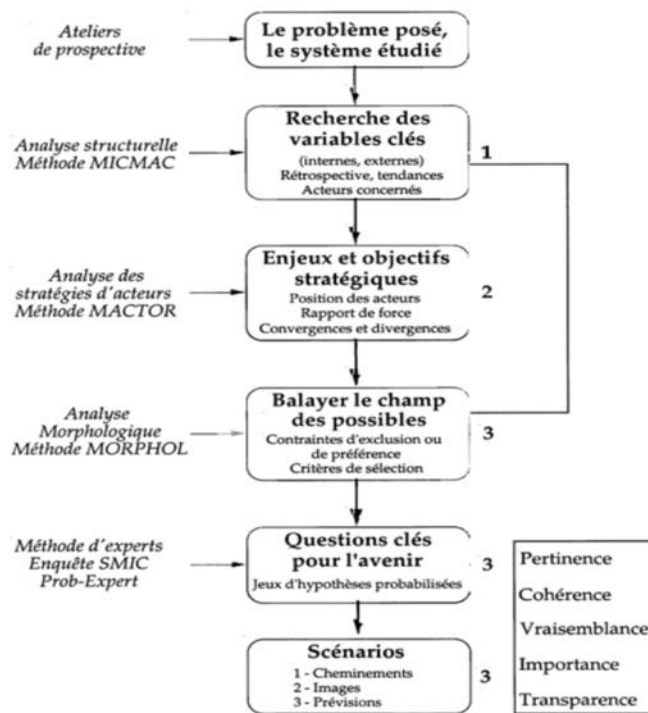
Pour mettre en œuvre une telle démarche, il convient d'utiliser *la méthode des scénarios* (Godet, 1977). Cette dernière tente de concevoir des futurs possibles et d'explorer les chemins qui y mènent. Elle combine deux approches : (i) l'approche littéraire, qui s'attache à construire des scénarios par la réflexion et le raisonnement ; (ii) l'approche formalisée (modèle), qui alimente la réflexion sur les scénarios et permet de vérifier leur validité. Cette approche intégrée comprend deux phases : la construction du noyau (délimitation du système, détermination des variables essentielles, analyse explicative du rôle joué par ces variables) et l'élaboration des scénarios (rapports de forces entre les acteurs, jeux d'hypothèses probabilisées sur certains domaines déterminants, construction de scénarios - scénario de référence et plusieurs scénarios contrastés). La méthode des scénarios consiste "*à rendre les mécanismes d'évolution compatibles avec les jeux d'hypothèses retenus, à décrire de manière cohérente le cheminement entre la situation actuelle et l'horizon choisi, en suivant l'évolution des principales variables du phénomène que l'analyse structurelle avait identifiées*" (Godet, 1983, p. 118). Afin de rendre cette méthode opérationnelle, des outils (applications informatiques) ont été développés à chacune des grandes étapes (Fig. 12) :

- MIMAC : identifier les variables, décrire les relations entre variables et mettre en avant les variables clés, il s'agit d'une analyse structurelle d'un modèle³ ;
- MACTOR : définir les acteurs et comprendre leur stratégie, analyser les influences entre acteurs et évaluer les rapports de force, identifier les enjeux stratégiques et les objectifs associés, positionner chaque acteur sur chaque objectif, identifier les convergences et les divergences, formuler des recommandations stratégiques cohérentes et poser les questions clés pour le futur⁴ ;
- MORPHOL : balayer le champ des possibles et réduire l'incertitude ;
- SMIC : formuler des hypothèses et choisir des experts, probabiliser des scénarios. Il s'agit notamment de mobiliser des techniques d'enquêtes et des séries d'interviews afin d'interroger un panel d'experts (Godet, 1983).

³ L'analyse structurelle comporte trois niveaux de lecture (Godet, 1977) : (i) *L'appréhension* consiste à repérer les frontières du système dans lesquelles le phénomène étudié, considéré comme un sous-système, est impliqué. Cela revient à établir la liste des variables qui caractérisent ce sous-système et son environnement. (ii) *La compréhension* entend recenser définitivement les variables caractérisant le système et repérer leurs relations dans une matrice d'analyse structurelle. (iii) *L'explication* permet de mettre en évidence la structure du système et propose une lecture de la matrice. Cette lecture comprend l'étude des effets directs, l'étude des effets indirects et l'analyse des effets feed-back (de ce point de vue, l'analyse structurelle rejoint les enseignements de la *dynamique des systèmes*, Forrester, 1968).

⁴ La méthode MACTOR a fait l'objet d'un certain nombre d'utilisations (Godet, 2001) : EDF (jeux des acteurs sur la maîtrise des coûts du nucléaire), SNCF (jeux des acteurs sur la concurrence entre modes de transport), la Datar (avenir des espaces ruraux).

Figure 12 : La méthodes des scénarios



Source : Godet (1994, p. 168)

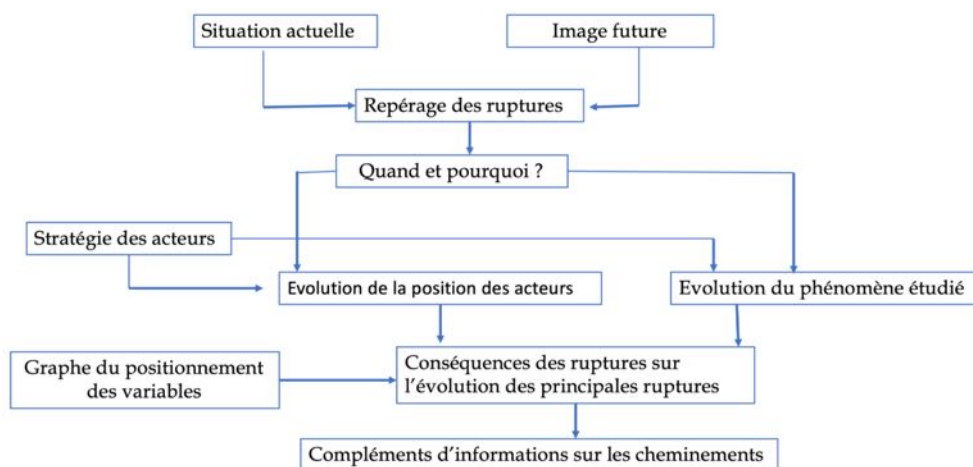
Plus récemment, plusieurs disciplines (Histoire des techniques, sociologie, anthropologie...) sont venues étayer la démarche prospectiviste (Gaudin, 2013, 2005). Une piste intéressante renvoie aux sciences cognitives, plus précisément aux travaux d'Harold Garfinkel (1967, 2007) et d'Edmund Husserl (1913, 1959), rassemblés sous la bannière de la phénoménologie et de l'ethnométhodologie : *"Nous affirmons, à titre de politique de recherche, que la réalité objective des faits sociaux, en tant que réalisation continue des activités concertées de la vie courante... est le thème dominant des recherches en ethnométhodologie. Celles-ci analysent les activités de la vie quotidienne en tant que méthodes des membres pour rendre ces mêmes activités visiblement rationnelles et rapportables à toutes fins pratiques, c'est à dire descriptibles (observables et rapportables) comme organisations des activités ordinaires de tous les jours"* (1967, 2007, p. 45).

La prospective s'apparenterait ainsi à la construction de récits racontables de l'avenir. Comme le précise Thierry Gaudin, le qualificatif de racontable signifie *"qui ne soit pas en contradiction avec les résultats de la science"* mais également *"qui soit intelligible et audible pour le public auquel il s'adresse"* (Gaudin, 2013, p. 5). Au final, la démarche prospective requiert de s'appuyer sur les deux approches mentionnées plus haut. (i) Une étude documentaire visant à définir le problème, à identifier les faits, les variables, les données (économiques, sociales, environnementales, politiques, culturelles...) et les facteurs qui influencent l'avenir. Une matrice Cross-Impact permet de synthétiser les résultats. Des entretiens auprès d'experts extérieurs sont susceptibles de conforter certaines intuitions ou de valider des hypothèses (la méthode Delphi consiste à consulter des experts scientifiques et techniques, et de traiter leurs avis comme des

oracles, faute de pouvoir vérifier la justesse de leurs intuitions). Ces consultations peuvent s'appuyer sur une grille préétablie ou alors sur des entretiens approfondis. (ii) Le passage au scénario via les récits.

Afin d'éviter que les futurs possibles ne soient que de simples extrapolations du passé, Thierry Gaudin propose *un procédé : "la prospective de rupture"* (Papon, 2000). Concrètement, cela revient à distribuer à chaque participant, quatre post-it, en leur demandant d'inscrire sur chacun un facteur de rupture. On recueille les post-it, on les présente à tous les participants, puis on regroupe ceux qui se ressemblent. Un tableau de la perception du changement par le groupe fera généralement apparaître quelques thèmes dominants. Pour chaque thème, un groupe de participants est chargé de l'illustrer par un récit romancé et racontable (au sens de l'ethnométhodologie). Ce qui prendra la forme d'un scénario, sera présenté en deux ou trois pages, puis exposé aux autres groupes. Dans le *Rapport Vigie 2020*, Cécile Désaunay et François de Jouvenel proposent un panorama de 16 scénarios de rupture à l'horizon 2040 - 2050 qui fournissent des esquisses d'un paysage mondial en pleine turbulence. Le rapport explore des ruptures profondes et très probables (le réchauffement climatique, les crises sanitaires, des migrations de masse...) ou des ruptures plus superficielles (restructuration du commerce mondial autour de deux zones de libre-échange, l'apparition de cités- régions autonomes...). Ces scénarios de rupture ne reposent ni sur des prédictions, ni sur des prévisions, ils visent à éclairer le monde dans lequel nous vivons pour nous permettre d'imaginer le monde que nous souhaiterions voir (la figure 13) propose d'intégrer les ruptures entre une situation observée et une image du futur dans la méthode des scénarios proposée par Michel Godet). Ces scénarios, réalisés indépendamment les uns des autres, sont complétés par des récits de fiction qui ouvrent la discussion sur le monde des imaginaires (Atallah [2020] mobilise la science-fiction pour raconter le capitalisme).

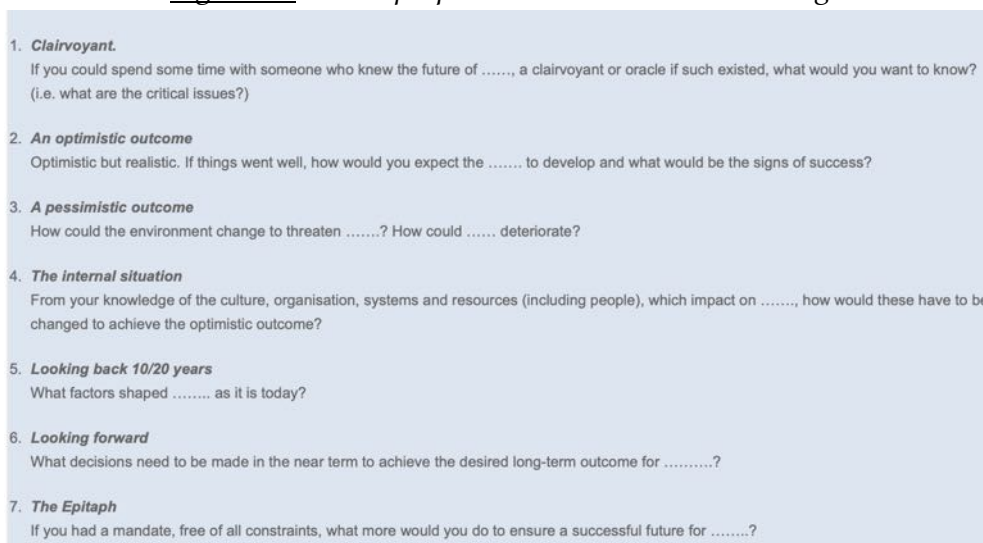
Figure 13 : Scénarios, repérage des ruptures, cheminements



Source : Godet (2000)

Un autre procédé du scénario récit consiste à s'appuyer sur *la technique des 7 questions de SAMI Consulting*. Cette technique a été utilisée à l'origine par Shell pour des examens internes de stratégie. Elle a ensuite été développée pour des applications plus larges lorsque Shell et l'Université de St Andrews ont créé conjointement SAMI Consulting. Les sept questions ont pour objectif d'amener les participants à sortir du rôle qu'ils ont l'habitude de jouer tous les jours et à initier des déplacements (changement de décor ou de rôle). Il s'agit d'inviter les participants à parler de ce qu'ils considèrent comme important pour le futur, en se plaçant d'un point de vue, clairvoyant, optimiste, pessimiste, de sa situation interne, regard rétrospectif, regard prospectif et de l'épithète (Fig. 14).

Figure 14 : Les sept questions de SAMI Consulting

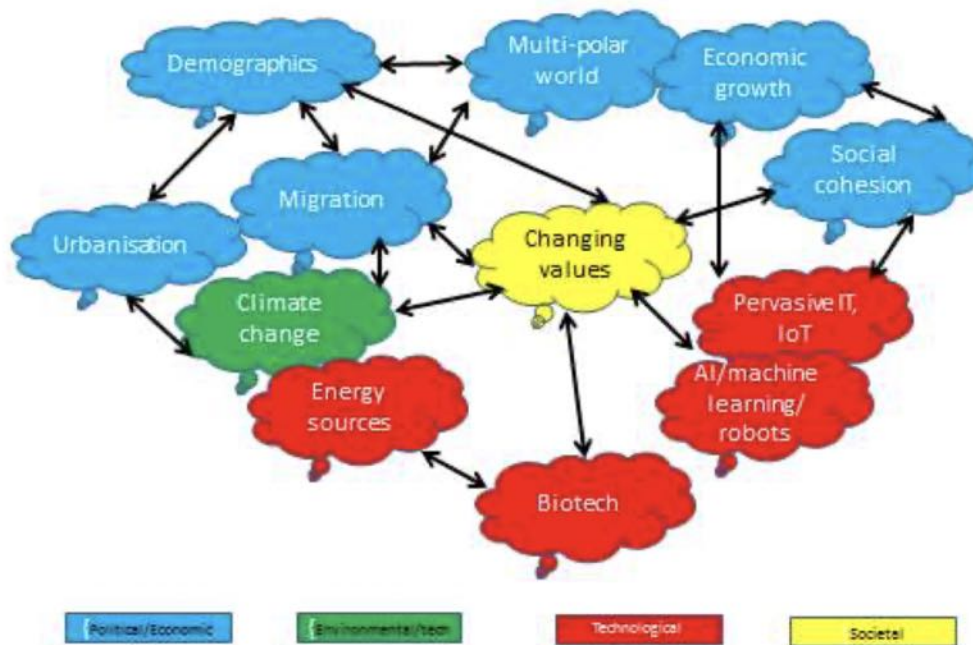


Source : <https://samiconsulting.co.uk/techniques-seven-questions/>

Une fois, l'approche documentaire et le scénario combinés, il est possible d'identifier les facteurs clés de changement importants dans une réflexion prospective. Duckworth, Dunn, Ringland, Schultz et Williams (2018) ont identifié 12 facteurs de changement majeurs (démographie, monde multipolaire, croissance économique, cohésion sociale, changement climatique et environnemental, sources d'énergie, généralisation des technologies de l'information, présence des machines d'apprentissage, biotechnologie, migrations, urbanisation et changements dans les valeurs personnelles) qui relèvent des domaines économique, environnemental, technologique et sociétal (Fig. 15).

Pour chacun de ces moteurs, il est possible d'examiner l'effet qu'il a aujourd'hui, en 2030 et en 2050. L'analyse des facteurs de changement permet de répondre aux deux questions suivantes : (1) quelle est la compatibilité d'un scénario avec le contexte économique, environnemental, technologique et sociétal que l'on observe ? (2) quels sont les présupposés non exprimés dans un scénario relatif à la dynamique observée ? En d'autres termes, qu'est ce qui fait changer les choses, pourquoi et comment ?

Figure 15 : Les 12 facteurs de changements majeurs dans une réflexion prospective

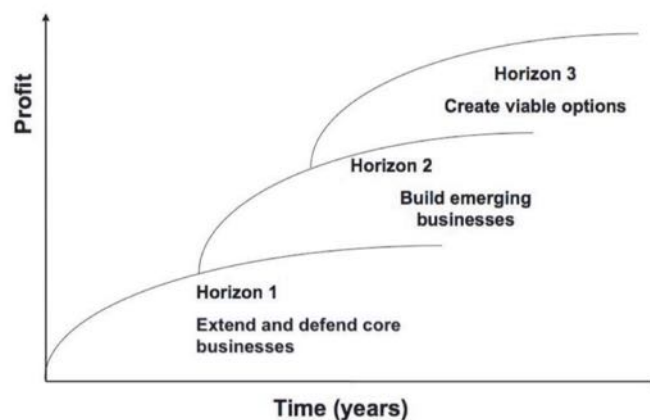


Source : Duckworth, Dunn, Ringland, Schultz, Williams (2008, p. 3)

La méthode des Three Horizons

Le modèle Three Horizons a été présenté pour la première fois dans un ouvrage de Mehrdad Baghai, Stephen Coley et David White (1999), *The Alchemy of Growth*. Les auteurs proposaient aux managers de s'engager simultanément dans des perspectives à court, moyen et long terme (Diemer, 2021), présentées comme une série de courbes évolutives, chacune ayant plus de valeur que la précédente (Fig. 16).

Figure 16 : Le modèle Three Horizons

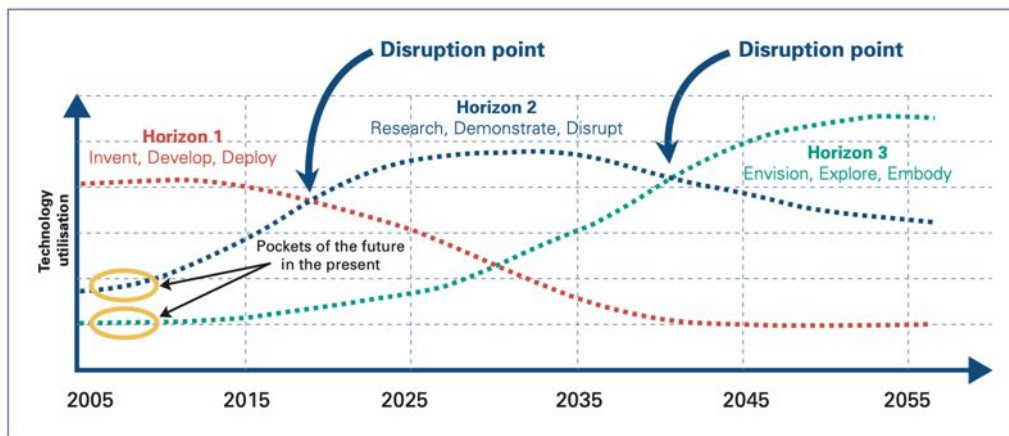


Source : Mehrdad, Coley & White (1999)

Par la suite, le modèle a été adapté par Sharpe et Hodgson (2006) afin de répondre à la demande du gouvernement britannique qui souhaitait lancer un projet de prospective pour les systèmes d'infrastructures intelligents. Il s'agissait notamment de répondre à la question suivante : comment mettre en place une feuille de route technologique sur longue période (50 ans) dans laquelle les technologies ne pouvaient pas être décrites mais où leurs caractéristiques (probables) pouvaient être identifiées ou anticipées : *"how science and technology could, over the next 50 years, be used to deliver infrastructure for transport, and its alternatives, that would be sustainable, robust and safe"* (Sharpe, Hodgson, 2006, p. 1).

L'étude comportait une modification importante du modèle. Plutôt que de reprendre les horizons sous la forme de vagues d'évolution successives, ils ont préféré caractériser les trois horizons comme existant en parallèle, mais avec différents niveaux d'influence sociale et publique (Fig. 17).

Figure 17 : Three Horizons pour anticiper les développements technologiques



Source : Sharpe & Hodgson (2006, p. 3)

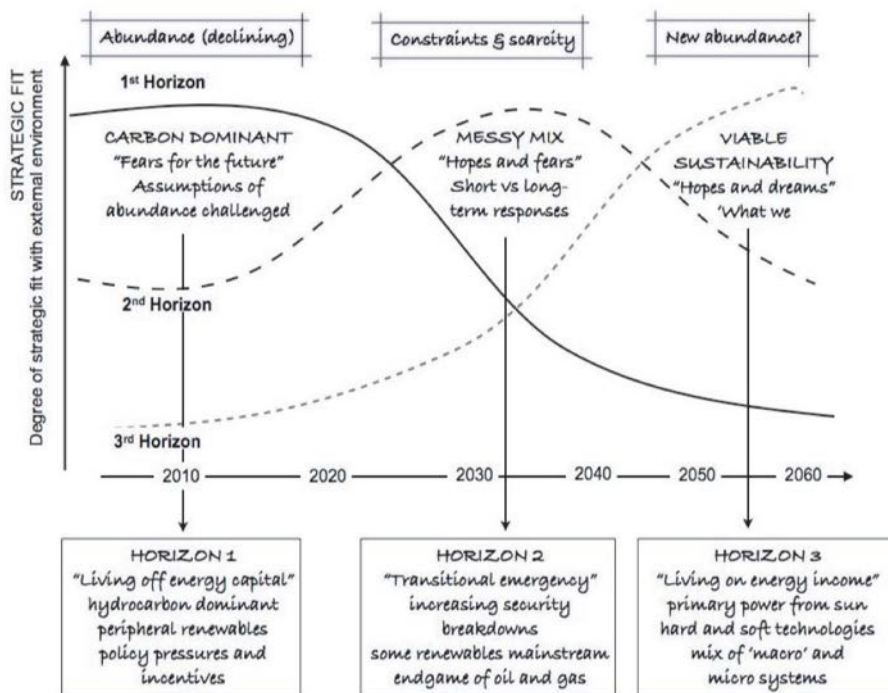
L'horizon 1 (Inventer, développer, déployer) qui se situe à environ une décennie dans le futur, couvre le déploiement de capacités techniques nouvelles (mais comprises) pour résoudre les problèmes et saisir les opportunités au sein des systèmes sociotechniques dominants. Il peut encore impliquer de nouvelles inventions, toutefois ces dernières font partie de l'art connu par les experts du domaine (exemple de l'application de la loi de Moore à l'industrie des semi-conducteurs : le nombre de composants sur les puces doublera tous les 18 mois environ).

L'horizon 2 (Recherche, Démonstration, Perturbation) qui se situe à environ 25 ans dans le futur, considère que de nouveaux modèles d'utilisation des technologies vont perturber le statu quo. Les découvertes peuvent survenir à tout moment, redéfinissant le sens du possible (exemple de l'émergence du World Wide Web). La validité de la vision prospective de l'horizon 2 repose en grande partie sur la recherche scientifique évaluée par les pairs et la culture des grands défis.

L'horizon 3 (Envisager, Explorer, Incarner), qui se situe à environ 50 ans dans le futur, stipule que nous cherchons à regarder au-delà de l'horizon de la science connue et donc à imaginer des inventions imprévisibles. Ceci peut générer une discontinuité fondamentale dans l'histoire (exemple de l'intelligence artificielle). L'horizon 3 suppose l'exploration d'un territoire inconnu, l'usage d'une carte précisant notre engagement à atteindre un objectif (ou un résultat) avec des ressources importantes. Ce type de vision est résolument tourné vers l'avenir cependant il est également possible de faire entrer l'avenir dans le présent de telle sorte qu'il attire la recherche et l'invention autour de lui, en vue d'atteindre de nouveaux objectifs (exemple d'une communauté urbaine à 100% énergie propre). Ces objectifs sont finalement des objectifs sociaux qui influencent l'orientation du développement technologique.

Par la suite, la méthode est devenue un outil permettant de comprendre la relation entre les conditions initiales (instant T0) et les mondes dépeints dans les 50 prochaines années. Ceci afin de s'assurer que les changements probables des différents éléments du système global représentés dans chaque scénario étaient plausibles (Curry, Hodgson, Kelnar, Wilson, 2006). Le modèle Three Horizons a été utilisé de manière plus extensive sur une série de problèmes du futur (notamment la mise en place des ODD, Collste & al., 2019). Le diagramme ci-dessous (Fig. 18) présente une application du modèle Three Horizons à la question de la sécurité énergétique (Sharpe, Hodgson, Page, 2006).

Figure 18 : Three Horizons and Energy Security



Source : Sharpe, Hodgson, Page (2006), Curry, Hodgson (2008)

L'horizon 1, décrit par Sharpe, Hodgson et Page (2006), est essentiellement négatif. Les hypothèses sous-jacentes d'abondance énergétique qui l'ont façonné sont remises en question. Cela crée un espace dans lequel le changement est largement considéré comme inévitable, mais il n'y a pas d'accord sur le type de changement.

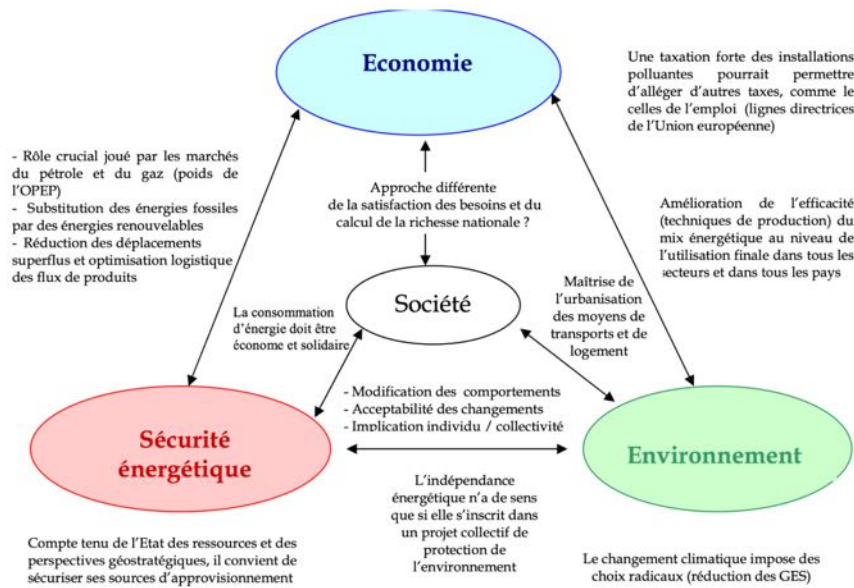
L'horizon 2 est l'avenir émergent à court et moyen terme, dans lequel nous connaissons les limites de notre situation, mais nous ne disposons pas des ressources nécessaires pour y répondre efficacement. L'accord politique est faible, la technologie est immature.

L'horizon 3 représente une articulation d'un futur possible dans lequel les limitations ont été surmontées. Il s'agit d'une vision positive de l'avenir (exemple d'un monde à 100% énergie renouvelable). Mais ce n'est pas un point de vue universellement partagé. D'autres défendent des versions concurrentes au scénario d'Horizon 3 (par exemple, le thorium, plus abondant que l'uranium, est présenté comme le nucléaire propre, ce qui relance les projets d'investissement dans le nucléaire).

Replacée dans un contexte plus actualisé (2050), l'articulation entre les trois horizons permet de visualiser les enjeux en matière de choix énergétiques. Dès lors que l'on se trouve dans l'horizon 1, on peut appréhender aux abords de ses limites, les éléments des futurs systèmes de l'horizon 3. Il s'agira notamment des technologies émergentes, des institutions sociales alternatives possibles et des modèles économiques différents. Cependant, ces éléments sont confrontés à deux défis s'ils doivent remplacer le système dominant représenté par l'horizon 1. Le premier est qu'ils doivent être mieux développés et mieux connectés, en montrant notamment qu'ils peuvent fonctionner à l'échelle sociale requise. Le second est qu'ils doivent gagner une bataille de valeurs sur le futur système d'approvisionnement énergétique. Dans l'horizon 2, il y a des conflits entre des groupes qui attachent des valeurs différentes au problème (sécurité d'approvisionnement vs résilience vs impact carbone vs prix bas vs sobriété). Les informations dont disposent tous les groupes sur l'avenir sont nécessairement incomplètes et, par conséquent, les revendications d'un groupe en faveur de l'avenir qu'il préfère sont inévitablement remises en question par les autres (on retrouve ici les principales oppositions : pro/anti-nucléaire, abandon définitif ou réduction du charbon, pro - anti hydrogène ...).

Par ailleurs, la concurrence entre ces valeurs est également influencée par les valeurs et les hypothèses qui ont forgé le système de l'horizon 1, car un système dominant ne disparaît pas, il ne s'estompe que lentement. Ces voix se font encore entendre avec force dans l'horizon 2. Ainsi, la nécessité de maintenir la sécurité de l'approvisionnement en énergie (Fig. 19) est souvent considérée comme un prérequis politique, toutefois elle a également profondément modifié le cadre conceptuel du développement durable (Diemer, 2008).

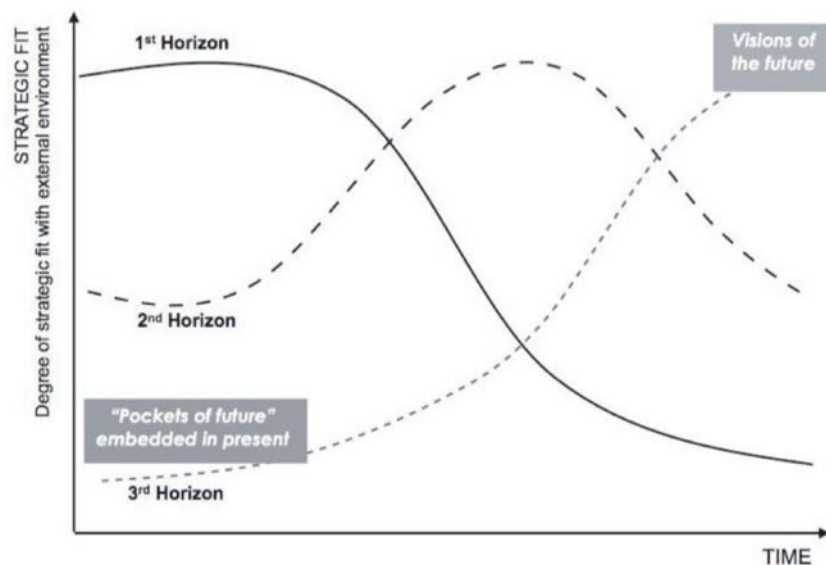
Figure 19 : La sécurité énergétique au prisme du développement durable



Source : Diemer (2008, p. 6)

Pour conclure, notons qu'explorer le futur par l'approche des Three Horizons, revient à les présenter sur un axe composé du temps en abscisse et du niveau d'adéquation stratégique avec l'environnement externe (de l'organisation ou du réseau) en ordonnée (Fig. 20). Ce dernier peut également être évalué en termes de degré d'acceptation des idées au sein de la société dans son ensemble (cela renvoie aux normes politiques, économiques, organisationnelles et culturelles ancrées dans une organisation ou un réseau).

Figure 20 : Le futur via l'approche des Three Horizons



Source : Curry, Hodgson (2008, p. 4)

L'horizon 1, à son extrémité gauche, est le monde dans lequel nous nous trouvons aujourd'hui, c'est la manière dont il est exprimé et représenté dans le discours dominant. La courbe en S qui s'éloigne vers la droite représente l'échec de tout modèle s'il ne s'adapte pas au changement, ce qui est, bien sûr, un aspect important de la théorie des systèmes ouverts. L'horizon 3, en revanche, représente un monde qui est souhaité par ceux qui proposent un modèle alternatif (un nouveau cadre politique, culturel ou institutionnel, un paradigme différent). En se projetant vers l'avenir, l'horizon 3 présente des propositions de transformation et changement profonds. Dans le présent, ces propositions peuvent être considérées comme des questions émergentes, et les preuves de leur existence sont protéiformes (groupes de militants, étude de faisabilité d'une agence, projections d'un institut de recherche, stratégie d'une entreprise...). En raison de sa nature (changement de cap), la trajectoire de l'horizon 3 est profondément influencée par les valeurs et d'une certaine manière, par une vision utopique de l'avenir. Dans l'horizon 2, nous parvenons à saisir ce qui est attendu dans l'horizon 3 et ce qui est mis en œuvre dans l'horizon 1. Dans le cas de l'énergie, les conflits peuvent porter sur des termes (énergie verte et énergie propre, énergie décentralisée et énergie centralisée, efficacité énergétique et sobriété énergétique, systèmes énergétiques autonomes et systèmes énergétiques intégrés).

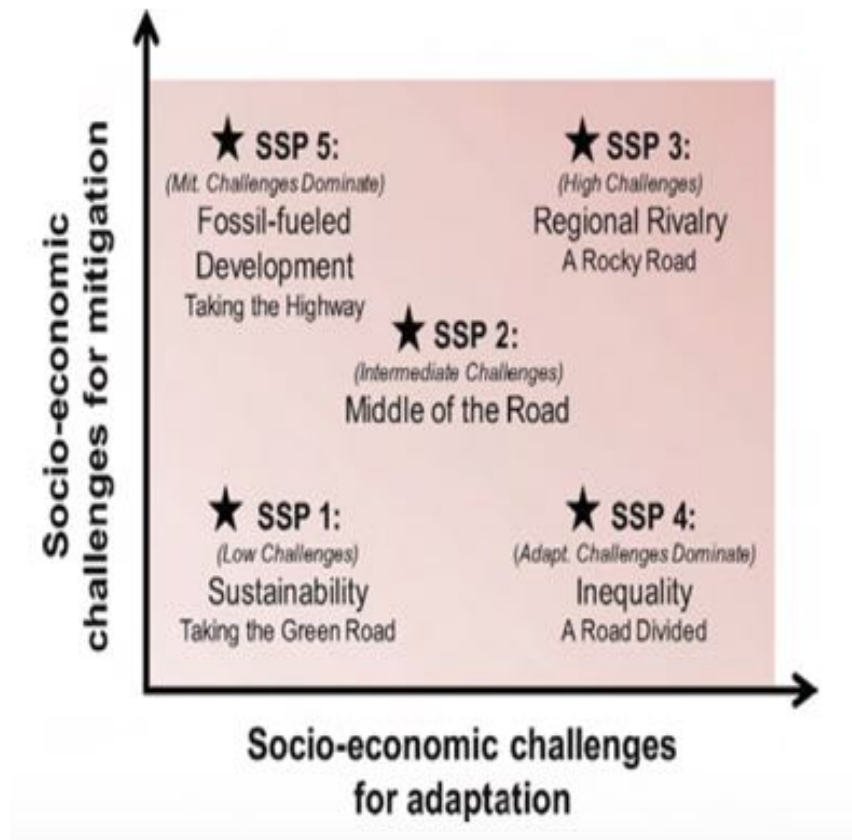
Les Narratives for Shared Socioeconomic Pathways

Les Narratives for Shared Socioeconomic Pathways (NSSP) constituent le nouveau cadre de scénario qui est utilisé ces dernières années dans les travaux sur le changement climatique. Les Shared Socioeconomic Pathways (SSP) sont définis comme " *des voies de référence décrivant des tendances alternatives plausibles dans l'évolution de la société et des écosystèmes sur une échelle de temps d'un siècle, en l'absence de changement climatique ou de politiques climatiques* " (O'Neill, 2014, p. 387). Ils se composent de deux éléments : (i) un scénario narratif et (ii) un ensemble de mesures quantifiées. Les SSP sont dits de référence, dans le sens où ils supposent l'absence de changement climatique ou d'impacts climatiques, et l'absence de nouvelles politiques climatiques. Le but ultime du processus global de développement de scénarios est de produire des scénarios intégrés qui incluront les aspects socio-économiques et environnementaux.

L'une des questions clés de ce processus est de savoir comment sélectionner un ensemble limité de SSP pour servir le plus efficacement possible les objectifs présents dans l'architecture de la matrice de scénarios. Deux approches sont généralement adoptées. La première combine un petit nombre de facteurs socio-économiques clés en un ensemble de trajectoires plausibles mettant en évidence les différentes directions dans lesquelles le monde pourrait évoluer (Nakicenovic et al., 2000). La seconde adopte l'approche inverse de la première, en identifiant d'abord les résultats qui intéressent la recherche sur le changement climatique, puis les combinaisons de facteurs socio-économiques clés qui sont susceptibles de produire ces résultats, (Raskin et al. 1998). O'Neil et al (2014, 2017) ont utilisé cette dernière approche pour

s'assurer que le choix des SSP produisait un ensemble de voies de développement aussi pertinentes que possibles pour l'objectif du cadre de scénarios (qui est d'explorer l'incertitude de l'atténuation, de l'adaptation et des impacts associés aux changements climatiques et socio-économiques). Pour ce faire, les auteurs ont défini un espace de résultats dans lequel les défis socio-économiques et environnementaux sont représentés sur deux axes : un axe décrit les défis liés à l'adaptation, l'autre les défis liés à l'atténuation (l'espace de défis à couvrir par les SSP est divisé en cinq "domaines" avec un SSP situé dans chaque domaine, représenté par une étoile). L'hypothèse ici est que pour caractériser les incertitudes relatives aux implications du changement climatique en matière d'atténuation ou d'adaptation, il est nécessaire de décrire les conditions socio-économiques futures qui rendraient l'atténuation et l'adaptation relativement difficiles ou relativement faciles (O'Neill, 2017). Dans les axes de la figure 16, le terme socio-économique représente un large éventail d'aspects de la société, qui renvoie aux systèmes socio-écologiques. Il s'agit notamment des aspects démographiques, politiques, sociaux et culturels, des aspects institutionnels, du mode de vie, de l'économie et de la technologie, ainsi que des conditions des écosystèmes et des services écosystémiques qui ont été affectés par l'activité humaine, comme la qualité de l'air et de l'eau, la biodiversité, ainsi que la forme et la fonction des écosystèmes.

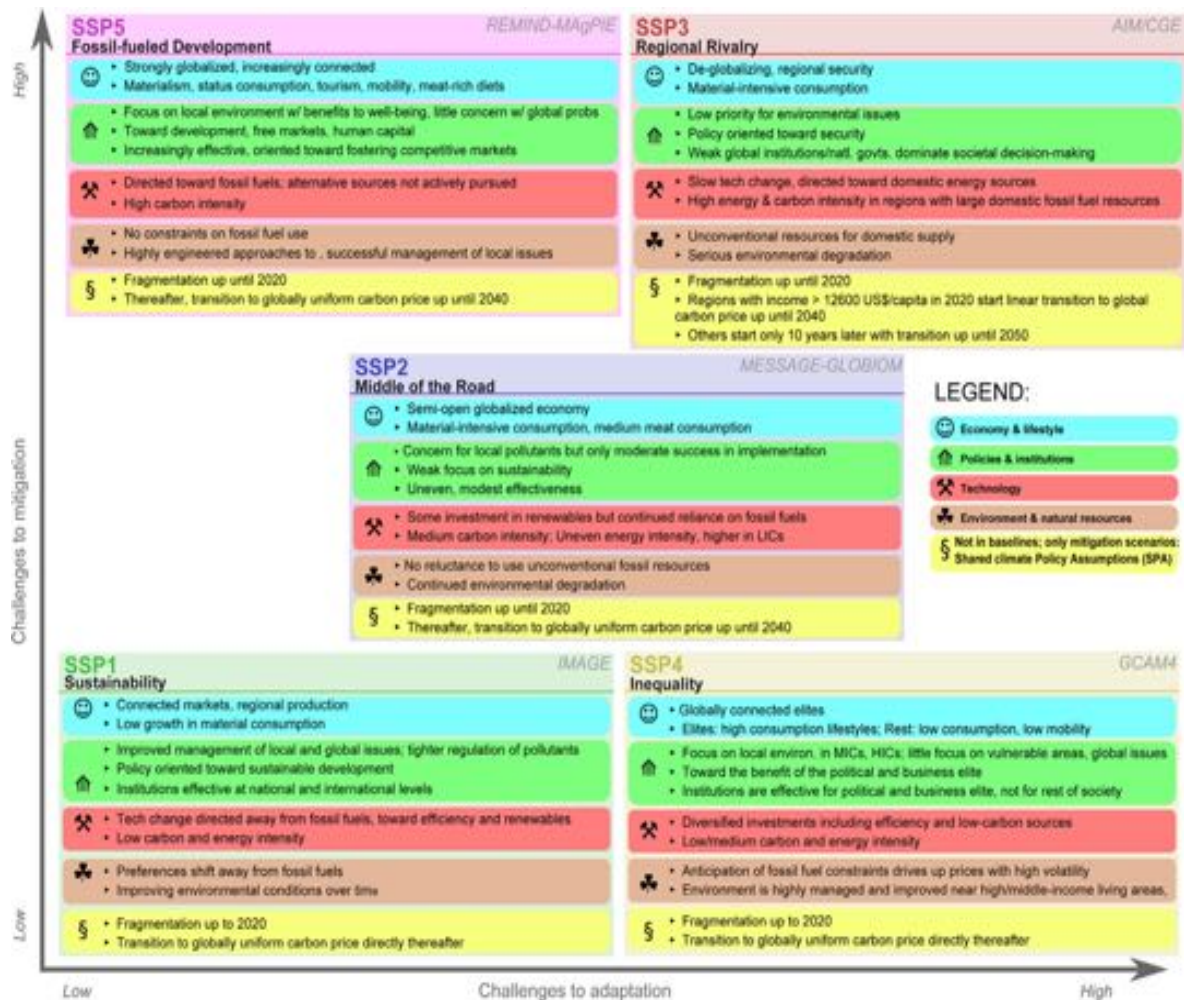
Figure 21 : Les trajectoires socio-économiques partagées appliquées au couple climat - énergie



Source : O'Neil et al. (2014, p. 391)

Cinq SSPs différents ont été proposés pour couvrir l'espace des défis d'adaptation et d'atténuation (voir figure 22).

Figure 22 : l'identification d'éléments et d'hypothèses narratifs spécifiques



Source : Bauer and al. (2017)

Pour chaque axe de défis, un ensemble de déterminants ont été identifiés par les experts des communautés IAM (Integrated Assessment Models). Six grandes familles de variables ont été jugées importantes à prendre en considération dans les SSP : démographie, développement humain, économie et mode de vie, politiques et institutions (à l'exclusion des politiques climatiques), technologie, environnement et ressources naturelles. Pour les principaux facteurs des défis à l'atténuation, il est fait référence aux facteurs d'utilisation de l'énergie et des terres, au progrès technologique et aux institutions politiques internationales. Dans le cas des défis à l'adaptation, les facteurs institutionnels, l'inégalité future et la pauvreté ainsi que la réalisation ou l'échec possible dans la réalisation des différents objectifs de développement sont considérés comme les variables les plus pertinentes.

Dans le contexte de la nouvelle génération de scénarios, les NSSPs décrivent des mondes qui relèvent les défis d'atténuation et d'adaptation qui sont en liens avec les facteurs de la société, et non avec ceux en lien avec l'ampleur du changement climatique ou à la rigueur de la politique d'atténuation (facteurs qui ne sont pas inclus dans les SSP). Les NSSPs décrivent ainsi des mondes qui ont des défis variés en matière d'atténuation et d'adaptation, construits à partir de déterminants importants associés à des enjeux environnementaux et sociaux économiques. Prises ensemble, ces considérations impliquent une méthode itérative entre les caractéristiques souhaitées des récits complets et l'identification d'éléments et d'hypothèses narratifs spécifiques (Fig. 23).

Figure 23 : l'identification d'éléments et d'hypothèses narratifs spécifiques

Scénario	Narratif	Défi pour l'atténuation	Défi pour l'adaptation
SSP1 Développement durable	Forte coopération internationale, priorité donnée au développement durable, amélioration des conditions de vie et préférences des consommateurs pour des biens et services respectueux de l'environnement, peu intensifs en ressources et en énergie.	Faible	Faible
SSP2 Poursuite des tendances	Les tendances sociales, économiques et technologiques actuelles se poursuivent, le développement et la croissance progressent de manière inégale selon les pays et les régions. Les institutions nationales et internationales œuvrent à la réalisation des objectifs de développement durable qui progresse lentement. L'environnement se dégrade malgré un développement moins intensif en ressources et en énergie.	Moyen	Moyen
SSP3 Rivalités régionales	Résurgence des nationalismes, développement économique lent, persistance des inégalités et des conflits régionaux. Les pays sont guidés par des préoccupations en matière de sécurité et de compétitivité. Ils se concentrent sur les problèmes nationaux voire régionaux et sur les enjeux de sécurité alimentaire et énergétique. Faible priorité internationale pour la protection de l'environnement, qui se dégrade fortement dans certaines régions.	Elevé	Elevé
SSP4 Inégalités	Développement marqué par de fortes inégalités entre et à l'intérieur des pays. Dégradation de la cohésion sociale et multiplication des conflits. Fossé croissant entre une élite connectée et mondialisée, responsable de la majorité des émissions de GES, et un ensemble fragmenté de populations à faible revenu, peu éduqué et vulnérable au changement climatique. Le secteur énergétique se diversifie entre sources d'énergie fortement carbonées et décarbonées. Les politiques environnementales se concentrent sur les enjeux locaux.	Faible	Elevé
SSP5 Développement conventionnel	Développement adossé à l'exploitation forte des énergies fossiles et marqué par des investissements élevés dans la santé, l'éducation et les nouvelles technologies. Adoption de modes de vie intensifs en ressources et en énergie à travers le monde. La croissance économique et le progrès technologique sont élevés. Les problèmes de pollution locale sont bien gérés et l'adaptation est facilitée notamment grâce au recul de la pauvreté.	Elevé	Faible

Source : Riahi et al. (2017), O'Neill et al. (2015), Bauer et al. (2017)

Quatre récits (SSP1, SSP3, SSP4, SSP5) décrivent des défis élevés ou faibles à l'adaptation et à l'atténuation, correspondant à des développements de trajectoire SSP justifié. Le récit (SSP2) est central, il décrit des défis d'atténuation et d'adaptation modérés. Ce cinquième scénario occupe une place importante dans les NSSPs, la plupart des approches proposées auparavant pour concevoir des scénarios préconisaient un nombre pair pour décourager l'utilisation d'un seul scénario comme cas central (Kok et al., 2006). Ce qui a été en soi un échec, puisque l'utilisateur sélectionnait automatiquement un scénario comme « le plus probable » ou « le plus proche d'une référence de modèle ».

Le scénario central a été proposé, non pas pour qu'il soit considéré comme le plus probable parmi les cinq autres, mais pour garantir que les autres scénarios SSP occupent l'espace leur correspondant sans pour autant dériver vers la partie médiane de l'espace. Ceci reste vrai, si on se réfère à l'évolution historique des émissions de GES qui a souvent suivi des trajectoires proches de la limite supérieure de la fourchette des scénarios d'émissions antérieurs, tels que ceux du SRS (Second Report on Emission Scenario, Nakicenovic et al., 2000).

Le SSP1 : situé dans la partie inférieure de l'axe des abscisses de défi pour l'adaptation et la partie inférieure de l'axe des ordonnées pour le défi de l'atténuation, le SSP1 reste le scénario le plus optimiste. Il décrit un monde qui se dirige vers un développement économique durable et respectueux de l'environnement. Un monde où on verra moins d'inégalité entre les nations. Il y aura moins de consommations de biens matériels.

Le SSP2 : est le scénario medium qui décrit un monde qui restera sur les tendances actuelles. Les institutions mondiales et nationales continuent à déployer des efforts pour la protection de l'environnement et le développement durable mais le bilan restera insuffisant pour atteindre les objectifs du développement durable (ODD). La dégradation des milieux naturels se poursuit, les inégalités de revenus persistent et des défis majeurs continuent à se faire sentir (vulnérabilités des changements sociétaux et environnementaux).

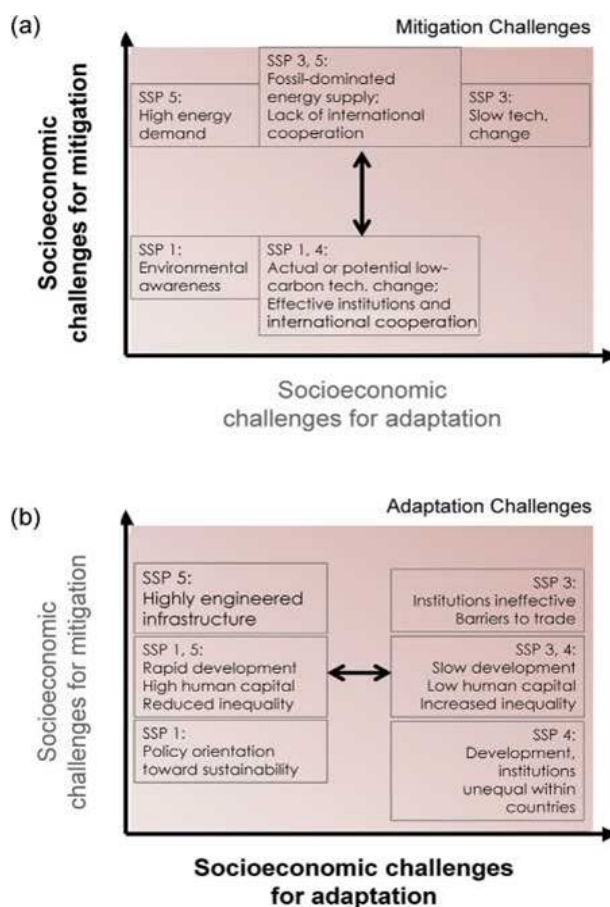
Le SSP3 : dessine une trajectoire cahoteuse dans laquelle le monde sera marqué par la rivalité régionale et les conséquences qui en découlent. Les nationaux se concentreront sur les questions de sécurité interne à l'échelle nationale et régionale. Cet état de fait impactera la croissance économique dont l'évolution sera lente et non respectueuse de la protection de l'environnement.

Le SSP4 est celui de la trajectoire divisée par les inégalités entre les nations et au sein de ces mêmes nations. C'est le scénario qui se place à droite du graphique, une petite élite mondiale serait responsable de l'essentiel des émissions de GES, ce qui rend les politiques d'atténuation plus facile à mettre en place tandis que la plus grande partie de la population resterait pauvre et vulnérable au changement climatique.

Le SSP5 est à l'opposé du SSP1. C'est le scénario le plus défavorable qui dessine un horizon dans lequel le monde est caractérisé par une croissance rapide, fondée sur une forte consommation d'énergie fossile polluante et des technologies émettrices de carbone. La hausse du niveau de vie permet en revanche d'augmenter la capacité d'adaptation.

Au regard des résultats des défis d'adaptation et d'atténuation décrits ci-dessus pour chaque SSP, il apparaît clair qu'une étroite relation existe entre les cinq scénarios et par conséquent il reste important de les considérer dans une dimension systémique.

Figure 25 : Les combinaisons particulières de défis représentés par chaque SSP



La figure 25 est un résumé des éléments du SSP qui contribuent à des défis élevés ou faibles à l'atténuation (a) et à l'adaptation (b). Les éléments répertoriés vers le haut ou le bas de l'espace des défis dans la figure (a) s'appliquent aux voies avec des défis élevés ou faibles à l'atténuation, respectivement, tandis que les éléments énumérés vers le côté gauche ou droit de l'espace des défis dans la figure (b) s'appliquent aux voies avec des défis d'adaptation faibles ou élevés, respectivement.

Exemple : un lien étroit existe entre SSP5 et SSP3 qui contribuent tous les deux à des défis élevés d'atténuation. Ceci est dû à la forte consommation des énergies fossiles pour SSP5 et pour SSP3 due à la rivalité régionale et au manque de capacité de coopération internationale pour la protection de l'environnement. A l'opposé, on observe des faibles défis à l'atténuation entre SSP1 et SSP4, ceci est dû à l'orientation générale vers le développement durable pour le SSP1 et aux fortes inégalités au sein et entre les nations dans le SSP4. De même, de grands défis à l'adaptation sont observés dans le SSP3 suite à des institutions inefficaces et des obstacles au commerce et dans le SSP4, marqué un développement lent et de faibles investissements dans le capital humain. En revanche, les faibles défis à l'adaptation sont justifiés dans le SSP5, caractérisé par un fort développement économique et des infrastructures connexes, et pour SSP1 dont la priorité est donnée au développement durable et à l'amélioration des conditions de vie.

Finalement, les scénarios énergétiques ne sont pas des exercices de prévisions, qui cherchent à prédire l'avenir avec la plus grande précision, mais un exercice chiffré d'exploration des futurs possibles, souhaitables et acceptables (David & al., 2014). La « *force des scénarios est qu'ils ne décrivent pas un seul futur, mais que plusieurs futurs réalisables ou souhaitables sont identifiés en parallèle* » (Mietzner et Reger, 2005, p. 235). Ils renvoient à une représentation possible du futur qui décrit le devenir du système énergétique, de l'économie, voire de la société dans son ensemble, sur une géographie donnée, qui peut être régionale, nationale ou internationale. De ce fait, ils permettent d'identifier **les leviers d'action** nécessaires pour la réalisation de ces visions.

Les scénarios énergétiques des grandes institutions internationales

Les transitions énergétiques sont basées sur des visions et des trajectoires propres à chaque Etat et Nation selon les objectifs de sa politique énergétique et les intérêts qui en découlent. Ces scénarios énergétiques ne sont pas des modèles linéaires constitués d'étapes et de phases structurées et cohérentes, mais ils dépendent d'un certain nombre de variables, parmi lesquelles la stratégie du pays d'origine, les moyens et les approches propres à chaque pays et région. Selon l'*Institut d'Études Stratégiques sur le Pétrole, le Gaz et les Biocarburants* (INEEP, 2020), l'évolution de la géopolitique du pétrole et du gaz naturel serait l'un des critères déterminants dans la définition de la stratégie, ainsi que les politiques des différents pays et de leurs compagnies pétrolières et gazières (le conflit Russe - Ukraine en est une parfaite illustration). Partant de ce postulat, il est possible de distinguer deux tendances mondiales, (i) celle des pays importateurs et (ii) celle des pays exportateurs de pétrole. L'Europe, la Chine et l'Asie qui, suite à leurs fortes dépendances à l'égard des importations de pétrole, stimulent la politique énergétique sur l'utilisation accrue des énergies renouvelables, contrairement aux Etats Unis qui depuis l'avènement de la découverte de gaz de schiste qui leur a permis de passer du statut de pays importateur à un pays exportateur de pétrole concurrençant les pays de l'OPEP dirigé par la Russie et les pays de Moyen orient. Sa politique de décarbonation de son mix énergétique est restée timide, comme en témoigne le rejet de l'accord de Paris, par le Président Donald Trump. Dans ce qui suit, nous examinerons les scénarios proposés par le Conseil Mondial de l'Énergie (CME) et celui de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE).

Les scénarios du Conseil Mondial de l'Énergie

Dans son rapport de 2013, le Conseil Mondial de l'Énergie a proposé deux types de scénarios : le scénario JAZZ - focalisé sur l'équité sociale - donne la priorité (en s'appuyant sur la croissance économique) à l'accès individuel à l'énergie bon marché et le scénario SYMPHONIE, centré sur les enjeux environnementaux grâce à de bonnes pratiques et des politiques internationales coordonnées.

Les 2 scénarios représentent des visions alternatives de l'avenir qui permettent d'explorer différentes hypothèses et de déterminer la robustesse des évolutions potentielles. Si les scénarios les plus fréquents sont normatifs, le Conseil mondial de l'énergie (CME) a adopté une approche exploratoire. Dans ce contexte, « normatif » signifie que les scénarios sont utilisés pour guider le monde vers un objectif précis, par exemple une concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Avec les scénarios exploratoires Jazz et Symphonie, le CME propose aux décideurs un outil neutre, basé sur des faits, qui leur permet de mesurer les impacts potentiels de leurs choix sur l'avenir. Ces scénarios montrent que les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) resteront dominantes en valeur absolue à l'horizon 2050 et occuperont toujours une part importante dans le bouquet énergétique futur, soit 77 % pour le scénario Jazz et 59% pour le scénario symphonie contre 79% en 2010 et ce, malgré les taux de croissance les plus élevés des énergies renouvelables.

Le Conseil Mondial de l'Énergie (CME) révèle également que la consommation mondiale d'énergie primaire a augmenté d'environ 45 %. Il est prévu que cette hausse se poursuive mais à un rythme plus faible que pendant les décennies passées. Répondre à cette demande au niveau mondial et régional sera un vrai défi et ce malgré une augmentation de l'offre totale de l'énergie primaire de 61 % dans Jazz et 27 % dans Symphonie à l'horizon 2050. Dans Jazz, les émissions de CO₂ seront supérieures en 2050 à 44 milliards de tonnes par an, ce qui correspond à une augmentation de 45 % par rapport à 2010. Dans Symphonie, elles s'élèvent à 19 milliards de tonnes par an, ce qui correspond à une diminution de presque 40 % par rapport à 2010. Cette diminution de CO₂ repose sur une série de leviers d'action tels que le captage, l'utilisation et le stockage du carbone ou encore le changement de comportement des consommateurs. Cependant beaucoup de points d'ombre restent encore non élucidés d'ici 2050, notamment pour ce qui concerne le captage et le stockage du carbone, l'intermittence de l'énergie solaire et le stockage de l'énergie.

A partir des deux scénarios Symphonie et Jazz, le CME (2016) a proposé à l'horizon 2060, trois scénarios exploratoires afin de définir des trajectoires potentielles plausibles du secteur de l'énergie. En 2019, ces scénarios ont été étudiés par les membres du CME dans la région européenne d'ici 2040. Ils ont été conçus par les membres du CME en collaboration avec Accenture Strategy et l'Institut Paul Scherrer. Il s'agissait d'éclairer les gouvernements sur les décisions à prendre en matière de politique énergétique et les chefs d'entreprises dans la mise en place de leurs plans stratégiques et d'investissement.

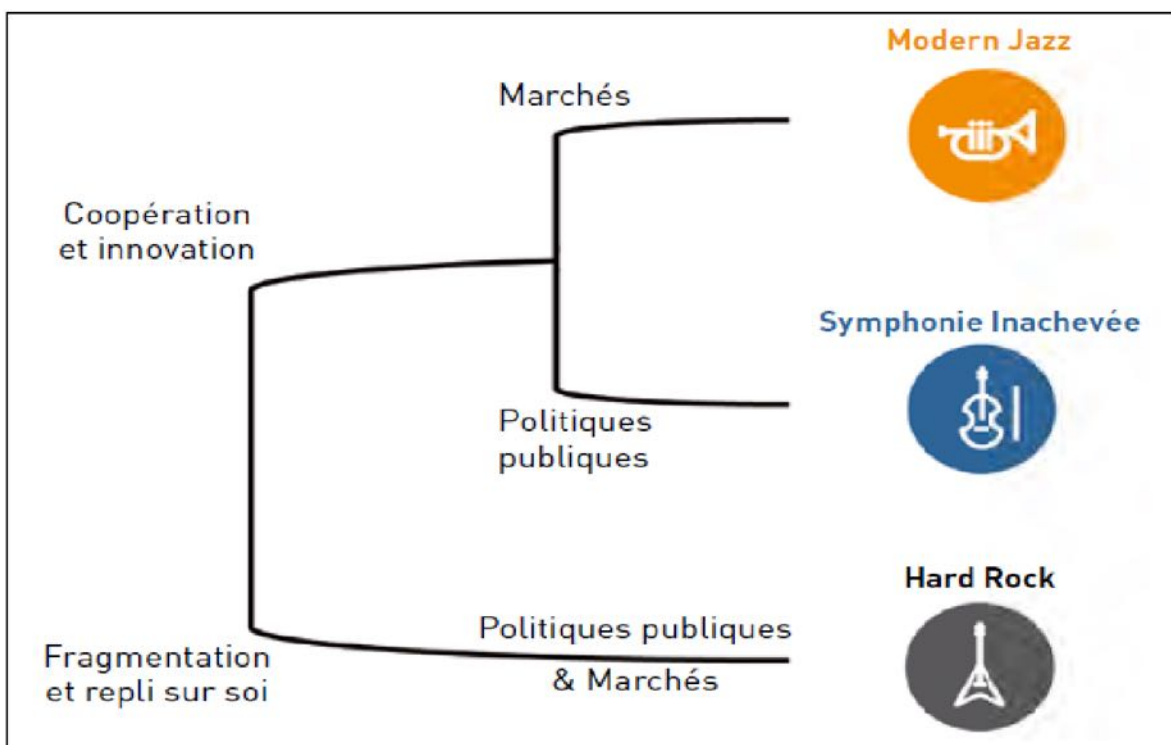
La conception de ces scénarios repose sur une approche qui a d'abord cherché à cadrer la problématique énergétique (cadre réalisé par le groupe d'experts), puis à construire des récits de scénarios et enfin à quantifier le système énergétique sur les échelles multirégionale et mondiale (modélisation). Les trois scénarios développés par le CME sont « Modern Jazz », « Symphonie inachevée » et « Hard rock ». Ces derniers peuvent être synthétisés comme suit :

Modern Jazz représente un monde numériquement accéléré marqué par l'innovation technologique et la recherche. C'est le scénario de transition énergétique de coopération axé sur le marché libre.

Symphonie inachevée dessine un monde qui va passer en 2060, vers un système énergétique mondial résilient, intégré et à faible émission de carbone, dans lequel les modèles de croissance économique seront durables. Ce scénario est comme le scénario Modern Jazz, un scénario de coopération.

Hard rock est un scénario qui explore les conséquences d'une croissance économique faible et non durable, due à des stratégies politiques tournées vers des intérêts nationalistes empêchant les pays de collaborer efficacement au niveau mondial, ce qui engendre un développement peu respectueux de l'environnement avec une attention limitée à l'atténuation des changements climatiques.

Figure 26 : Les conditions prises en compte par le CME pour élaborer les différents scénarios de la transition énergétique



Source : CME (2019)

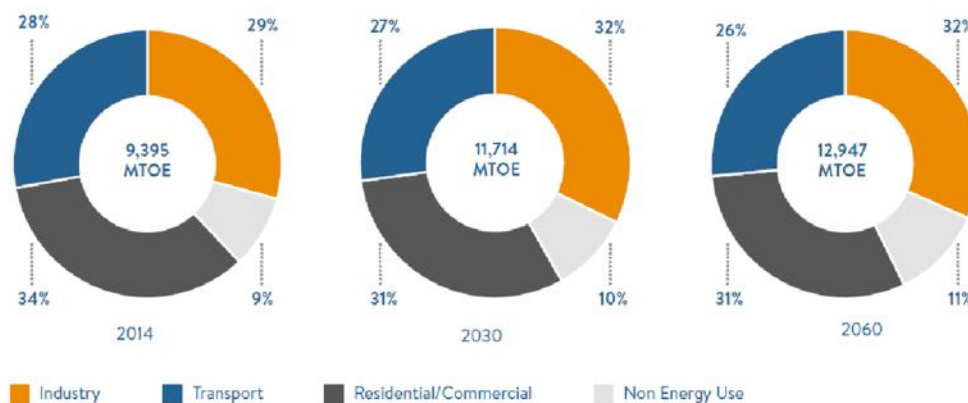
Ces trois scénarios permettent de cerner les enjeux liés à l'efficacité énergétique et la consommation primaire, la demande d'électricité, les énergies renouvelables (éolienne et solaire), la demande en combustibles fossiles et les émissions de carbone.

L'efficacité énergétique et la consommation d'énergie primaire

La demande d'énergie va plus que doubler. Jusqu'en 2060, les nouvelles technologies maintiendront la croissance de la demande d'énergie à un niveau modéré par rapport aux tendances historiques et contribueront à permettre aux économies industrialisées de passer plus rapidement à une croissance axée sur les services et la durabilité. L'intensité énergétique devrait s'améliorer tout au long de la période de projection dans les trois scénarios. La transformation digitale et l'avènement de l'intelligence artificielle sont présentés comme des changements contribuant à l'amélioration de l'efficacité énergétique et au ralentissement de la demande énergétique primaire (un scénario qui nous semble très optimiste).

Dans le scénario Modern Jazz, la consommation d'énergie finale augmenterait de 25 % entre 2014 et 2030, avec une croissance moyenne de 1,4 % par an. Cela serait dû à l'augmentation de l'activité industrielle, à une demande croissante de transport et à une augmentation de l'accès à l'énergie, ce qui augmente la consommation résidentielle et commerciale. Cette consommation finale commence à ralentir considérablement au-delà de 2030, ralentissant de 0,3 % par an et s'établissant à 12 947 Mtep en 2060. Cela correspond à 38 % de plus que la consommation de 2014. Ce ralentissement est induit principalement par les modes de vie plus intelligents qui incluent les véhicules électriques, le télétravail, des appareils plus efficaces, des maisons et des bureaux connectés.

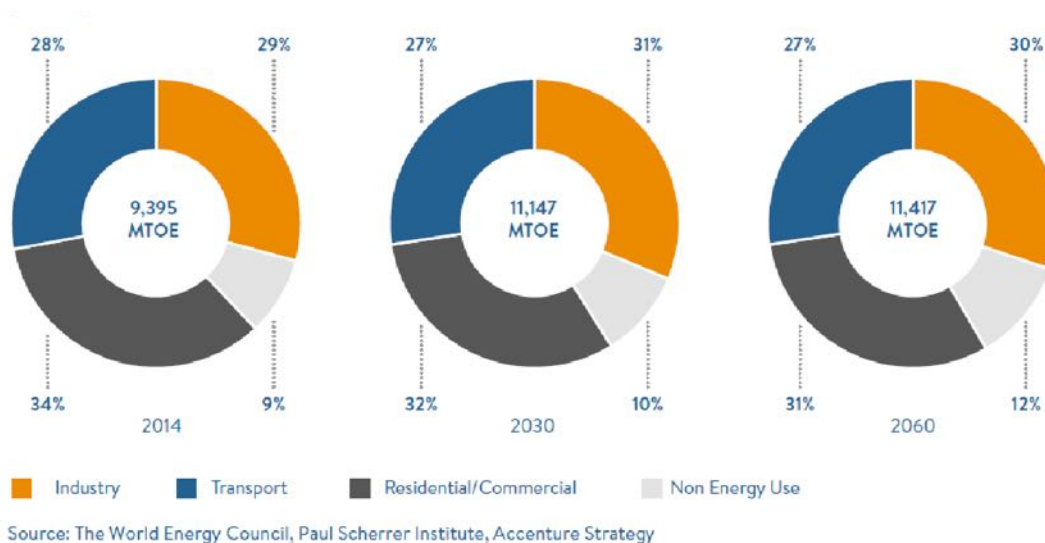
Figure 27 : la Consommation finale de l'énergie par secteur : Scénario MODERN DJAZZ



Source: The World Energy Council, Paul Scherrer Institute, Accenture Strategy

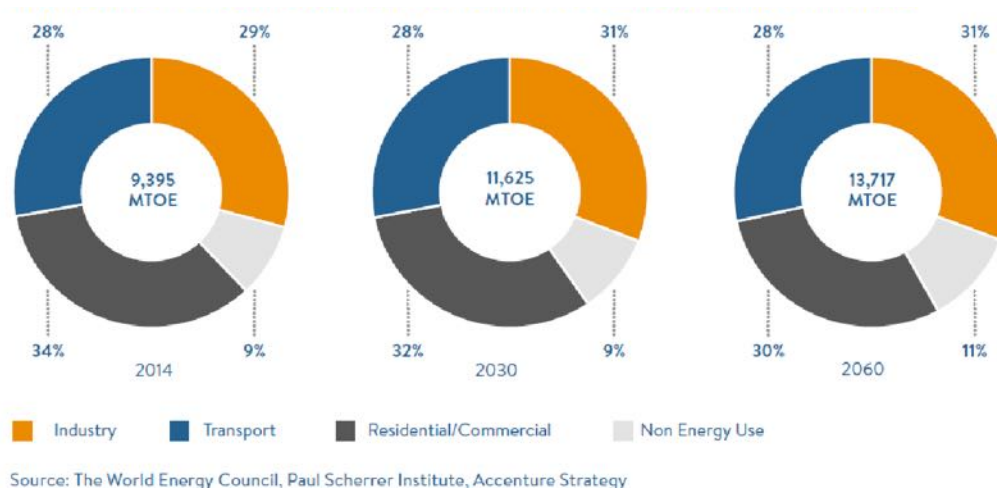
Dans le scénario Symphonie inachevée, la consommation finale totale d'énergie (TFC) croît de 19 % jusqu'en 2030 et atteint un plateau de 22 % jusqu'en 2060, avec une croissance moyenne de 0,4 % par an de 2014 à 2060. La croissance est largement tirée par l'augmentation de l'énergie livrée pour l'industrie et les transports (figure 28).

Figure 28 : la Consommation finale de l'énergie par secteur : Scenario SYMPHONIE INACHEVEE



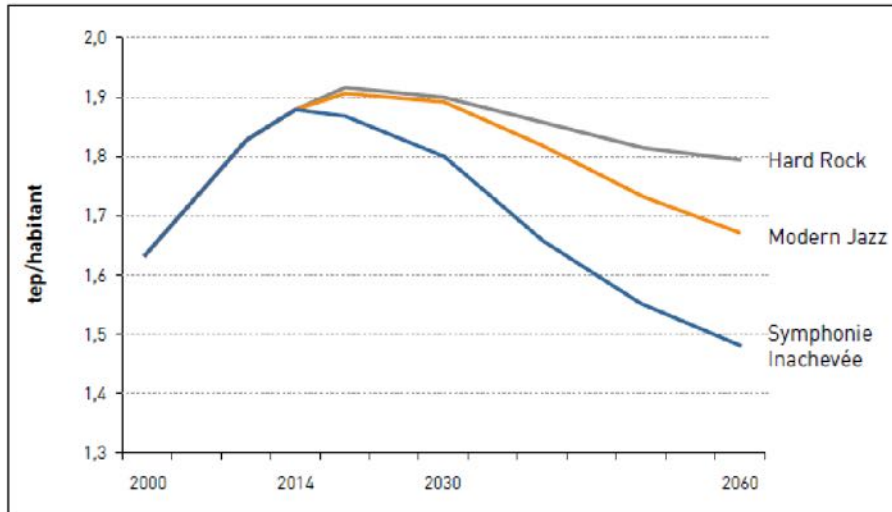
Dans le scénario *Hard Rock*, un ralentissement mondial de la croissance économique assombrit les perspectives de l'énergie fournie par le secteur industriel. La demande industrielle d'énergie croît à un taux de 1,7 % par an de 2014 à 2030. Au-delà de 2030, la demande ralentit de 0,5 % par an jusqu'à atteindre 46% (figure 29).

Figure 29 : la Consommation finale de l'énergie par secteur : Scenario harde Rock



La demande d'énergie primaire d'ici 2060 n'augmentera que de 10 % dans *Symphonie inachevée*, 25 % dans *Modern Jazz* et 34 % dans *Hard Rock*. La demande d'énergie primaire par habitant plafonne avant 2030 avec une consommation annuelle maximale d'énergie par habitant atteignant 1,9 TEP.

Figure 30 : La consommation d'énergie primaire par habitant va diminuer d'après les prédictions du CME et ce, quel que soit le scénario.



Source : CME (2019)

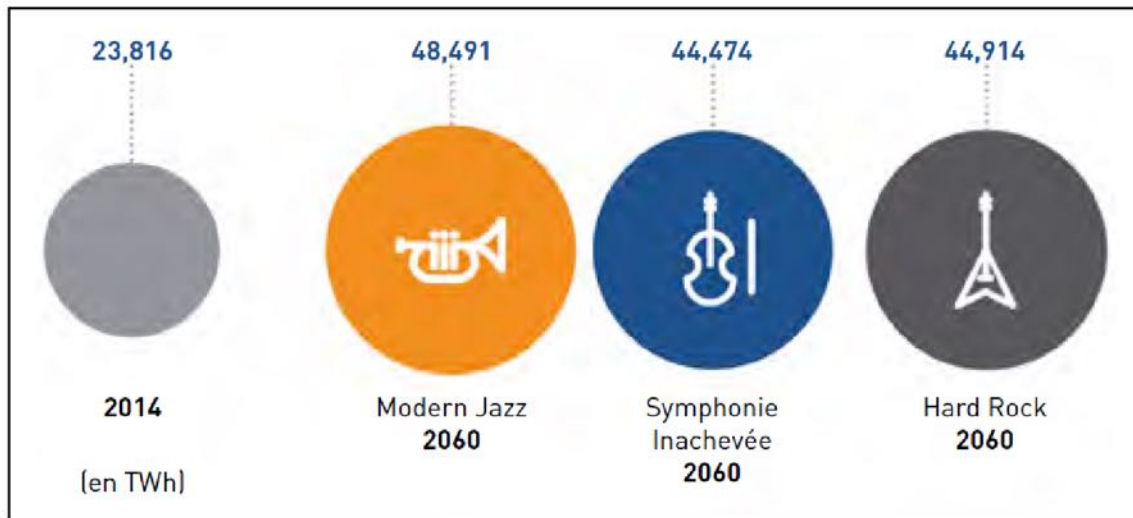
La demande d'électricité

La demande d'électricité doublera à l'horizon 2060. Avec la croissance économique et l'avancée technologique, les besoins en énergie électrique augmentent suite aux changements de mode de vie fondés sur une technologie consommatrice d'électricité.

D'ici 2030, l'électrification de la consommation finale passera à 20 %, contre 18 % en 2014 dans *Modern Djazz*. La croissance de la demande d'électricité est en moyenne de 1,9 % par an jusqu'en 2030 pour *Modern Djazz* et 1,6 pour *Symphonie inachevée*. Au-delà de 2030, la demande d'électricité continue de grimper au rythme de 1,4 % par an jusqu'en 2060 pour *Modern Djazz* et ralentit de 1,2% pour *Symphonie*. La production d'électricité a été multipliée par 2 depuis 2014 et la consommation finale d'énergie a atteint 28 %. L'électricité représenterait 29 % de la consommation d'énergie finale dans *Symphonie inachevée*. La production éolienne et solaire représente 30 % de la production totale d'électricité dans *Symphonie inachevée*, 28 % dans *Modern Jazz* et 25 % dans *Hard Rock* (AIE, 2016).

Cette augmentation de la demande d'électricité sera accompagnée par des investissements substantiels dans les infrastructures. Jusqu'en 2060, les investissements dans cette nouvelle génération d'électricité varient de 35 à 43 000 milliards de dollars (taux de change du marché de 2010).

Figure 31 : Consommation électrique des scénarios du CME



Source : CME (2019)

Les énergies renouvelables (Eolien et le solaire)

Le développement de l'énergie solaire et éolienne connaîtra un important essor dans les trois scénarios et dominera la production d'électricité jusqu'en 2060. Les progrès technologiques continus réduiraient les coûts d'investissement pour les panneaux photovoltaïques (PV) et l'énergie solaire en général. Cette tendance est rencontrée dans les trois scénarios, cependant elle est plus fortement observée dans *Modern Jazz* et *Symphonie inachevée* où les réductions de coûts sont supérieures à 70 %. Avec les ENR, la capacité de production électrique passerait de 20 % à 39 %.

Dans *Symphonie inachevée*, les avancées enregistrées dans les technologies de stockage de l'hydroélectricité et de l'air comprimé permettraient aux énergies renouvelables intermittentes d'atteindre 39 % de la production d'électricité d'ici 2060. En conséquence, la capacité solaire installée dépasse 1 100 GW d'ici 2030 et dépasse 4 700 GW d'ici 2060. La production passe de 198 TWh en 2014 à 1 694 TWh en 2030 et 7 943 TWh en 2060.

Modern Jazz voit les énergies renouvelables intermittentes atteindre 30 % de la génération grâce aux systèmes distribués, aux technologies numériques et à l'innovation des batteries. Jusqu'en 2060, la production solaire, éolienne et géothermique croît plus rapidement que toute autre source de combustible dans l'énergie primaire, avec une moyenne de 5,1 % par an sur la période (nouvelles capacités de production solaire).

Avec moins de capacité de construction d'infrastructures, *Hard Rock* connaît la pénétration la plus faible, avec une production solaire et éolienne atteignant 20 % d'ici 2060. Jusqu'en 2060, la production solaire, éolienne et géothermique croît plus

rapidement que toute autre source d'énergie primaire, avec une moyenne de 4,2 % par an sur la période. La production d'électricité solaire passe de 198 TWh en 2014 à 793 TWh en 2030 et à 3 270 TWh en 2060. La capacité solaire installée dépasse 919 GW d'ici 2030 et dépasse 2 350 GW d'ici 2060

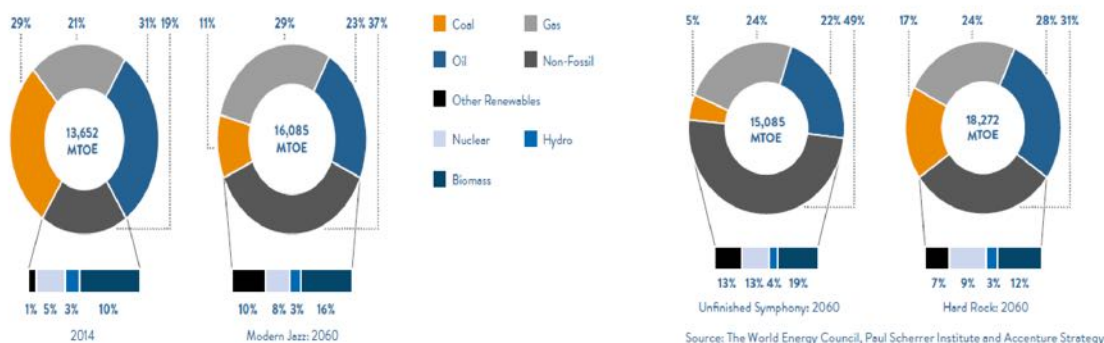
Pour les deux ressources (solaire et éolienne), les ajouts les plus importants seront observés en Chine, en Inde, en Europe et en Amérique du Nord.

La demande des combustibles fossiles

La part des combustibles fossiles dans l'énergie primaire tomberait à 70 % d'ici 2060 dans *Hard Rock*, à 63 % dans *Modern Jazz* et à 50 % dans *Symphonie inachevée*.

Dans le cas du charbon, *Symphonie inachevée* réalise les changements les plus drastiques avec des approvisionnements tombant à 724 Mb/J en 2060. L'accent mis sur la sécurité énergétique signifie que *Hard Rock* voit une plus grande dépendance au charbon et atteindra en 2040, 4044 Mb/J. Le principal facteur de variance est la mesure dans laquelle la Chine et l'Inde utiliseront le charbon jusqu'en 2060 (les résultats de la récente COP 21 à Glasgow tendent à montrer que le charbon occupera encore une place importante dans l'énergie primaire mondiale). Suivant les scénarios, le pic de demande de charbon pourrait être atteint en 2040. Pour le pétrole, il resterait majoritaire dans le secteur des transports. Sa part passerait de 92% en 2014 à 60% dans le scénario *Symphonie inachevée*, 67% pour *Modern Jazz* et 78% pour *Hard Rock*. Le pic se situerait en 2030 ou entre 2040 et 2050. Seul le gaz naturel continuerait à se développer pour remplacer le charbon (le récent conflit entre la Russie et l'Ukraine pourraient toutefois amener les pays occidentaux à réduire le recours au gaz russe ou à trouver des alternatives auprès d'autres producteurs).

Figure 32 : Evolutions du mix énergétique primaire de 2014 à 2060 selon les trois scénarios du CME.

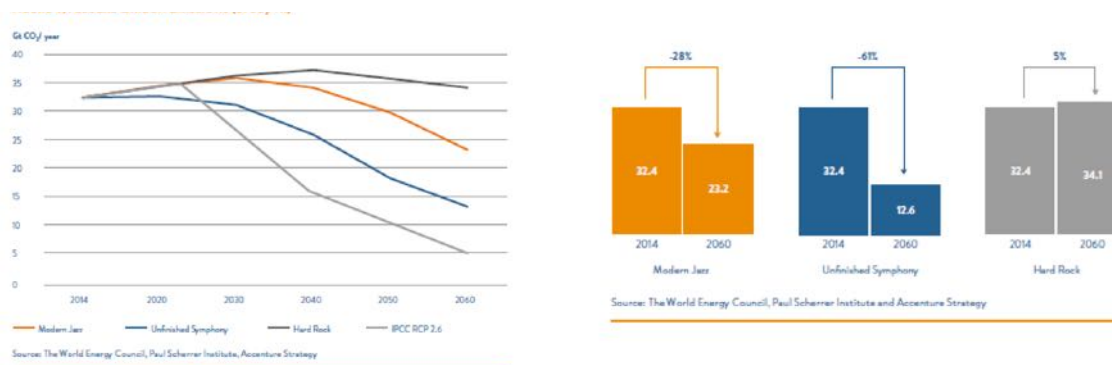


Source : CME (2019)

Les émissions de carbone

Les modifications de l'intensité énergétique et du mix énergétique primaire tendraient à réduire considérablement les émissions climatiques mondiales dans *Modern Jazz* et *Symphonie Inachevée*. *Hard Rock* rencontre des difficultés à relever le défi climatique.

Figure 33 : Emissions de CO₂ en 2014 et 2060 (gt CO₂/an)



De 2014 à 2060, les facteurs démographiques et économiques augmentent les émissions de carbone dans les trois scénarios. Ces effets sont de loin les plus forts dans *Modern Jazz*, car le PIB par habitant a plus que doublé au cours de la période et les modes de vie dépendants de la technologie nécessitent plus d'énergie. Toujours est-il que *Modern Jazz* parvient à une réduction globale de 28 % des émissions de carbone de 2014 à 2060 en déployant en grande partie des technologies qui réduisent fortement l'intensité énergétique et l'intensité carbone des TPES. *Symphonie inachevée* connaît les plus fortes réductions de l'intensité carbone de l'énergie, avec une moyenne de 2,2 % par an de 2014 à 2060. L'intensité énergétique diminue également de 2,6 % par an. Combinés, ces facteurs font chuter les émissions mondiales de carbone en 2060 à 61 % en dessous des valeurs de 2014. Pour *Hard Rock*, les émissions globales augmentent de 5 %, malgré une moindre pression à la hausse de la croissance économique. Les réductions d'intensité carbone et énergétique sont inférieures de moitié à celles des deux autres scénarios. Cependant et malgré une croissance économique plus faible dans *Hard Rock*, une innovation technologique rapide dans *Modern Jazz* et une action politique coordonnée dans *Symphonie inachevée*, aucun des trois scénarios n'est en mesure d'atteindre l'objectif défini à l'article 2 de l'Accord de Paris (maintien du réchauffement climatique en dessous de 2°C). *Modern Jazz* et *Hard Rock* sont en ligne pour un réchauffement de 3°C en 2060 et *Symphonie inachevée* se dirige vers un réchauffement légèrement supérieur à 2°C. De futures percées technologiques seront nécessaires pour rester en dessous du seuil de 2°C (même si les récents travaux du GIEC nous éloignent de plus en plus des objectifs de 2°C, et même 3°C). Selon le CME, ces percées nécessiteront le déploiement efficace de mécanismes politiques et de marché à travers des modèles économiques plus durables (prise en compte des impacts socio-environnementaux).

Chaque scénario met l'accent sur l'un des trois leviers du défi énergétique : la coopération internationale, la croissance économique soutenable et l'innovation technologique. Le challenge pour les leaders mondiaux de l'industrie est de s'appuyer sur la structure évolutive des systèmes énergétiques mondiaux tout en proposant de nouvelles politiques et des stratégies plus audacieuses. Chaque scénario donne un aperçu des secteurs à fort impact et met en évidence les domaines d'action à prendre en charge. Il s'agit notamment de réévaluer les allocations de capital et les stratégies d'investissements ; d'adapter les modèles d'affaires aux différentes régions (Asie et Moyen-Orient) ; redéployer le capital libéré vers des secteurs moins énergivores ; promouvoir les technologies bas carbone, ...

Les Scénarios de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE)

L'Agence internationale de l'énergie (AIE) est une organisation internationale fondée en 1974, elle fait partie des agences de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). Initialement conçue pour assurer la sécurité des approvisionnements énergétiques des 30 pays membres (dont la plupart sont des importateurs de pétrole), elle a étendu son expertise à tous les types d'énergie pour devenir une instance importante de conseil et de coordination de la politique énergétique mondiale (Heubaum, Biermann, 2015). Elle publie annuellement des études dont la plus connue est le WEO (World Energy Outlook) dans laquelle elle dresse un état des lieux du secteur énergétique et émet des hypothèses sur l'avenir.

Depuis 1993, l'AIE fournit des projections énergétiques à moyen et long terme à l'aide du modèle énergétique mondial (WEM), c'est un modèle de simulation à grande échelle conçu pour reproduire le fonctionnement des marchés de l'énergie. Le WEM est le principal outil utilisé pour générer des projections détaillées, secteur par secteur, région par région. Les scénarios WEO constituent l'une des principales sources d'information pour les acteurs économiques et politiques. Ils permettent de dégager des résultats chiffrés et d'aider les décideurs à mieux apprécier le contexte énergétique.

Contrairement aux éditions antérieures (qui ont toujours retenu dans les scénarios énergétiques passés, le maintien des énergies fossiles dans le mix énergétique), l'édition 2021 du WEO invite les parties concernées, à savoir les décideurs politiques et les dirigeants des grandes entreprises internationales, à cesser d'exploiter de nouveaux gisements d'énergies fossiles à partir de 2035, à interdire tout nouvel investissement dans centrales à charbon et à se reporter massivement sur les énergies bas carbone.

A l'horizon 2050, trois scénarios de transition énergétique et un scénario additionnel dit scénario intégré, ont été proposés : le scénario de zéro émission nette d'ici 2050 (NZE), le scénario d'engagements annoncés (APS), le scénario de politiques déclarées (STEPS) et le scénario de développement durable (SDS). NZE et SDS sont des scénarios normatifs, car ils sont conçus pour atteindre des objectifs respectifs compatibles avec la limitation de l'augmentation de la température mondiale à 1,5 °C pour NZE et à

l'objectif « bien en dessous de 2 °C » de l'Accord de Paris. APS et STEPS sont des scénarios exploratoires. Sur la base des données de départ, telles que des décisions politiques et des objectifs annoncés, différentes trajectoires sont explorées via la modélisation des systèmes énergétiques.

Les scénarios classiques

STEPS (Stated Policies Scenario) est un scénario tendanciel dit « laisser aller », c'est une projection qui traduit la continuité de la trajectoire des taux d'émissions de CO₂ par rapport à la situation actuelle, sans le déploiement d'effort important de réduction. Il a pour finalité de démontrer l'impact futur d'un système énergétique avec des décisions politiques restées inchangées par rapport au présent. *Sans efforts supplémentaires les températures moyennes continueront d'augmenter d'au moins +2,6°C au-dessus du niveau pré-industriel en 2100.*

SDS (Sustainable Development Scenario) correspond à un scénario énergétique de développement durable, il décrit une trajectoire future cohérente avec les objectifs de l'accord de Paris sur le maintien de la hausse moyenne de températures Mondiale à + 2 °C. *Sans le scénario SDS la température culmine en 2100 à environ +1,7°C du niveau pré-industriel.*

Les nouveaux scénarios de l'édition 2021

APS (Announced Pledges Scenario) suppose que tous les engagements climatiques pris par les gouvernements du monde entier, y compris les contributions déterminées au niveau national (CDN) et les objectifs nets zéro à plus long terme, seront atteints intégralement et à temps. *La température monte en 2100 autour de +2,1°C ; ce scénario n'atteint pas les émissions nettes zéro, donc la température n'est pas stabilisée.*

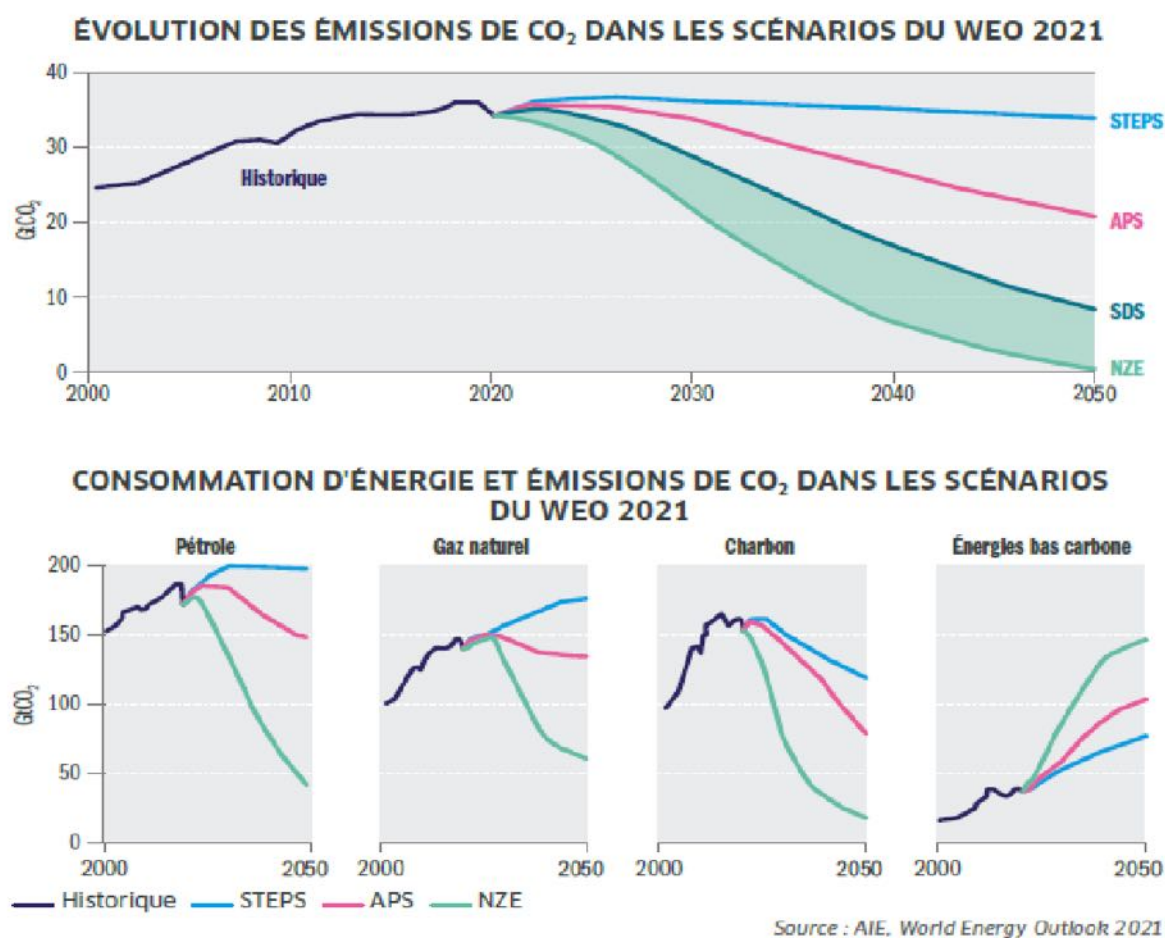
Et enfin, le scénario NZE (Net Zero Emissions) est un scénario de rupture et ambitieux pour la décarbonation globale du secteur énergétique. *La température est stabilisée à +1,5°C.*

Contrairement aux trois autres scénarios, le NZE est un scénario drastique et inédit pour l'atteinte de l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050. Si le scénario tendanciel est sans effet (ou à effet négligeable) sur la réduction des émissions en 2030, le « zéro émission nette » engendre une baisse substantielle pouvant aller jusque 45%.

Dans cette génération de scénarios, il a été souligné et mis en exergue l'importance des politiques gouvernementales pour déterminer l'avenir du système énergétique mondial. C'est le facteur central à l'origine des variations des résultats observés dans les scénarios. Cependant, d'autres variables ont également été intégrées, notamment le contexte économique et démographique, les coûts et l'apprentissage de la technologie, les prix de l'énergie, les engagements de développement durable des entreprises et les facteurs sociaux et comportementaux.

Les projections prospectives des quatre scénarios sont élaborées par la combinaison du modèle énergétique mondial (WEM) de l'AIE (qui est utilisé pour produire les projections du World Energy Outlook annuel) et du modèle Energy Technology Perspectives (ETP). La combinaison des deux modèles permet de regrouper et de croiser un ensemble d'informations sur les marchés de l'énergie, les investissements, les technologies et les politiques qui seraient nécessaires pour la transition énergétique propre.

Figure 34 : Consommation des énergies et émissions CO₂ des scénarios WEO 2021



Description des quatre scénarios

Le scénario des engagements annoncés (APS) suppose que l'ensemble des engagements annoncés par les gouvernements du monde entier avant la COP 26 soient respectés intégralement et réalisés dans les délais. Il s'agit notamment des Contributions Déterminées au Niveau National (CDN) soumises par les pays à la demande des Nations unies, et des politiques déclarées, comme celle visant la réalisation de l'objectif zéro émissions nettes retenue par un certain nombre de pays. La conception de ce scénario est basée sur tous les principaux engagements nationaux récents annoncés et qui ont fixé l'année 2030, comme objectif et d'engagements nets à

plus long terme de zéro émission de CO₂, sans tenir compte si ceux-ci ont été introduits dans la législation ou dans les CDN mises à jour. Elle est également basée sur tous les engagements pris dans les CDN nouvelles et mises à jour, qu'ils soient ou non étayés par des plans de mise en œuvre spécifiques. Le respect de ces engagements permettrait de faire chuter de 40% les émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie d'ici à 2050

Mais ce scénario aboutirait à un réchauffement climatique de 2.1°C en 2100 ce qui est non compatible avec les objectifs de l'Accord de Paris. Les engagements les plus importants pris en compte par WEO (2021) sont mentionnés dans le tableau suivant :

Figure 35 : Les engagements les plus importants pris en compte par WEO-2021

Les engagements pris en compte par WEO 2021	Les nouveaux engagements considérés dans la Note technique
❖ L'engagement de la Chine à atteindre la neutralité carbone d'ici 2060	❖ Le 12 octobre, les Émirats arabes unis ont annoncé leur objectif d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050.
❖ La NDC mise à jour des États-Unis et leur engagement à atteindre zéro émission nette, à l'échelle de l'économie, d'ici 2050	❖ Le 13 octobre, le président russe a annoncé que la Russie visait à devenir neutre en carbone d'ici 2060
❖ La NDC mise à jour de l'Union européenne et l'engagement d'atteindre la neutralité climatique d'ici 2050	❖ Le 23 octobre, l'Arabie saoudite a annoncé que le pays visait zéro émission nette de CO ₂ d'ici 2060
❖ L'engagement du Japon à devenir neutre en carbone d'ici 2050	❖ Le 26 octobre, l'Australie a annoncé son objectif d'atteindre le zéro net d'ici 2050.
❖ L'engagement de la Corée du Sud d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050	❖ Le 1er novembre, le Premier ministre de l'Inde a annoncé l'objectif d'atteindre zéro émission nette d'ici 2070 de même que des objectifs politiques renforcés pour 2030.
❖ L'objectif du Brésil d'atteindre zéro émission nette d'ici 2060, tel que décrit dans sa CDN mise à jour de 2020	❖ Le 4 novembre, l'Indonésie annonce le renforcement de son engagement à décarboner son secteur électrique

Source: IEA, Technical Note, 2021

Le scénario de stratégies énoncées (STEPS) est basé sur les stratégies en vigueur et fournit un point de repère plus prudent de l'impact de ces politiques au fil du temps. Selon ce scénario, la quasi-totalité de la hausse de la demande d'énergie d'ici 2050 pourrait être couverte par des sources bas carbone cependant les émissions annuelles de CO₂ resteraient à cet horizon « proches des niveaux actuels » et la hausse globale de température serait voisine de 2,6°C à l'horizon 2100 (AIE, 2021).

Le scénario zéro émission nette (NZE) est un scénario normatif, conçu pour atteindre un résultat spécifique. Il montre la trajectoire pour l'atteindre. Ce scénario représente un changement radical dans l'orientation des politiques et des investissements, il esquisse une voie étroite mais réalisable pour que le secteur mondial de l'énergie atteigne zéro émission nette de CO₂ d'ici 2050. Le scénario NZE ne s'appuie pas sur des réductions d'émissions en dehors du secteur de l'énergie (qui représente 75% des émissions), mais suppose que les émissions non énergétiques seront réduites dans la même proportion que les émissions énergétiques. Il est cohérent avec la limitation de l'augmentation de la température mondiale à 1,5° C (avec une probabilité de 50%). La consommation d'énergie baisserait de 17%, celle du pétrole et du gaz naturel de 70%, celle du charbon serait marginale, celle d'électricité doublerait, celle-ci serait produite à 88% par des renouvelables (solaire, éolien et hydraulique) et à 8% par le nucléaire, avec un développement de la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau.

La réduction drastique de l'utilisation des énergies fossiles, le développement rapide et massif des technologies propres et la généralisation des modes sobres et efficaces de la consommation de l'énergie sont les clés les plus significatives pour changer la politique énergétique mondiale, objectif d'atteindre zéro émission de CO₂ et un réchauffement climatique de 1,5°C. Le scénario NZE prévoit une croissance explosive des technologies d'énergie propre au cours de la prochaine décennie (valeur cumulée estimée à 27 000 milliards de dollars d'ici 2050). De ce fait, le rapport de l'AIE évoque *l'émergence d'une nouvelle économie de l'énergie* qui implique des interactions variées et souvent complexes entre les marchés de l'électricité, des carburants et du stockage, créant de nouveaux défis pour la réglementation et le marché.

La conception du NZE est basée, sur les principes suivants :

- L'adoption de toutes les technologies disponibles et les options de réduction des émissions, y compris celles qui sont actuellement au stade de démonstration ou du prototype. Elle n'implique pas l'adoption de technologies inconnues mais qui supposent une réduction significative du délai de déploiement à grande échelle des technologies actuelles en cours de développement. Le NZE vise également à limiter, dans la mesure du possible, le déploiement de technologies à émissions négatives.
- Une coopération internationale substantielle de tous les pays contribuant à l'objectif net zéro. La coopération accélère l'innovation et la diffusion technologique et facilite la réduction des émissions dans les économies émergentes et en développement.
- L'assurance d'une transition organisée, notamment en maintenant la sécurité énergétique, en minimisant la volatilité du marché de l'énergie et en évitant les actifs non durables.
- Une accessibilité à l'énergie pour tout le monde et conduisant à réduire la pollution atmosphérique (comme indiqué dans la section des objectifs de développement durable des Nations Unies).

Le scénario NZE, qui est au centre du rapport de l'AIE, place les énergies renouvelables au premier rang de la transition énergétique (en faisant de leur développement l'une des étapes-clés). La production d'énergie solaire et éolienne passerait ainsi de 10,4 EJ en 2020, à 60,5 EJ en 2030, et à 190 EJ en 2050. La capacité d'énergie solaire serait multipliée par près de 6 entre 2020 et 2030, et la capacité d'énergie éolienne par 5. L'énergie hydraulique augmenterait progressivement et l'énergie géothermique, ou marine, triplerait entre 2020 et 2030 pour atteindre 31,8 EJ en 2050. Cependant, ce développement massif est peut-être encore sous-estimé.

La biomasse devient une source d'énergie majeure dans le scénario NZE, passant de 62 EJ en 2020 à 102 EJ en 2050 (19 % de l'approvisionnement énergétique total). La superficie totale des terres consacrées à la production de bioénergie passerait alors de 330 millions d'hectares (Mha) en 2020, à 410 Mha en 2050, ce qui représente plus du quart du total des terres cultivées disponibles à l'échelle mondiale.

Le scénario NZE prévoit une augmentation significative de la capacité de production d'énergie nucléaire, en particulier sur les marchés émergents et dans les économies en développement. Le nucléaire fournirait 41,4 EJ en 2030, soit une augmentation de 41 % par rapport au niveau actuel, et atteindrait 60,6 EJ en 2050.

Parmi les mesures à prendre pour atteindre zéro émission de CO₂, la capture et le stockage du carbone se révèlent être des pistes importantes, le volume capturé serait multiplié par 41 de 2021 à 2030, permettant notamment l'utilisation de centrales électriques au charbon et au gaz, équipées de dispositifs de capture et du stockage. L'élimination du carbone étant presque inexistante aujourd'hui, les volumes éliminés seraient multipliés par plus de 300 d'ici à 2030.

L'hydrogène à faible teneur en carbone est un autre carburant qui suscite un regain d'intérêt et d'investissements, bien que pour le moment, la grande majorité de la production mondiale provienne de l'hydrogène fossile (y compris le captage du carbone sans séquestration permanente)

Selon l'AIE, il n'est, donc, plus nécessaire d'investir dans l'exploitation de nouvelles ressources d'énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon).

Comparaison des scénarios de l'AIE

La conception des scénarios est basée sur un ensemble de variables clés, il s'agit de la population mondiale, du prix du carbone, des ressources des énergies fossiles, des coûts de production d'électricité et autres coûts technologiques clés mais aussi des engagements des Etats et des gouvernements, ces derniers sont la principale cause des divergences entre les scénarios. Les scénarios exploratoires conduisent à des résultats différents en termes d'évolution de consommation d'énergie, d'émission de CO₂ et d'augmentation de la température ; les premiers constats saillants sont :

- *Le scénario NZE* est le plus ambitieux mais il requiert d'importants investissements. C'est aussi le seul qui permette de respecter l'objectif zéro émissions nettes d'ici 2050 avec une hausse de la température moyenne de l'ordre de 1,5°C. Ce scénario mise sur un développement de technologie permettant un déploiement considérable des énergies renouvelables.
- *Le scénario SDS* considéré comme point de repère permettrait une diminution des émissions mondiales de CO₂ d'environ 20% en 2050, zéro net en 2070 et une augmentation moyenne des températures de 1,7°C en 2100.
- *Le scénario APS* conduirait à une chute de 20% des émissions mondiales de CO₂ en 2030, 40% d'ici à 2050 et une hausse de la température moyenne de 2,1°C (soit bien au-dessus de l'objectif de 1,5°C).
- *Le scénario STEPS* conduirait au maintien d'un niveau d'émission de CO₂ proche du niveau actuel et à une hausse de la température moyenne de 2,6°C à l'horizon 2100 avec une augmentation continue au-delà de 2100.

Parmi l'ensemble des résultats et des préconisations des différents scénarios, on retiendra en particulier que :

- **Le déploiement des énergies renouvelables est au coeur de la transition énergétique**, sa part dans l'approvisionnement en énergie primaire passe à 12% d'ici 2050 (dont 1% de solaire, 1% d'éolien et 3% d'énergie hydraulique).

26% pour le scénario STEPS dont 6% de solaire, 4% d'éolien et 3% d'énergie hydraulique.

37% pour le scénario APS dont 10% de solaire, 8% d'éolien et 4% d'énergie hydraulique.

55% pour le scénario SDS dont 15% de solaire, 11% d'éolien et 5% d'énergie hydraulique.

Et 67% pour le scénario NZE dont 20% de solaire, 16% d'éolien et 6% d'énergie hydraulique.

Dans le NZE, le rythme sans précédent d'innovation et de développement technologique permettrait d'atteindre le niveau de production de 67% de l'approvisionnement en énergie en 2050 à partir des sources renouvelables. L'AIE considère que pour les scénarios APS et STEPS, les progrès en matière des énergies propres sont beaucoup trop lents. Pour l'APS, les investissements annuels dans l'énergie propre atteindraient environ 2300 milliards de dollars d'ici 2030, ils resteraient nettement inférieurs à celui de NZE qui s'élève à 4 000 milliards de dollars par an d'ici 2030.

- **La consommation des énergies fossiles diminue** (en proportions différentes) pour les 4 scénarios. En 2020, elle était de 79% dont 26% de charbon, 29% du pétrole et 24% du gaz naturel. A l'horizon 2050, elle passerait à :

66% pour le scénario STEPS dont 16% de charbon, 27% du pétrole et 23% du gaz naturel.

54% pour le scénario APS dont 12% de charbon, 22% du pétrole et 20% du gaz naturel.

36% pour le scénario SDS dont 6% de charbon, 15% du pétrole et 15% du gaz naturel.

22% pour le scénario NZE dont 3% de charbon, 8% du pétrole et 11% du gaz naturel.

La diminution de la part des énergies fossiles, malgré une augmentation de la population mondiale de 2 milliards, serait rendue possible grâce à une généralisation de la sobriété et de l'efficacité énergétique.

Dans NZE, il convient de cesser tout investissement dans les énergies fossiles. Les engagements nets de zéro mis en œuvre par les pays dans l'APS n'incluent pas d'objectifs sur la production, mais impliquent des efforts rigoureux pour minimiser les émissions de CO₂. Dans STEPS, la hausse de la demande de gaz naturel persiste à cause de la croissance de la demande en Chine, en Inde et dans d'autres pays d'Asie.

- **La part du nucléaire connaîtra une légère augmentation** par rapport à 2020 qui est de 5%, à l'horizon 2050 elle serait de :

5% pour le scénario STEPS.

7% pour le scénario APS.

9% pour le scénario SDS.

11% pour le scénario NZE.

L'expansion de l'énergie nucléaire est largement déterminée par la mise en chantier de centrales d'une capacité de 60 GW dans 19 pays (début 2021). Dans le scénario STEPS, plus de 65 GW (23 %) du parc nucléaire existant dans les économies avancées seront mis hors service d'ici 2030, contre 50 GW dans l'APS.

- **La biomasse solide** qui avait une part de 4% en 2020, sera à l'horizon 2050, de :

2% pour le scénario STEPS.

3% pour le scénario APS.

0% pour les scénarios SDS et NZE ce qui explique qu'il y a moins de consensus sur le rôle de la bioénergie.

Dans le STEPS et l'APS, 1,9 milliard de personnes dépendent encore de l'utilisation traditionnelle de la biomasse pour cuisiner en 2030.

Dans le NZE, l'accès universel à une cuisson propre sera possible en 2030 et l'utilisation traditionnelle de la biomasse sera complètement éliminée.

- **L'hydrogène a un rôle à jouer** notamment dans le scénario NZE.

- **Les options de gestion du CO₂**, s'agissant notamment du Captage et du Stockage du CO₂ (CSC - stockage souterrain) et du Captage du CO₂ et de son Utilisation (CCU - utilisation du CO₂ pour fabriquer des matériaux, des carburants, etc.) jouent un rôle significatif pour le SDS et NZE, les 2 autres scénarios intègrent un rôle plus limité. La figure 36 résume les consommations d'énergie dans les différents scénarios de l'AIE.

Selon l'AIE, il existe encore un écart important entre les scénarios APS et NZE qu'elle a baptisé « gaps ambition », car des engagements gouvernementaux ambitieux doivent être amplifiés pour résorber cet écart et contenir l'élévation de la température à 1,5 °C.

Figure 36 : Consommation mondiale de l'énergie dans les scénarios de l'AIE (2021)

Consommation primaire d'énergie en Mtep	Mondiale		Scénario repère SDS			Scénario NZE			Scénario APS			Scénario STEPS		
	Année	2020	Part (%)	2030	2050	Part (%)	2030	2050	Part (%)	2030	2050	Part (%)	2030	2050
Charbon	3721	26	2651	831	6	1 717	411	3	3380	1870	12	3587	2790	16
Pétrole	4094	29	4020	2135	15	3282	1008	8	4421	3525	22	4741	4736	27
Gaz naturel	3 313	24	3327	2035	15	3901	1450	11	3499	3181	20	3724	4156	23
Nucléaire	702	5	884	1228	9	889	1447	11	855	1158	7	812	967	5
Solaire	112	1	568	2061	15	764	2606	20	456	1533	37	380	1039	6
Eolienne	136	1	516	1502	11	681	2123	16	430	1228	10	344	748	4
Hydraulique	373	3	463	681	5	504	728	6	437	590	8	437	580	3
Bioénergie moderne	903	6	1576	2546	18	1713	2431	18	1354	2119	7	1254	1815	10
Biomasse	576	4	-	-	-	-	-	-	494	408	3	494	408	2
Autres	112	1	287	767	6	315	760	6	203	466	3	203	466	2
Total renouvelables	1 636	12	3408	7557	55	3979	8649	67	2880	5933	37	2603	4598	26
Total consommation primaire	13 017	100	14312	13803	100	13067	12969	100	15551	16108	100	16027	17768	100

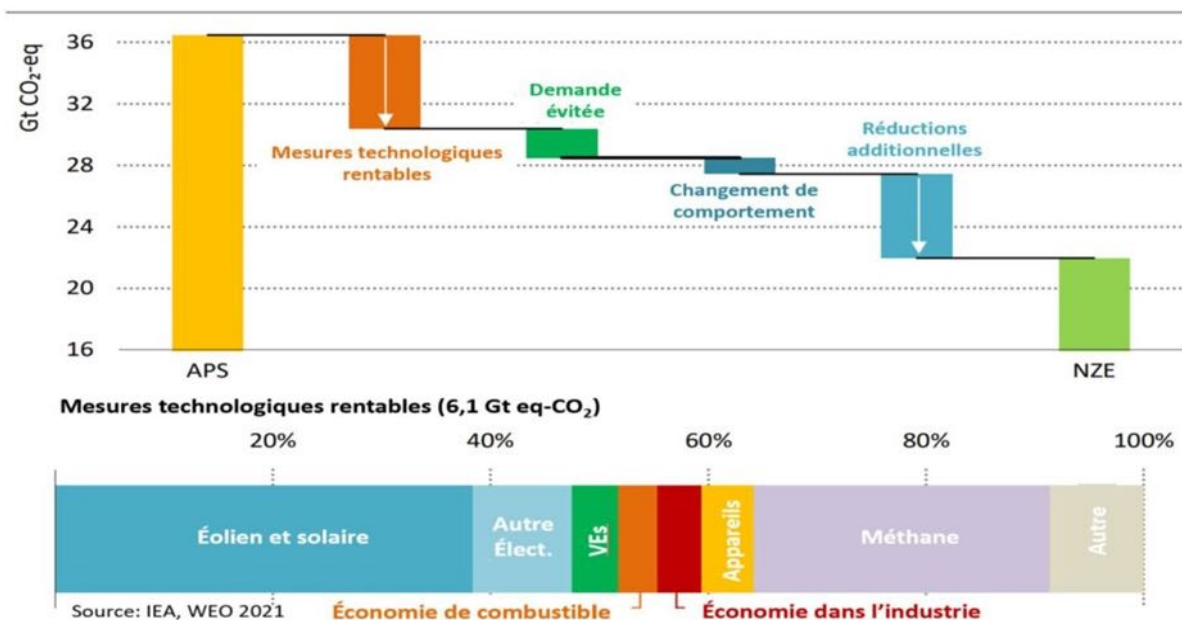
Comme l'illustre la figure 37, les quatre principales priorités d'action pour combler cet écart au cours de la prochaine décennie et préparer le terrain pour une nouvelle réduction rapide des émissions au-delà de 2030 sont les suivantes :

- **Assurer une avancée importante dans l'électrification propre** : un doublement, par rapport aux engagements actuels, du déploiement du solaire photovoltaïque et de l'éolien comme appui supplémentaire massif à l'électrification propre ; et une expansion forte d'autres moyens de production d'électricité bas-carbone, comme le nucléaire « là où il est acceptable » et une sortie rapide du charbon ;

- **Réaliser le plein potentiel de l'efficacité énergétique** : un effort accru sur l'efficacité énergétique et les changements comportementaux pour modérer la hausse de la demande énergétique. En effet, dans le scénario NZE de l'AIE, l'intensité énergétique de l'économie mondiale décroît de 4% par an entre 2020 et 2030, soit plus du double du rythme observé entre 2010 et 2020 ;

- **Prévenir les émissions de méthane provenant des opérations de combustibles fossile** : une réduction massive des émissions de méthane liées à la production d'énergie fossiles (mesure la plus « rentable » à court terme dans le secteur de l'énergie selon l'AIE) ;
- **Stimuler l'innovation en matière d'énergie propre** : un développement fort et un soutien massif à l'innovation en matière d'énergie propre. En effet, près de la moitié des réductions d'émissions en 2050 du scénario NZE proviennent de technologies aujourd'hui encore en phase d'expérimentation ou de prototypes (notamment pour favoriser le déploiement de l'hydrogène et de systèmes « CCUS » de capture, stockage et utilisation du CO₂).

Figure 37 : Répartition des mesures pour combler l'écart entre APS et NZE d'ici 2030



En plus de ces quatre mesures, l'AIE souligne aussi (i) que la finance constitue le « chaînon manquant » pour accélérer le déploiement de l'énergie ; (ii) que la diminution de la demande de charbon (projetée à 10% dans le scénario APS), est de 55% dans le scénario NZE – cet écart pouvant être comblé par la fin progressive des centrales au charbon, passant par l'arrêt de l'approbation de nouvelles constructions de centrales à charbon sans réduction d'émission et que (iii) la transition soit recentrée sur la composante humaine.

Maintenir l'objectif ouvert de réduction des émissions à 1,5°C

Les promesses nettes zéro annoncées et les NDC actualisées, reflétées dans leur intégralité dans le scénario APS, représentent les efforts ambitieux mondiaux déployés en matière climatique. Mais dans l'état actuel des choses, elles comblent moins de 20 % de l'écart en 2030 entre les scénarios STEPS et NZE. 12 Gt d'émissions supplémentaires de CO₂ doivent être réduites en 2030 afin de mettre le monde sur la bonne voie (NZE), et cela doit s'accompagner de réductions de près de 90 millions de

tonnes (Mt) des émissions de méthane provenant de l'exploitation des combustibles fossiles (équivalent à 2,7 Gt supplémentaires d'émissions de CO₂). S'aligner sur la trajectoire 1,5°C, nécessite, selon l'AIE des efforts supplémentaires que les gouvernements doivent accomplir. Pour cela, une feuille de route a été suggérée pour le secteur énergie avec un ensemble de mesures ambitieuses à prendre dès maintenant, si on veut contenir le réchauffement climatique à 1,5°C.

- *Une trajectoire de réduction des émissions très rapide dès la décennie 2020.* Renoncer dès à présent à tout nouveau projet d'exploration pétrolière ou gazière, et dès 2035, à la vente de voitures thermiques.

- *La demande et l'offre de l'énergie vont devoir s'ajuster :* Une baisse de près de 8% de la demande d'énergie devra être observée par rapport à 2021 et cela malgré une hausse de la croissance de la population (+ 2 milliard environ à l'horizon 2050). Cette baisse sera possible avec le recours à la sobriété, en agissant sur les changements de comportements en particulier dans le secteur du transport pour réduire significativement nos besoins énergétiques, mais également en agissant sur le potentiel de l'efficacité énergétique. La demande de charbon diminuerait de 600 millions tonnes équivalent charbon en 2050, le pétrole reculerait de 75 % à 24 millions de barils par jour et le gaz naturel diminuerait de 55 % à 1750 milliards de mètres cubes. Les seuls combustibles fossiles qui restent en 2050 seront utilisés dans la production de biens non énergétiques où le carbone est incorporé dans le produit (comme les plastiques), dans des usines couplées à des systèmes de captage, d'utilisation et de stockage du carbone (CCUS), et dans des secteurs à faibles émissions. Le scénario NZE prévoit une hausse de 25% de la demande mondiale finale en électricité sur la période 2020 - 2030, puis à un doublement d'ici 2050. Cette forte demande sera associée à l'électrification des usages énergétiques, principalement du secteur des transports (plus de 60%). La demande de l'industrie de production de l'hydrogène par électrolyse et les combustibles de synthèse joueront un rôle important dans le futur.

En ce qui concerne l'offre énergétique, l'AIE prévoit qu'en 2050, les deux tiers de l'offre énergétique mondiale proviendront des renouvelables (éolien, solaire, bioénergie, géothermie, hydro-énergie). De 2020-2030, un record sera enregistré pour le renouvelable, + 630 GW de solaire photovoltaïque supplémentaire en 2030 avec une capacité multipliée par 20 par rapport au niveau actuel et + 960 GW pour l'éolien, soit quatre fois plus que le niveau de 2020.

Les sources fossiles seraient restreintes à quelques usages (installations avec captage de carbone, plastique, secteurs avec technologies bas-carbone limitées). Le scénario NZE suppose une électrification massive des systèmes : la demande d'électricité aura doublé d'ici 2050 et serait produite à 90 % par des énergies renouvelables et 10 % du nucléaire qui verrait sa production et sa capacité mondiale doubler.

- Les besoins d'innovation et de technologies vertes suivraient une trajectoire étroite.

Ces projections susmentionnées ne sont réalisables que grâce à un effort considérable d'innovation et le recours aux technologies propres. La demande pour le secteur énergétique hydrogène serait multipliée par six et jouerait un rôle complémentaire à l'électricité, pour les batteries de nouvelle génération et le captage direct et le stockage du carbone. Dans son rapport 2021, l'AIE insiste sur la notion de « *trajectoire étroite* », car si les prédictions de diminution des émissions de CO₂ d'ici 2030 vont de pair avec des technologies disponibles, ça ne sera pas le cas pour 2050. La moitié de la réduction des émissions de CO₂ provient de technologies qui ne sont actuellement qu'au stade d'expérimentation.

- L'arrêt de tout nouveau projet dans les fossiles : dans son rapport 2021, l'AIE a appelé les parties prenantes, à savoir les Etats et les entreprises, à cesser immédiatement tout développement de nouveaux gisements d'énergies fossiles, à partir de 2035, à interdire tout nouvel investissement dans les centrales à charbon et de reporter massivement leurs investissements sur les énergies bas carbone (4 100 milliards d'euros par an). Dans le scénario NZE, les dépenses d'investissement totales du secteur de l'énergie augmentent annuellement d'environ 2,5 % du PIB pour arriver à 4,5 % du PIB en 2030, avant de baisser à 2,5 % en 2050. D'ici 2030, la grande majorité des investissements est consacrée aux technologies propres, dont la plus grande part est destinée à la production d'électricité (investissement annuel total passant d'environ 0,5 billion de dollars au cours des cinq dernières années à près de 1 700 milliards de dollars en 2030).

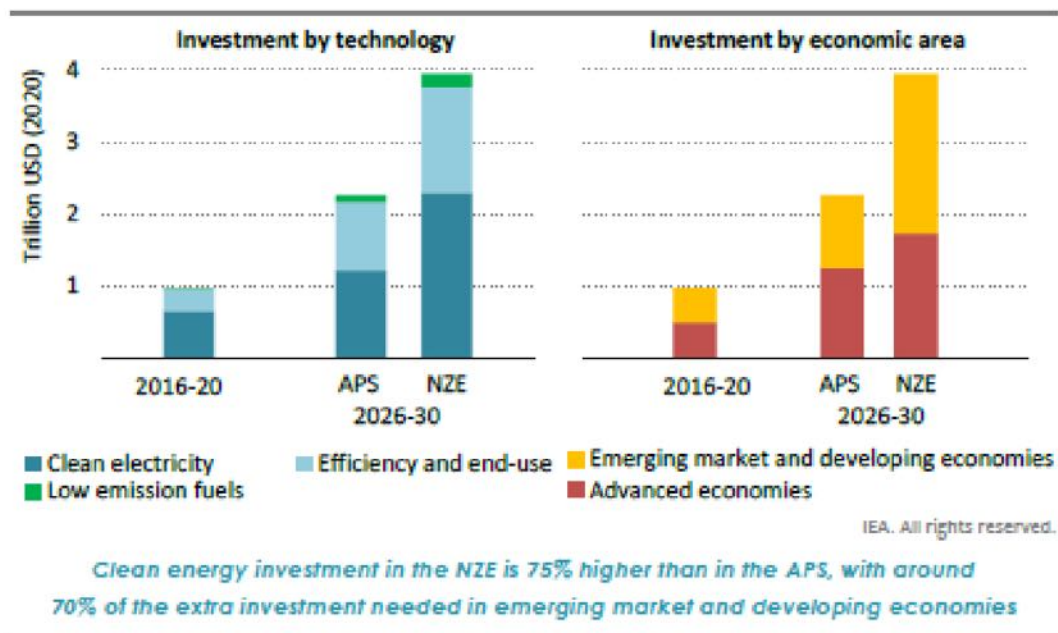
D'ici là, la part la plus importante de ces investissements sera dédiée à la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables. En une seule année, elle passera à 1 300 milliards de dollars, le plus grand montant jamais investi dans la production de combustibles fossiles en un an. Le record d'investissement dans l'approvisionnement en combustibles fossiles était de 1200 milliards de dollars en 2014.

En plus de ces mesures, l'AIE a souligné le rôle de la finance durable et de la composante humaine pour assurer cette transition énergétique à l'horizon 2050.

Mobilisation des investissements et de la finance

Les investissements liés à la transition énergétique propre passeront à environ 4 000 milliards de dollars par an d'ici 2030. Le scénario APS voit des progrès sur ce front, mais le niveau d'investissement requis dans le scénario NZE est trois quarts plus élevé. Cette expansion se traduit par une augmentation de 1 100 milliards de dollars par rapport au scénario APS (des investissements annuels dans la production d'énergie propre et les infrastructures électriques), une hausse de 500 milliards de dollars des investissements dans l'efficacité énergétique et la décarbonation des utilisations finales dans les secteurs du bâtiment, de l'industrie et des transports.

Figure 38 : Taux des investissements en énergie propres et les investissements par type et par scénario sur la période 2026-2050



Dans le rapport AIE (2021), les besoins totaux en investissements énergétiques dans les scénarios se subdivise en quatre catégories :

Faibles émissions : investissements qui fournissent de l'énergie ou des services énergétiques à zéro émission (ou à très faible émission) notamment ceux en liens avec l'évolution du système énergétique. Les exemples incluent les énergies renouvelables, les carburants à faibles émissions, le CCUS et la capture directe de l'air.

Contingent : investissements qui pourraient fournir ou permettre une énergie ou des services énergétiques à zéro émission, autres que dans la première catégorie. Nous citerons l'investissement dans les réseaux électriques, l'électrification des équipements d'utilisation finale ou l'amélioration de l'efficacité des appareils électriques, et les véhicules électriques, qui reposent sur la décarbonation éventuelle de la production d'électricité.

Transition : investissements qui permettent de réduire les émissions mais ne fournissent pas eux-mêmes d'énergie ou de services énergétiques à zéro émission. Les exemples incluent des mesures d'efficacité ou de flexibilité qui réduisent l'utilisation de combustibles fossiles, des investissements dans la substitution des combustibles du charbon ou du pétrole par des alternatives moins polluantes

Combustibles fossiles : investissement qui ne permettent pas de réduire les émissions à partir de 2021, soit les investissements dans le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Les exemples incluent les investissements dans les mines de charbon et dans les centrales électriques au charbon sans relâche.

La réalisation de transitions énergétiques propres et rapides dépend aussi de l'amélioration de l'accès à un financement à faible coût pour les projets d'énergie propre. Il est estimé qu'environ 70 % des investissements dans les énergies propres devront être réalisés par des développeurs privés, des consommateurs et des financiers en réponse aux signaux du marché énergétique et aux politiques définies par les gouvernements. Mais les acteurs publics de financement sont également nécessaires comme les SEO (State-Owned Entreprises) qui devront canaliser les capitaux privés. La mobilisation des investissements dans les énergies propres dépendra de l'obtention de financements auprès de sources locales et internationales. Pour la mobilisation des investissements internationaux, l'institution de financement du développement (IFD) et les banques multilatérales de développement (BMD) joueront un rôle central de catalyseur. Rappelons que 100 milliards de dollars par an dans le financement climatique est nécessaire pour respecter l'engagement pris par les pays développés. En 2020, les engagements de financement climatique déclarés par les banques multilatérales de développement (BMD) ont dépassé 65 milliards de dollars, soit plus du double du montant d'il y a cinq ans, et représentaient près de 30 % de leur financement total. Certaines BMD visent à faire passer les investissements climatiques de 30 % à plus de 50 % de leur portefeuille d'ici 2025.

De plus, pour que les transitions énergétiques puissent se dérouler dans de bonnes conditions, les développeurs et les financiers privés vont devoir augmenter le montant des capitaux alloués (notamment aux économies émergentes et en développement). L'importance croissante accordée à la finance durable doit encourager ces changements. *Cependant, tout le monde s'accorde sur le fait que ce financement durable n'est possible que les entreprises se fixent des objectifs crédibles (tenant compte des avancées de la Science, et donc des rapports du GIEC).* Ces objectifs doivent inclure des mesures de réduction des émissions et reposer sur des indicateurs de performance (KPI) permettant à la communauté financière de tenir compte de ces investissements contingents et de transition dans les taxonomies de la finance durable.

Si les transitions énergétiques renvoient aux changements technologiques, à l'utilisation de l'énergie renouvelable ou encore au financement des investissements, elles doivent être aussi centrées sur l'évolution des pratiques sociales et les modes de vie. Par mode de vie, on entend ici les modes de consommation, les modes d'habitat, la mobilité... Il est primordial de prendre en charge les bouleversements susceptibles d'être engendrés par ces transitions. C'est par exemple le cas de la pauvreté énergétique. Aucun système n'est durable s'il continue d'exclure une grande partie de la population mondiale de l'accès à l'énergie moderne. Cela signifie aussi placer les considérations d'emploi, d'équité, d'inclusion, d'accès et de développement durable au centre de ce processus. Le rapport de l'AIE (2021) avançait les chiffres de 13 millions de travailleurs supplémentaires d'ici 2030 dans le scénario APS, et de 26 millions dans le scénario NZE. Bien entendu, les citoyens devront participer à ce processus en axionnant le levier de la sobriété énergétique.

Conclusion

Face à l'urgence climatique (émissions des gaz à effet de serre, pollution atmosphérique, montée des températures et des eaux...) et l'éventuelle raréfaction des énergies fossiles, les principaux acteurs (institutions internationales et nationales, Etats, entreprises, consommateurs) du secteur énergétique (et des autres secteurs) sont amenés à changer leurs modes d'extraction, de production, d'échange, d'utilisation et de consommation de l'énergie. Les dernières recommandations du GIEC (IPCC, 2022) sont d'ailleurs très claires, il convient d'infléchir la tendance actuelle dans les trois ans qui viennent, sans cela, notre adaptation aux changements climatiques devra être brutale et contrainte. La notion de *transitions énergétiques* symbolise à elle-seule, cette nécessité de s'adapter aux modifications de son environnement.

C'est dans ce contexte de profonde incertitude, qu'une réflexion sur les scénarios à l'horizon 2030 - 2050 constitue un enjeu de taille. Penser l'avenir, c'est une manière d'imaginer un futur proche et lointain à la fois, c'est un moyen de changer de trajectoire, c'est une capacité à se projeter et à mettre tous les moyens nécessaires pour atteindre son objectif. Bien entendu, il existe des divergences importantes sur la manière de narrer ce futur. De nombreux Etats prônent avant tout la sécurité énergétique. Ils expriment ainsi leur volonté de ne pas dépendre, sur l'échiquier géopolitique, d'un fournisseur trop envahissant (voir tous les débats autour des gazoducs reliant la Russie à l'Europe, et la volonté d'agir sur la demande d'énergie fossile, IEA, 2022), D'autres font remarquer que les transitions énergétiques doivent s'appuyer sur une approche holistique. Il s'agit de prendre en compte toute la complexité du système énergétique, en insistant sur la *dimension sociale* (les conséquences d'une hausse du prix de l'énergie sur une population fragilisée, les inégalités d'accès, la précarité énergétique...), la *dimension géopolitique* (conflits et intérêts géopolitiques autour de l'exploitation et le transport du gaz et du pétrole), la *dimension environnementale* (émissions de GES, pollution atmosphérique), la *dimension culturelle* (comportement des consommateurs, mode de vie), la *dimension technologique* (investissements, brevets...) ou encore la *dimension économique* (évolution de la demande et de l'offre d'énergie, sobriété énergétique, prix de l'énergie ...).

De ce point de vue, les scénarios constituent un excellent exercice d'analyse et de compréhension des forces en présence, des images du futur que l'on projette et du niveau d'acceptabilité sociale du changement qu'elles nécessitent. Dans une approche systémique, le scénario conduit à décrire comment les choses devraient être. La scénarisation devient un champ de recherche qui s'inscrit au cœur de la modélisation du système énergétique... Nous ne sommes plus dans la logique « bien-pensante » de la trilogie (Business as Usual qui correspond à la vision pessimiste, scénario médian et vision optimiste) mais bien dans la définition d'hypothèses de travail. C'est un véritable changement de paradigme qu'il convient d'engager et la sobriété énergétique pourrait bien s'imposer comme l'un des principaux leviers de ce changement.

Références bibliographiques

- ADEME (2021), *Transitions 2050 - Rapport - Synthèse*.
- ADEME (2021), *Transitions 2050 - Rapport - Compressé*.
- ADEME (2013). *Les scénarios de transition énergétique 2030 - 2050*.
- ADEME (2009). *Marchés, emplois et enjeux énergétiques liés aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique. Situation 2007 - 2008*. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.
- ALVARES C. (2021). *COP 26, le pacte de Glasgow, reflet du déni climatique des pays riches*. Novethic, le 15 novembre. <https://www.novethic.fr/actualite/environnement/climat/isr-rse/le-pacte-de-glasgow-n-est-que-le-reflet-du-deni-climatique-des-pays-riches-150309.html>
- ANCEL F. (2018). *Perspectives Energies 2050*. Connaissance des Énergies, Editions.
- ANSARI D., HOLZ F., AL KUHLANI H. (2019). *Energy Outlooks Compared : Global and Regional Insights*. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung DIW Berlin.
- AOUN M.C (2018). *Point de vue. Perspectives Energies 2050*, Connaissances des Énergies, 15-18.
- APPERT O. (2018). *Point de vue. Perspectives Energies 2050*, Connaissances des Energies, 19-22.
- ASSOCIATION NEGAWATT (2021). *La transition énergétique au cœur d'une transition sociétale*. Synthèse du scénario NegaWATT 2022. <https://negawatt.org/IMG/pdf/synthese-scenario-negawatt-2022.pdf>
- ATTALAH M. (2020), *L'apport de la science-fiction, raconter le capitalisme...* in Desaunay C., De Jouvenel F. (eds), *Scénarios de rupture à l'horizon 2040 - 2050*. Rapport VIGIE 2020, Futuribles International.
- AYMOZ G. (2018). *Les outils mis au service des pouvoirs publics pour promouvoir l'efficacité énergétique dans les bâtiments*. *Annales des Mines*, n°90, 45 - 48.
- BAGHAI M., COLEY S., WHITE D. (1999). *The Alchemy of Growth : Practical Insights for Building the Enduring Enterprise*. Perseus Books.
- BALLOT-MIGUET B., BUI-VIVAN F., DURAND J.P, GOUSSARD L., PETIT S., TIFFON G. (2019). *Industrie et grande distribution : sociologie de l'efficacité énergétique*. *La Revue de l'Energie*, n°646, 16 - 30.
- BALZANI V. (2019), *Saving the planet and the Human Society : Renewable Energy, Circular Economy, Sobriety*. Substantia. *International Journal of the History of Chemistry*, vol 3 (2), 9 - 15.
- BELLEVRAT A.R, RUDINGER A., COLOMBIER M., GUERIN E. (2013). *Scénarios de transition énergétique*. IDDRI. Working Paper, n°9, 13 juin.
- BERGER G. (1959). *L'attitude prospective*. Encyclopédie française, tome XX, *Le monde en devenir : histoire, évolution, prospective*. Paris. Société Nouvelle de l'Encyclopédie française. p. 20/54/12-14.

- BERGER G. (1957). Sciences Humaines et prévision. *Revue des deux Mondes* (1829-1971), 1er février, 417 - 426.
- BOBIN J.L, NIFENECKER H., STEPHAN C. (2021), *L'énergie dans le monde, bilan et perspectives*, EDP Sciences.
- BOULANGER P.M (2007)). Les barrières à l'efficacité énergétique. *Reflets et perspectives de la vie économique*, tome XLVI, 49 - 62.
- CDE (2018). Perspectives énergétiques 2050. Connaissance de l'énergie.
- CHANCEL L, SAUJOT M. (2013). Inégalités, vulnérabilités et transition énergétique, IDDRI, *Policy Briefs*, n°02/13 www.iddri.org
- CHARLIER D. (2014). Efficacité énergétique dans le bâtiment et paradoxe énergétique : quelles conséquences pour la transition énergétique. *Revue d'Economie Industrielle*, vol 148, 4^e trimestre, 229 - 262.
- CHATEAU B. (2016). Les politiques d'efficacité énergétique : problématiques, moyens et outils d'évaluation. *Encyclopédie de l'énergie*.
- CME (2013). *Les scénarios mondiaux de l'énergie à l'horizon 2050*. Conseil Mondial de l'Énergie.
- COCHET Y. (2000). *Stratégie et moyens de développement de l'efficacité énergétique et des sources d'énergie renouvelables en France*. Rapport au Premier Ministre. <http://www.ofme.org/documents/actualite/200009/cochet.pdf>
- COLIN A., VAILLES C., HUBERTICE R. (2019), *Comprendre les scénarios de transition - Huit étapes pour lire et interpréter ces scénarios*, 4CE (Institute for Climate Economics).
- COLLSTE D., AGUIAR A.P D., HARMACKOVA Z.V, GALAFASSI D., PEREIRA L.M, SELOMANE O., DER LEEUW S. (2019). *Three Horizons for the Sustainable Development Goals : A Cross Scale Participatory Approach for Sustainability Transformations*. https://sustainability.sciencesconf.org/data/pages/52.Collste_2019.pdf
- CORMIER C., TESKE S. (2013), *Scenario for Energy transition*. Greenpeace France.
- CURRY A. (2012). The Scenarios Question in *The Future of Futures*. Association of Professional Futurists.
- CURRY A., HODGSON A. (2008). Seeing in Multiple Horizons : Connecting Futures to Strategy. *Journal of Futures Studies*. Vol 13 (1). 1 - 20.
- CURRY A., HODGSON A., KELNAR R., WILSON A. (2006). *Intelligent infrastructure systems : The scenarios - towards 2055*. London : Foresight Programme. Retrieved April 18, 2008, from http://www.foresight.gov.uk/Previous_Projects/Intelligent_Infrastructure_Systems/Reports_and_Publications/Intelligent_Infrastructure_Futures/Index.html
- DAVID B., DE LATTRE-GASQUET M., MATHY S., MONCOMBLE J.E, ROZENBERG J. (2014). Prospective énergétique : le possible, le souhaitable et l'acceptable. *Futuribles*, n°398, janvier-Février. 37 - 47.
- DAVIS S.J & al. (2018), Net-Zero Emissions Energy Systems. *Science*, n°360, june 29th, 1-2.

- DAURES P., FRISCH J.R (1974). Le nouveau contrat mondial : les effets de la crise énergétique sur l'équilibre international. *Revue d'Economie Politique*. Vol 84, n°5, 639 - 647.
- DELEPOUVE M. (2016), *Transition énergétique, changement de société*, Editions du Croquant.
- DEMAILLY D. & al. (2019), *I4CE, combining economic recovery with the climate. Institute for Climate Economics. Annual Report*.
- DENOLLE A.S (2016). Commentaire de la loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte. *Revue Juridique de l'Environnement*, vol 41, 99 - 104.
- DERDEVET M. (2013). La précarité énergétique : un chantier européen prioritaire. *Géoéconomie*, n°66, 37 - 50.
- DERY P. (2007). *Substitution énergétique Mythe ou réalité ? Rapport sur l'Énergie*.
- DESAUNAY C., DE JOUVENEL F. (2020), *Scénarios de rupture à l'horizon 2040 - 2050. Rapport VIGIE 2020, Futuribles International*.
- DEVALIERE I. (2008). Au-delà des impayés d'énergie, comment appréhender la précarité énergétique ? *Population, vulnérabilités et inégalités écologiques*, vol 1, 191 - 201.
- DIEMER A. (2021), Pourquoi la sobriété énergétique doit s'imposer aux économies du Nord ? *Revue Francophone du Développement Durable*, n°18, octobre, p. 85 – 97.
- DIEMER A. (2015a). Loi sur la transition énergétique, croissance verte et développement durable. *Revue Francophone du Développement Durable*, n°6, octobre, 23 - 46.
- DIEMER A. (2015a), Une théorie décroissante de l'énergie. *Revue Francophone du Développement Durable*, n°6, octobre, 192 - 212.
- DIEMER A. (2008), La question énergétique au cœur du développement durable ? *Cahiers du CERAS*, janvier, 1 -32.
- DUPLESSIS B. (2009). Mise en œuvre des contrats de performance énergétique pour l'amélioration des installations de production frigorifique. École Nationale Supérieure des Mines de Paris. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00005241/document>
- DNV GL (2020). La société norvégienne indépendante de classification.
- DUCKWORTH M., DUNN C., RINGLAND G., SCHULTZ W., WILLIAMS H. (2018), *Drivers of Change*. SAMI Consulting. Robust decisions in uncertain times. October, 28 p.
- DURUISSEAU K. (2014). *L'émergence du concept de transition énergétique. Quels apports de la géographie*. BSGLG, 63, 21 - 34.
- ELOI L. (2012), Faut-il décourager le découplage ? *Revue de l'OFCE*, n°120, p. 235 - 257.
- ENEA CONSULTING (2018). *Point de vue. Perspectives Energies 2050, Connaissances des Énergies*, p. 57 - 60.
- ENGIE, (2021), *Dashboard de la transition énergétique*.
- EXXON MOBIL (2019). *Outlook for Energy Data*.

- EZRATTY V., DUBURCQ A., EMERY C., LAMBROZO J. (2009). Liens entre l'efficacité énergétique du logement et la santé des résidents : résultats de l'étude européenne LARES. *Environnement, Risques et Santé*, vol 8, n°6, 497 - 506.
- FEIDT M. (2009). Efficacité énergétique, quels critères ? *Termotehnica*, vol 2, 26 - 33.
- FAZELI R., DAVIDSDOTTIR B. (2015). Energy Modeling of Danish Housing Stock Using System Dynamics. Conference Paper, 33rd International Conference of System Dynamics, 1 - 19. https://www.researchgate.net/publication/281375438_Energy_Modeling_of_Danish_Housing_Stock_Using_System_Dynamics/figures?lo=1
- FHSC (2009). *Scenario Planning*. Guidance Note. Foresight Horizon Scanning Centre. Government Office for Science. October. 37 p.
- FORRESTER J.J (1968), *Principles of Systems*, Pegasus Communications.
- FRERIS L., INFELD D. (2021). *Les énergies pour une production d'électricité*. Dunod.
- FRESSOZ J.B (2014), *Pour une histoire désorientée de l'énergie*, 25èmes journées Scientifiques de l'Environnement - L'économie verte en question, Février, Créteil. Paris. HAL 00956441.
- FURJIMORIA S. (2017), SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways, *Global Environmental Change* 42, p. 268-283
- GARFINKEL H. (1967), *Studies in Ethnomethodology*. Englewood Cliffs. Prentice Hall. Traduction française, *Recherches en Ethnométhodologie*, PUF, 2007.
- GAUDIN T. (2018). *Point de vue. Perspectives Energies 2050*, *Connaissances des Énergies*, p. 77-82.
- GAUDIN T. (2005), *La prospective*. PUF. Seconde édition (2013).
- GAUDIN T. et al. (1990). *2100, récit du prochain siècle*, Payot.
- GAZPROM (2020). *Energy Report*. August.
- GEA. *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 2012. ISBN 9781 10700 5198 hardback 9780 52118 2935 paperback.
- GIRAUDET L. G, BOURGEOIS C., QUIRION P. (2020). Efficacité économique et effets distributifs de long terme des politiques de rénovation énergétique des logements. *Economie et Prévision*, n°217, 43 - 63.
- GLADKYKH G., DAVIDSDOTTIR B., DIEMER A. (2021), When Justice Narratives meet energy system models : Exploring energy efficiency, sustainability and universal access in Sub-Saharan Africa. *Energy Research and Social Science*, 79, p. 1 - 17.
- GODET M. (2001), *Manuel de Prospective Stratégique*, tome 1, une discipline intellectuelle, tome 2, L'Art et la Méthode. Dunod.
- GODET M. (1993), *Apprendre à anticiper* in HATEM F. (ed), *La prospective, pratiques et méthodes*, Economica.
- GODET M. (1990). Integration of scenarios and Strategic Management. *Futures*. September, 730 - 739.

- GODET M. (1983). Impacts croisés : exemples d'applications. *Futuribles*. Novembre. 41 - 51.
- GODET M. (1977), *Crise de la prévision, Essor de la prospective*, Presses Universitaires de France.
- HATEM F. (1993), *La prospective, pratiques et méthodes*, Economica.
- HERBST A., TORO F., REITZE F., JOCHEM E. (2012), Introduction to Energy Systems Modelling, *Swiss Journal of Economics and Statistics*, vol 148, 111 - 135.
- HEUBAUM H., BIERMANN F. (2015). Integrating Global Energy and Climate Governance : The Changing Role of The International Energy Agency. *Energy Policy*, vol 87, p. 229 - 239.
- HUSSERL E. (1913), *Logische Untersuchungen, Erster Band. Prolegomena zur reinen Logik*. Halle a.d.S, Max Niemeyer. Traduction française Recherches Logiques, tome 1, *Prolégomènes à la logique pure*, PUF, 1959.
- IBBITSON J., BRICKER D. (2019), *Empty Planet, The Shock of Global Population Decline*, Penguin, Random House.
- IEA (2022). A 10-Point Plan to Cut Oil Use. *International Energy Agency*, march 18th, 17 p.
- IEA (2021). *Renewables, Analysis and Forecast to 2026*. Report. December.
- IEA (2021). *World Energy Outlook*, October.
- IEA (2021). *Net Zero by 2050, A Road Map for the Global Energy Sector*, Report, May.
- IEA(2020). *Global Energy Review*, July.
- IEA (2019). *World Energy Outlook 2020*, Executive Summary.
- IEA (2014). *Capturing the Multiple Benefits of Energy Efficiency*.
- IIDF (2016). *La transition. Connaître et partager pour agir*. Octobre. Institut international de la francophonie.
- IPPC (2022), Climate change 2022, Mitigation of Climate change, Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2913 p.
- IPPC (2021), Climate Change 2021 - The biophysical Science Basis. [archive], sur ipcc.ch (consulté le 15 août 2021).
- IRENA (2018). Rapport. *Agence Internationale pour les énergies renouvelables*.
- IRENA (2012). Rapport. *Agence Internationale pour les énergies renouvelables*.
- JACCARD M. K (2005), *Sustainable Fossil Fuels : The Unusual Suspect in the Quest for Clean And Enduring Energy*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- JANCOVICI (2012). *Les limites énergétiques de la croissance*, Gallimard, Le débat, n°171, p. 80 - 95.
- JEFFERSON M. (2012). Shell Scenarios : what really happened in the 1970s, and what may be learned for Current World Prospects. *Technological Forecasting and Social Change*, vol 79.

- JEFFERSON M., VOUDOURIS V. (2011). Oil Scenarios for Long Term Business Planning : Royal Dutch Shell and Generative Explanation, 1960 - 2020. *CIBS Working Papers Series n°18*. January, 41 p.
- JEMLI R., CHTOUROU N. (2019). *Mutation énergétique et développement durable : survol théorique*. In R. Feki, S. Redzepagic (eds), *Orienter l'investissement vers un développement durable et une croissance partagée*. CEMAFI International.
- JOUZEL J. (2021), COP 26, le problème c'est le fossé entre les textes et la réalité. *Libération*, 13 novembre.
- JULIAN M. (2021), *Evaluation et optimisation des stratégies visant à introduire les énergies renouvelables dans la production électrique pour l'habitat*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- JENKINS K., McCAULEY D., HEFFRON R., HANNES S., REHNER R. (2016), Energy justice : A conceptual review. *Energy Research and Social Science*, 11, p. 174–182,
- LATOUCHE S., HARPAGES D. (2013). *Le temps de la décroissance*. Le Bord de l'eau.
- LAZAR R. (2014), Transition énergétique : quels moyens pour diversifier le mix énergétique ? *Revue de l'Energie*, vol 622, p. 457 - 462.
- LEVACHER L., CLODIC D., MARECHAL F. (2009). Efficacité énergétique pour l'industrie, des technologies existantes aux solutions innovantes. ECLEER. https://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/actes/congres_2009/Communications/60.pdf
- LEVY J.B (2021), *Extraits du propos introductif du PDG d'EDF relatifs aux énergies renouvelables*. Commission du Sénat, le 10 novembre.
- LIPIETZ A. (2012). *Le Green Deal*. La Découverte.
- LUTZ W., GOUJON A., KCS., STONAWSKI M., STILIANAKIS N. (2018), *Demographic and Human Capital Scenario for the 21st century*. Luxembourg. Publications Office of the European Union.
- LUTZ W., MUTTARAK R. (2017), Forecasting Societies Adaptive Capacities Through A Demographic Metabolism Model, *Nature Climate Change*, vol 7, 177 - 184.
- MARESCA B. (2014). *Sur le chemin de la sobriété énergétique. Engager les français au-delà des éco-gestes*. CREDOC, Consommation et modes de vie, n°265, 1 - 4.
- MEUNIER F. (2008), *Les énergies renouvelables*, Le cavalier Bleu.
- MIETZNER D., REGER G. (2004), *Scenario Approaches History, advantages and disadvantages*. EU Seminar. New Technologies Foresight, Forecasting & Assessment, Seville, 13 - 14 may, p. 48 - 61.
- NAUDET G., REUSS P. (2008), *Marchés et prix de l'énergie*, EDP Sciences.
- OCDE (2014). *Intensité énergétique*. In Economic, Environmental and Social Statistics, Éditions OCDE, Paris. DOI : <https://doi.org/10.1787/factbook-2014-43-fr>
- O'NEILL B. (2015), *The roads ahead : Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century*, p. 169, 180.

- ORIOU J. (2020), Efficacité énergétique en Allemagne, Etat des lieux : novembre 2020, Office franco-allemand pour la transition énergétique, OFATE – DFBEW, p. 1-6.
- PAPON P. (2000), L'anticipation des ruptures. la prospective des sciences et techniques, et l'identification précoce des zones de rupture. *Futuribles*, n°366, Recherches, Sciences et Techniques.
- PERSOON L. & al. (2021). Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. *Environmental Science and Technology*. November, p. A – L.
- PERTHUIS C., SOLIER B. (2018). *La transition énergétique face au tempo de l'horloge climatique*. Chaire Economie du Climat. Septembre. <https://www.chaireeconomie.duclimat.org/wp-content/uploads/2018/09/18-09-14-FLM-Transitions-énergétiques.pdf>
- PESCATORI A., STUERMER M., VALCKX N. (2021), La flambée des prix de l'énergie risque de durer jusqu'à l'an prochain, Fonds Monétaire International (FMI), Blog. <https://www.imf.org/fr/News/Articles/2021/10/22/blog-surg-ing-energy-prices-may-not-ease-until-next-year>
- PFENNINGER S., HAWKES A., KEIRSTEAD J. (2014), Energy Systems Modeling for Twenty-first Century Energy Challenges, *Renewable and Sustainable Energy Review*, vol 33, p. 74 - 86.
- PINEAU P.O (2021). L'efficacité énergétique pour soutenir la transition énergétique : enrichir le Québec et lutter contre les changements climatiques. Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal. https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2021/08/MemoireLoiEE_HEC-Pineau_aout2021.pdf
- RAGAZZI G. (2019). *Les modèles économiques dans la Transition Énergétique bas carbone à l'échelle locale*. Economies et finances. Université Paris sciences et lettres.
- RENOU P. (1991), Modélisation des substitutions énergétiques dans les pays de l'OCDE, *Cahier du CEG*, n°10, hal-02432734.
- REVEST C. (2013). *Les termes clés de la transition énergétique*. Sciences et Techniques. <https://balises.bpi.fr/les-termes-cles-de-la-transition-energetique/>
- RIAHA K. (2017), The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications, *Global Environmental Change* 42, p. 153-168.
- ROCKSTRÖM J. & al. (2009). Planetary Boundaries : Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, vol 14, 1 – 26.
- RUEDINGER A., AYKUT S.C (2015), Les transitions énergétiques allemande et française. *Annuaire français de relations internationales*. Paris : La Documentation française, 16, 389-407.
- SCHWARTZ P. (1991). *The Art of Long View*. Doubleday Publisher.
- SCHOEMAKER P.J.H, VAN DER HEIJDEN C.A.J.M (1993). Strategic Planning at Royal Dutch. Shell. *Journal of Strategic Change*. Vol 2, 157 - 171.
- SER (2020). *L'évaluation et analyse de la contribution des énergies renouvelables à l'économie de la France et de ses territoires*. Syndicat des Energies Renouvelables.

- SHARPE B., HODGSON A., LEICESTER G., LYON A., FAZEY I. (2016). Three Horizons : a Pathways Practice for Transformation. *Ecology and Society*. June, vol 21 (2), 16 p.
- SHARPE B. (2013). *Three Horizons : Patterning of Hope*. Triarchy Press. Axminster. Devon. UK.
- SHARPE B., HODGSON T. (2006). *Intelligent Infrastructure Futures Technology Forward Look*. Report for the Foresight Programme of the Office of Science and Technology (UK). London. http://databaseanswers.org/foresight/Technology_Forward_Look.pdf
- SHARPE B., HODGSON T., PAGE I. (2006). *Energy Security and Climate Change*. Discussion Paper. International Futures Forum. Aberdour.
- SHELL (2019). *Outlook for Energy : A perspective to 2040*. Report.
- SHELL (2012). *40 years of Shell Scenarios, 1972 - 2012*.
- SHELL (2008). *Shell Global Scenarios to 2025*, 2nd Edition.
- SPITTLER N., GLADKYKH G., DIEMER A., DAVIDSDOTTIR B. (2019), Understanding the Current Energy Paradigm and Energy System Models for More Sustainable Energy System Development. *Energies*, vol 12, 1584, 1-22.
- STEFFEN W. & al. (2015). Planetary Boundaries : Guiding Human Development on a Changing Planet. *Science*. February, vol 347, Issue 6223.
- STERLING GREGG J., NYBORG S., HANSEN M., SCHWANITZ V.J, WIERLING A., ZEISS J.P, DELVAUX S., SAENZ V., POLO-ALVAREZ L., CANDELISE C., GILCREASE W., ARROBBIO O., SCIULLO A., PADOVAND. (2020), Collective Action and Social Innovation in the Energy Sector : A Mobilization Model Perspective. *Energies*, vol 13, p. 1 - 24.
- STOFFAES C. (1982). La vérité (économique) sur le prix du pétrole. *Politique étrangère*, vol 47, n°3, 595 - 616.
- TOTAL (2020). Communiqué de presse, résultat du quatrième trimestre 2020.
- TOULOUSE E. (2020). La sobriété énergétique. Une notion disruptive de plus en plus étudiée. *La Revue de l'Energie*, n°649, mars-avril, 21 - 32.
- VILLALBA B., SEMAL L. (2018). *Sobriété énergétique. Contraintes matérielles, équité sociale et perspectives institutionnelles*. Editions Quae.
- WEC (2013). *World Energy Scenarios : Composing Energy Futures to 2050*. World Energy Council.
- WIRZ H. (2018). Décroissance et sobriété : une nouvelle mission pour l'urbanisme ? *Tous Urbains*, n°22, 26 - 29.
- WIESENFELD B. (2013), *Promesses et réalités des énergies renouvelables*, EDP Sciences.
- ZAZINETTI (2008), Le peuplement de la Terre se concentre t'il sur les littoraux ? *Population et Avenir*, n° 689, p. 14 - 16.