

SCÉNARIOS SHELL

Sky

ATTEINDRE LES OBJECTIFS
DE L'ACCORD DE PARIS



2050

2055

2060

2065

2070

2075

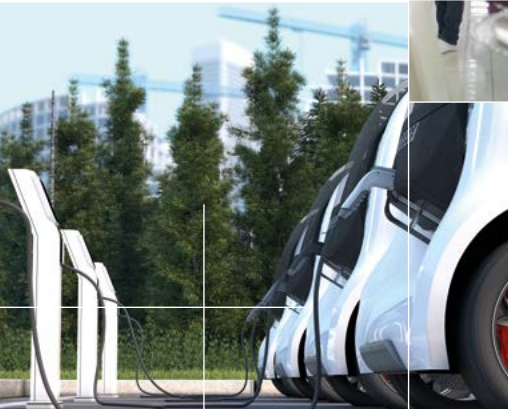
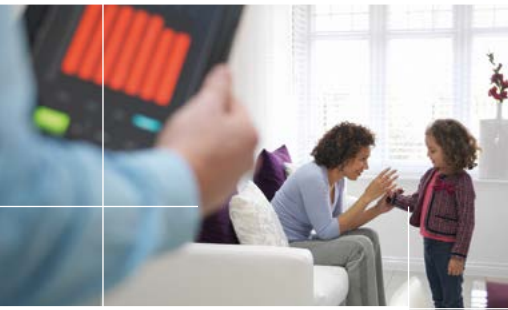
20





SOMMAIRE

Chapitre 1	Nettement en dessous de 2 °C : l'ambition de Paris	3
Chapitre 2	Les défis d'un scénario pour le 21 ^e siècle	11
Chapitre 3	Des Montagnes et des Océans au Sky	19
Chapitre 4	Sky - Un scénario de réussite	25
Chapitre 5	Transformations sectorielles	35
Chapitre 6	Atteindre l'équilibre	53
Chapitre 7	L'ambition de Paris réalisée	63





2050

2055

2060

2065

2070

2075

2080

CHAPITRE 1

NETTEMENT EN DESSOUS DE 2 °C : L'AMBITION DE PARIS

1. NETTEMENT EN DESSOUS DE 2 °C : L'AMBITION DE PARIS

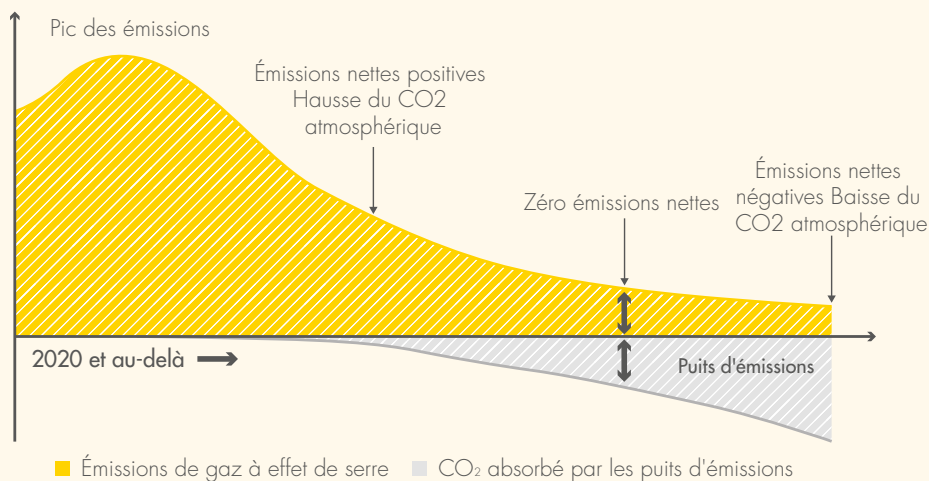
L'Accord de Paris de décembre 2015 sur le changement climatique est un document remarquable. En seulement 25 pages, il propose un plan directeur pragmatique pour résoudre l'un des défis les plus complexes auxquels la société se trouve confrontée. L'Accord de Paris fixe la limite de la hausse de la température globale nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et s'engage à poursuivre l'action menée pour limiter l'élévation de la température à 1,5 °C .

Pour atteindre cet objectif, l'Accord de Paris appelle à un « équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle. » Cet accent mis sur un « équilibre », ou sur ce que l'on appelle également « zéro émission nette », est une évolution fondamentale car elle reconnaît que la hausse de la température de surface est directement liée au total des émissions cumulées de dioxyde de carbone (CO₂) dans

l'atmosphère. Si le total des émissions cumulées dépasse un seuil donné, il sera peut-être nécessaire d'aller au-delà du zéro net et d'obtenir des émissions « nettes négatives », où la quantité de CO₂ extraite de l'atmosphère est supérieure à celle qui continue à être émise. Dans ce cas, la température moyenne à la surface du globe peut chuter.

4

L'ACCORD DE PARIS PRÉCONISE UN PLAFONNEMENT DES ÉMISSIONS DANS LES MEILLEURS DÉLAIS, PUIS UN DÉCLIN JUSQU'À ZÉRO ÉMISSION NETTE AU COURS DE LA SECONDE MOITIÉ DU SIÈCLE.



Source : Schéma Shell

La mise en œuvre de l'Accord est actuellement en cours : la plupart des gouvernements nationaux réagissent rapidement à l'appel à ratification et commencent à apporter leurs premières contributions nationales. De nouvelles coalitions se sont également constituées autour de la tarification du carbone et de l'élimination progressive du charbon par les gouvernements, mais la tâche ne fait que commencer. L'espoir de réussite est là, mais rien n'est acquis d'avance.

Le contexte pour trouver une issue

Notre publication de 2016, *(Une vie meilleure avec une planète saine)*, reconnaissait le désir d'une grande partie de la population mondiale d'avoir une vie meilleure, impliquant l'augmentation de la demande énergétique dans les pays relativement pauvres même si elle pourrait chuter dans les pays relativement riches. Dans ce contexte d'une vie meilleure pour tous, nous avons mis en lumière les changements clés requis dans chaque secteur de l'économie – industrie, transport, bâtiment et énergie – pour obtenir un monde avec zéro émission nette de CO₂ issue de l'énergie.

Même si nous savons, en général, quelles conditions essentielles et quels changements de systèmes énergétiques sont requis pour atteindre zéro émission nette, il serait utile d'avoir une marche à suivre pour atteindre cet objectif d'ici 2070 – une échéance compatible avec le maintien de la hausse de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C. L'avenir étant imprévisible, en particulier lorsqu'il s'agit de systèmes sociétaux mondiaux et complexes sur une période de temps étendue faisant appel à la technologie, à la politique gouvernementale et au comportement des consommateurs, la meilleure approche pour explorer cette marche à suivre consiste à utiliser des scénarios.

Scénarios énergétiques pour les voies à suivre

Les scénarios sont des histoires alternatives du futur qui peuvent nous aider à tirer des enseignements utiles pour le présent. Il ne s'agit pas de propositions politiques, ni d'arguments en faveur de ce qui doit être fait ou non. Il ne s'agit pas non plus de prévisions sur ce qui sera fait, par la société, l'industrie ou toute autre personne. Il s'agit de descriptions de ce qui pourrait être fait, de marches à suivre plausibles pour l'avenir et de connaissances utiles à explorer en cours de route.

La réflexion de Shell basée sur des scénarios intègre la question du changement climatique depuis deux décennies, avec différents scénarios montrant divers niveaux de réussite dans le traitement de ce problème crucial au niveau mondial. Mais avec des échéances typiques de 25 ans dans les années 1990 et de 50 ans au début des années 2000, la pleine résolution de la question climatique par la transformation complète du système énergétique mondial n'a jamais été clairement visible. Cette transformation a toujours été, et demeure, un parcours qui se



Selon le scénario Sky, le taux de baisse des émissions mondiales après 2035 dépasse le taux de croissance constaté au cours de ce siècle : un accomplissement vraiment remarquable.

mesure sur plusieurs générations, s'étendant désormais jusqu'à la fin de ce siècle.

En 2013, Shell a publié ses **Scénarios nouvelle optique** comprenant deux perspectives intitulées **Montagnes et Océans**. Pour la première fois, les scénarios présentaient des modélisations de systèmes énergétiques se prolongeant jusqu'en 2100, ce qui permettait de visualiser des transitions à long terme dans leur intégralité.

Tout en explorant des contextes socio-politiques très différents, les scénarios montrent que l'application persistante et étendue de cadres politiques ciblant le CO₂, y compris le passage à grande échelle aux énergies renouvelables et l'usage extensif de systèmes de CSC (captage et stockage du carbone), conduirait à zéro émission nette dans le système énergétique. Toutefois, dans les deux scénarios, ce résultat est atteint autour de la fin du siècle, ce qui signifie qu'ils sont en-deçà de l'objectif de température de l'Accord de Paris.

Regarder au-delà des scénarios Montagnes et Océans

En tirant les enseignements de ce précédent travail et des analyses supplémentaires, nous présentons aujourd'hui une voie possible de décarbonisation de l'économie mondiale, dans le but sociétal d'atteindre zéro émission nette issue de l'énergie d'ici 2070 – un scénario intitulé « **Sky** ».

Sky reconnaît qu'une simple extension des efforts actuels, qu'il s'agisse de missions d'efficacité, de taxes sur le carbone modérées ou de soutiens aux énergies renouvelables, est insuffisante pour l'ampleur du changement requis. Les transformations pertinentes dans les systèmes énergétiques et naturels nécessitent l'application de mesures de politique climatique et le déploiement de nouvelles technologies révolutionnaires, simultanément et à grande échelle, dans le cadre de politiques gouvernementales qui encouragent fortement

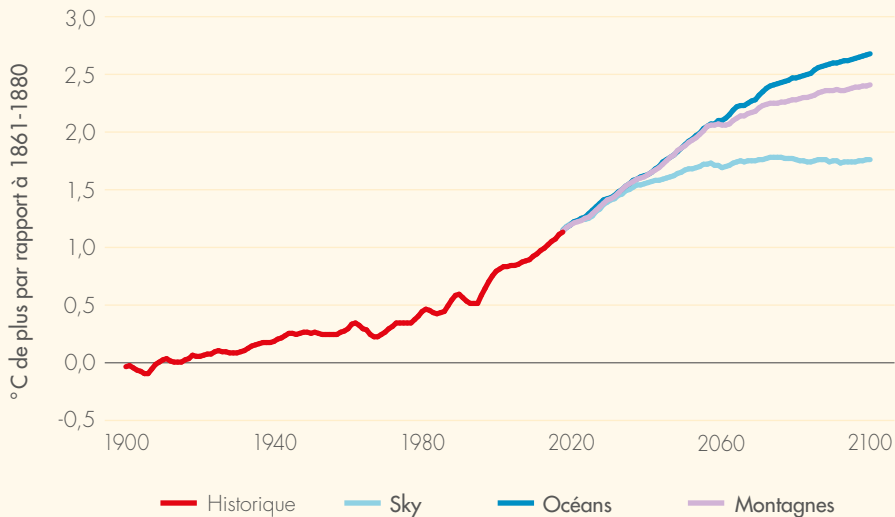
Voici Sky – un scénario ambitieux pour maintenir l'augmentation de la température moyenne mondiale nettement en dessous de 2 °C. Il requiert une combinaison complexe de facteurs qui se renforcent mutuellement et dont la mise en œuvre est accélérée par la société, les marchés et les gouvernements.

D'aujourd'hui à 2070 –

1. Un changement d'état d'esprit chez les consommateurs les amène à privilégier les options haute efficacité et à faible émission de carbone pour satisfaire leurs besoins énergétiques.
2. Une amélioration progressive de l'efficacité de la consommation énergétique conduit à des gains supérieurs aux tendances historiques.
3. Les mécanismes de tarification du carbone sont adoptés par les gouvernements à l'échelle mondiale au cours des années 2020, ce qui se traduit par un coût significatif du CO₂ intégré dans les biens et services de consommation.
4. Le taux d'électrification de l'énergie finale fait plus que tripler, avec une production d'électricité au niveau mondial qui atteint un niveau presque cinq fois supérieur à celui d'aujourd'hui.
5. Les nouvelles sources d'énergie se développent jusqu'à être multipliées par 50, l'énergie primaire issue de sources renouvelables éclipsant les combustibles fossiles dans les années 2050.
6. Quelque 10 000 grandes installations de captage et stockage du carbone sont construites, contre moins de 50 en fonctionnement en 2020.
7. L'objectif zéro déforestation nette est atteint. De plus, une zone de la taille du Brésil en cours de reforestation offre la possibilité de limiter le réchauffement à 1,5 °C, qui est l'ambition ultime de l'Accord de Paris.



COMPARAISON DES SCÉNARIOS SHELL – HAUSSE DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE À LA SURFACE DE LA PLANÈTE



Remarque : le Programme conjoint du MIT sur la science et la politique en matière de changements planétaires a modélisé les impacts climatiques de **Sky** par rapport aux impacts des scénarios Montagnes et Océans. Toutes les séries sont des moyennes mobiles sur cinq ans.

Source : MIT (Massachusetts Institute of Technology)

l'investissement et l'innovation. Aucun facteur unique ne suffira pour réaliser la transition.

Sky s'appuie au contraire sur une combinaison complexe de facteurs qui se renforcent mutuellement et dont la mise en œuvre est accélérée par la société, les marchés et les gouvernements.

Puisque les défis climatiques découlent de l'accumulation totale de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, il existe une infinité de voies possibles afin de réduire les émissions annuelles pour les décennies à venir, et déboucher sur un résultat cohérent avec l'ambition de Paris. Bien entendu, certaines de ces voies sont bien plus plausibles que d'autres : on ne s'attend pas à ce que l'économie mondiale puisse être complètement reconfigurée du jour au lendemain.

Sky commence par la structure actuelle des secteurs économiques, des politiques gouvernementales et de leur capacité de changement à date. Il émet par la suite l'hypothèse, plausible bien que très agressive,

d'un renforcement des capacités et d'une progression des engagements politiques à travers les deux premiers cycles de révision à cinq ans incorporés dans l'Accord de Paris. Au-delà de ce calendrier, il existe naturellement des incertitudes bien plus importantes concernant les politiques et technologies susceptibles d'être élaborées et mises en œuvre au niveau mondial. Ainsi, progressivement, le scénario se fonde sur l'ambitieux objectif de zéro émission nette d'ici 2070, prenant pleinement en compte les caractéristiques en matière d'échelle, de substitution technologique et d'investissement dans les divers secteurs des différentes économies nationales.

Un tel scénario axé sur les objectifs est parfois qualifié de « normatif ».

En adoptant une approche ancrée dans la réalité actuelle du système énergétique mais combinée avec un objectif spécifique à long terme, notre but est de faire de **Sky** un scénario ambitieux et un outil réaliste pour les considérations pratiques d'aujourd'hui.



En outre, nous publions des ensembles de données quantitatives pour le scénario **Sky**, de façon à ce que d'autres puissent inspecter et exploiter davantage ces informations eux-mêmes.

L'Accord de Paris a envoyé un signal au monde entier ; le changement climatique est un grave problème que les gouvernements sont déterminés à affronter. D'ici 2070, un système énergétique très différent pourrait potentiellement émerger.

Il pourra s'agir d'un système fournissant de l'énergie moderne au monde entier et exempt de tout héritage climatique auquel la société ne pourrait s'adapter rapidement. Telle est l'essence du scénario **Sky**.



2015

2020

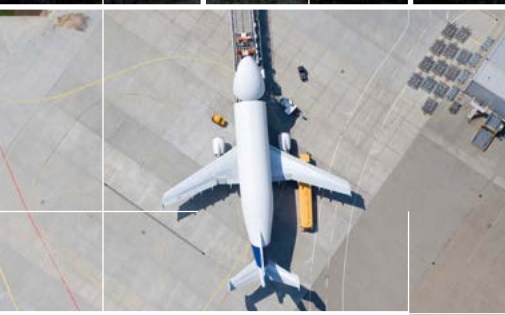
2025

2030

2035

2040

2045





2050

2055

2060

2065

2070

2075

20

CHAPITRE 2

LES DÉFIS D'UN SCÉNARIO POUR LE 21^E SIÈCLE

2. LES DÉFIS D'UN SCÉNARIO POUR LE 21^E SIÈCLE

Défi : Une demande énergétique en hausse

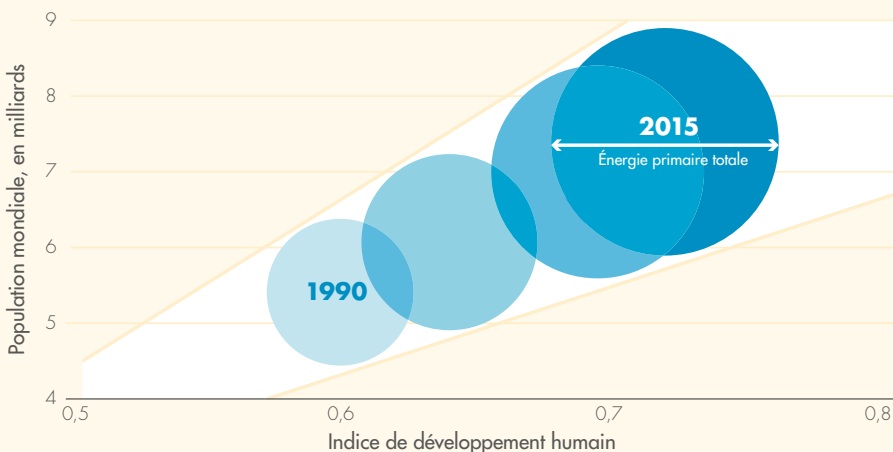
L'énergie permet à l'ensemble de l'économie de fonctionner. On en a besoin et on l'utilise partout : à la maison, dans les usines, les magasins, les écoles, pour le transport de personnes, le fret, les installations sanitaires, les systèmes d'alimentation en eau, l'agriculture et la construction. Il s'agit d'un ingrédient vital, et à la fois caché, dans la fabrication et la livraison de presque tous les produits et services que la société moderne considère comme acquis.

Au cours du 20^e siècle, la demande énergétique mondiale a été multipliée par dix et la population a plus que triplé. La croissance et le développement économiques ont bondi, la mobilité étendue est devenue courante et un large éventail de nouveaux services énergétiques sont apparus, depuis la réfrigération au début du siècle aux services liés aux données à l'aube du siècle suivant. Mais dans le contexte des Objectifs de développement durable des Nations Unies, plusieurs milliards d'individus poursuivent encore une vie meilleure au travers d'un accès plus que nécessaire à l'eau potable,

aux installations sanitaires, à la nutrition, aux soins de santé et à l'éducation. L'énergie est un élément clé pour répondre à ces besoins fondamentaux.

Aujourd'hui, la plage d'utilisation d'énergie primaire par an et par habitant est comprise entre 20 gigajoules (GJ) dans un pays comme le Kenya et environ 300 GJ aux États-Unis. La moyenne mondiale se situe actuellement autour de 80 GJ, mais ce chiffre devrait augmenter à mesure qu'un accès quasi universel aux services énergétiques modernes au cours de ce siècle augmentera également.

LA DEMANDE ÉNERGÉTIQUE MONDIALE AUGMENTE EN MÊME TEMPS QUE LA POPULATION ET LE DÉVELOPPEMENT



Source : Analyse Shell, IEA, ONU

En outre, de nouveaux services énergétiques marqueront le 21^e siècle, depuis l'usage extensif des environnements artificiels dans lesquels nous vivons et travaillons jusqu'aux milliers de milliards de dispositifs connectés au sein de « l'Internet des objets ». À titre d'exemple, les connexions entre individus par le biais des voyages internationaux ont déjà doublé au cours des deux premières décennies de ce siècle (calcul basé sur le nombre d'arrivées de vols internationaux). La croissance démographique, le développement économique, les nouveaux services énergétiques et l'usage étendu des services existants contribueront tous à une hausse de la demande énergétique.

Défi : L'efficacité peut avoir des conséquences inattendues

Sans limiter la disponibilité des services énergétiques, la croissance de la demande énergétique peut potentiellement être ralentie grâce à une amélioration rapide de l'efficacité de ces services. Cela se produira inévitablement mais pourrait être une arme à double tranchant. D'un côté, l'efficacité des systèmes a représenté l'un des moteurs de la croissance économique du 20^e siècle, grâce à une baisse constante des coûts de fabrication et de la consommation énergétique d'appareils tels que les climatiseurs au fil des décennies. Mais d'un autre côté, ces coûts inférieurs ont aussi conduit à une utilisation accrue de ces appareils par les consommateurs.



En 2016, on dénombrait en Amérique du Nord et en Europe entre 500 et 800 véhicules pour 1000 individus, contre 154 pour 1000 en Chine et 42 pour 1000 en Inde, des chiffres qui augmenteront inévitablement.

Le plus récent service énergétique à avoir connu d'important gains en efficacité énergétique est par exemple l'éclairage, grâce au remplacement des ampoules à incandescence, halogènes et fluorescentes par les LED. Mais il est maintenant clairement démontré que cela a entraîné une croissance des services d'éclairage, même dans les villes où l'on supposait que la saturation lumineuse avait été atteinte. Avec les LED, la publicité se transforme, l'affichage urbain disparaissant au profit de panneaux publicitaires géants.

Défi : Le charbon reste populaire

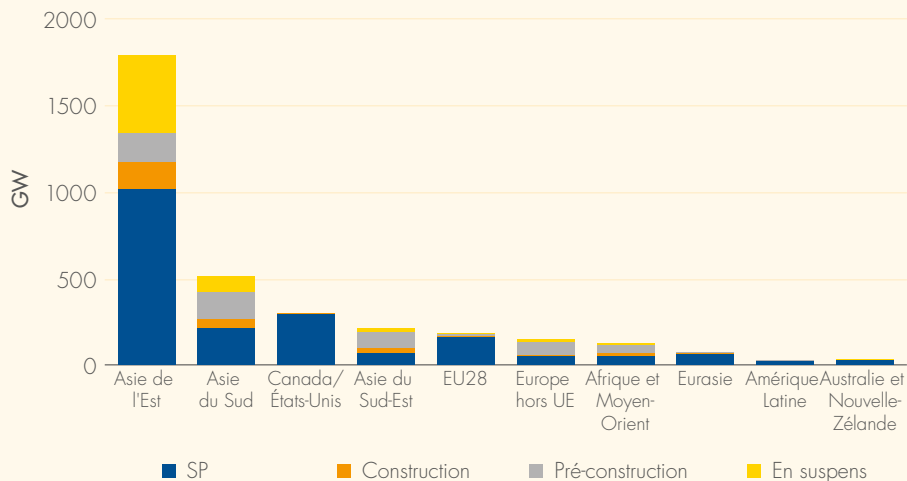
limiter la hausse du CO₂ dans l'atmosphère nécessitera d'abandonner les combustibles fossiles au profit d'autres sources d'énergie et d'utiliser le CSC. Mais les nouvelles sources d'énergie seront mises au défi de se développer assez rapidement afin de répondre à l'augmentation rapide de la demande et à la nécessité d'abandonner assez promptement les sources d'émissions existantes. La forte croissance continue de la demande peut entraîner une hausse des prix de l'énergie, ce qui, à son tour, pourrait encourager une poursuite de l'extraction du charbon, du pétrole et du gaz, et décourager la transformation ou la modification des infrastructures existantes.

Bien que le monde ait déjà commencé à agir, réaliser de substantielles avancées en faveur de l'objectif de l'Accord de Paris constituera un véritable défi, en partie lié au charbon. Alors que les énergies renouvelables et le gaz naturel dominant de plus en plus le secteur énergétique dans les pays développés, avec pour résultat une baisse des émissions, l'usage du charbon augmente dans certaines économies dont le développement nécessite de nouvelles capacités de production. Le Vietnam en fait partie, avec la construction en 2018 de plusieurs grandes centrales électriques au charbon.

L'une des dures réalités de ce début du 21^e siècle est le manque de voies de développement claires excluant le charbon pour les économies émergentes. Le charbon est une ressource relativement facile à exploiter et à utiliser, que nécessite peu de moyens technologiques et on en tire beaucoup de valeur pour l'électricité, le chauffage, l'industrie et surtout la fusion pour la fabrication du fer. Bien que les énergies solaire



CAPACITÉ DE PRODUCTION ÉLECTRIQUE À PARTIR DU CHARBON



Remarque : le charbon reste populaire. Les nouveaux projets hors de Chine pourraient potentiellement être plus nombreux que ceux qui sont en cours de construction dans le pays.

Source : Global Coal Plant Tracker, janvier 2017, endcoal.org

PV et éolienne offrent une électricité propre et distribuée au bénéfice des ménages, l'électricité seule est actuellement insuffisante pour assurer une urbanisation et une industrialisation rapides, y compris la construction des villes et la fabrication de produits tels qu'automobiles et appareils ménagers.

Défi : Certaines parties du système énergétique sont « récalcitrantes »

Les différentes économies n'atteindront pas zéro émission nette en même temps. L'Union européenne ou l'Amérique du Nord devraient sûrement avoir besoin d'atteindre cet objectif dans les années 2050, en partie pour créer un équilibre avec les pays qui parviendront à ce point plus tard dans le siècle. En tant que pays progressiste au sein d'une région progressiste, la Suède a déjà placé le curseur en 2045. Mais pour presque toutes les économies industrielles, zéro émission nette sera un seuil difficile à atteindre dans les années 2050. Le manque apparent de solutions à faible émission de carbone pour l'aviation, le transport maritime, la fabrication du ciment, certains procédés chimiques, la fusion, la fabrication du verre et autres signifie que des secteurs

importants de l'économie industrielle n'évolueront pas rapidement vers zéro émission. Même le secteur de l'électricité pourrait encore avoir besoin du soutien de la production thermique conventionnelle en 2050.

Défi : Certaines technologies sont « au point mort »

Certaines technologies prometteuses sont actuellement au point mort, l'hydrogène étant peut-être l'un des exemples les plus notables. Au début de ce siècle, l'hydrogène était considéré comme le carburant du futur pour le transport routier, mais il est désormais éclipsé par le développement des véhicules électriques à batterie. Plus récemment, l'hydrogène a été proposé comme solution possible pour les processus industriels nécessitant une chaleur intense, le secteur métallurgique (où le charbon est dominant), le chauffage domestique, et le transport aérien, où le stockage sur batterie est extrêmement limité pour des questions de poids.

Un autre secteur où les progrès ont été plus lents que ce qui était prévu à l'origine est la technologie des biocarburants, qui peut potentiellement fournir des combustibles essentiels, à haute densité énergétique et à faibles émissions de carbone. La production de biocarburants pourrait également être développée comme moyen d'atteindre des émissions négatives, tel qu'on le voit aujourd'hui aux États-Unis, où un système de CSC a été rattaché à une usine de bioéthanol.

Défi : Les transformations des systèmes sont imprévisibles et prennent du temps

limiter le réchauffement conformément à l'Accord de Paris signifie atteindre zéro émission nette d'ici 2070, soit dans à peine plus de 50 ans. À l'échelle de la transition énergétique, une décennie n'est qu'un battement de cils et, en un siècle, on ne pourrait bien connaître qu'une poignée de transformations majeures, bien que toutes ne suivent pas les voies attendues.


Alors que les Américains privilégiaient la voiture électrique à l'aube du 20^e siècle, en 1920, le monde était en plein dans l'ère du moteur à

combustion de la Ford Model T. Quatre milliards de voitures plus tard, la technologie essentielle reste largement identique, mais la mobilité électrique refait son apparition.

Même l'électricité, qui continue à transformer notre monde, n'a pas été une technologie énergétique à évolution rapide. Le premier réseau électrique est apparu à New York en septembre 1882, il y a plus de 135 ans. Bien que la technologie se soit répandue sur toute la planète et semble omniprésente, elle ne représente que 20 % de l'énergie finale utilisée aujourd'hui ; on en conclut donc que 80 % de l'énergie que nous utilisons n'est pas l'électricité, mais les hydrocarbures fossiles et de bioénergie. Au cours des dernières décennies, l'électrification de l'énergie finale a évolué relativement lentement en gagnant environ 2 points de pourcentage par décennie, passant par exemple de 17 % en 2005 à 19 % en 2015.

Dans les années 60, une révolution de l'énergie nucléaire semblait possible, mais elle s'est retrouvée au point mort dès les années 1990. Toujours dans les années 60, l'énergie solaire a commencé à apparaître dans des applications hautement spécialisées, mais il a fallu 50 ans pour atteindre 1 % de production électrique globale.





L'effet photovoltaïque (PV) a été découvert en 1839, avant d'être déployé sur les satellites en tant que solaire PV à partir de 1962. Quatre décennies plus tard, seuls deux GW de capacité existaient dans le monde, mais au cours des quinze années suivantes, cette capacité a été multipliée par 200.



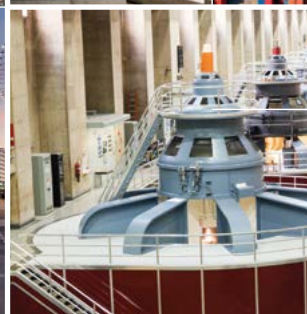
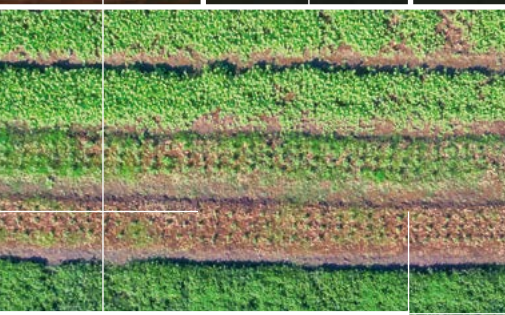
L'une des raisons qui font que les transformations des systèmes prennent du temps est qu'une transformation – par exemple, le passage des chevaux au moteur à combustion dans le monde entier – peut freiner la progression de la suivante. Un héritage de développement réussi constitue le potentiel de monopole de la ressource sur laquelle le système actuel a été construit. Ce potentiel de monopole découle de la résistance à l'abandon des investissements initiaux et à la perte des emplois qui ont été créés.

Défi : L'échéance 2070 ne permettra aucun retard

Atteindre zéro émission nette en tout juste 50 ans ne laisse aucune place aux interruptions, blocages technologiques, retards de déploiement, indécisions politiques ou reculs nationaux. Au contraire, cela requiert une accélération rapide dans tous les aspects d'une transition énergétique et des cadres réglementaires particulièrement robustes pour cibler les émissions. La réussite ne peut s'accomplir qu'au travers d'un processus élargi, adopté par les sociétés, mené par les gouvernements et légèrement coordonné par des organisations telles que l'UNFCCC, l'UE, l'ASEAN, etc.



2015 2020 2025 2030 2035 2040 2045





2050

2055

2060

2065

2070

2075

2080

CHAPITRE 3
**DES MONTAGNES ET DES OCÉANS
AU SKY**

3. DES MONTAGNES ET OCÉANS AU SKY

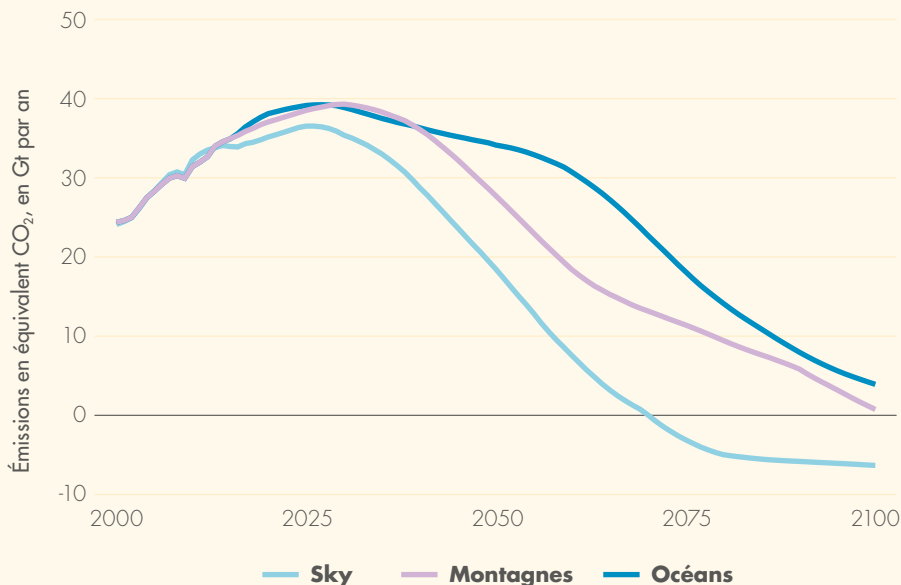
Dans les Scénarios Nouvelle Optique, nous avons exploré deux solutions d'évolution possibles au cours du 21^e siècle, en prenant plusieurs tendances et enjeux mondiaux les plus urgents et en les utilisant comme des « optiques » à travers lesquelles voir le monde.

Ces scénarios Montagnes et Océans ont fourni une analyse détaillée des tendances sociopolitiques actuelles et leurs possibles trajectoires à l'avenir, Montagnes étant davantage guidé par les gouvernements avec une approche descendante et Océans étant davantage guidé par le marché avec une approche ascendante.

Le scénario **Sky** fait remonter la possibilité émergente d'une meilleure collaboration multilatérale pour s'attaquer aux problèmes de climat et de qualité de l'air. À cet égard,

il combine les éléments les plus progressistes des scénarios Montagnes et Océans. Cette approche collaborative a déjà été observée, comme avec le Protocole de Montréal sur les substances appauvrissant la couche d'ozone, mais la véritable coopération internationale à long terme et la volonté de combiner un intérêt national aux intérêts différents d'autres nations ont généralement échappé à la société. Néanmoins, l'Accord de Paris s'inspire d'un tel modèle, bien qu'il comporte un solide élément d'examen et de remise en question par les pairs.

COMPARAISON DES SCÉNARIOS SHELL – ÉMISSIONS DE CO₂ LIÉES À L'ÉNERGIE MONDIALE



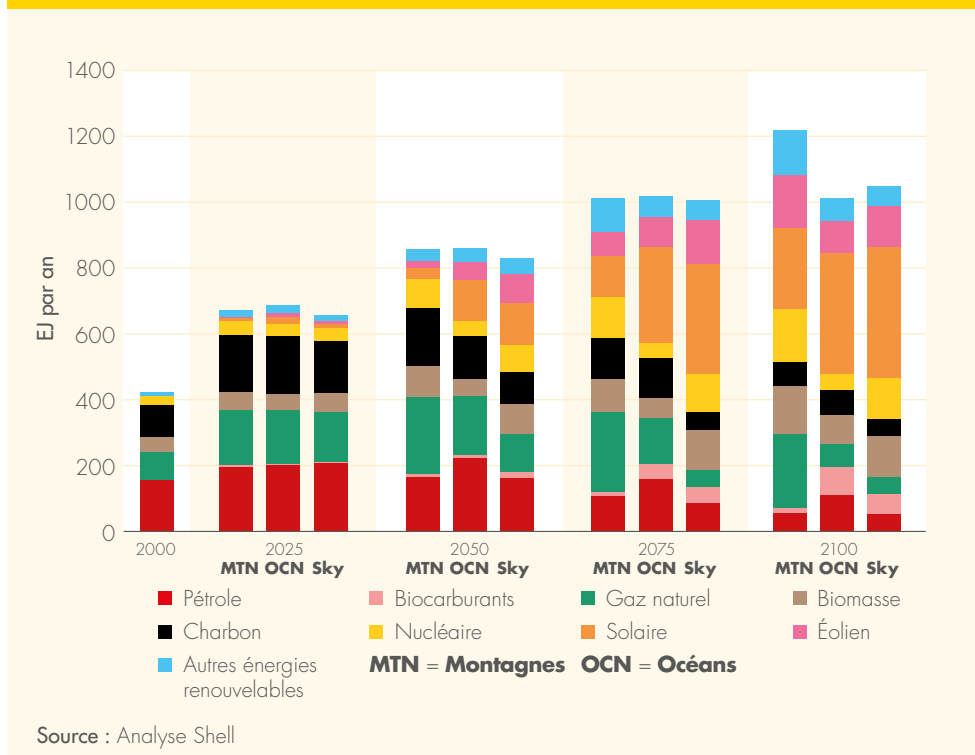
Source : Analyse Shell

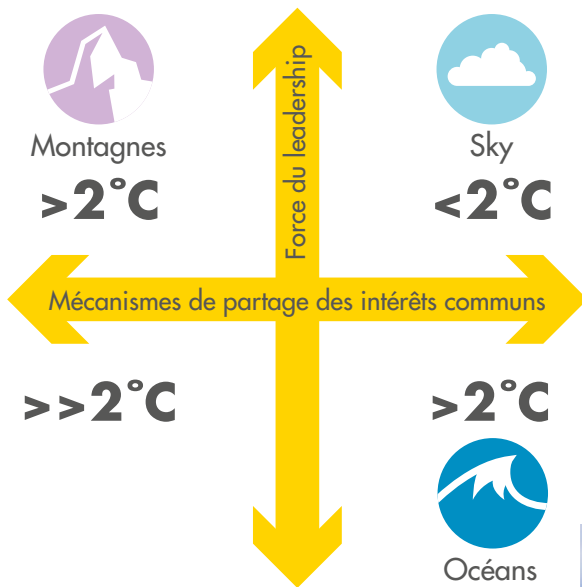
La volonté de créer une vision commune représentait un élément essentiel de l'Accord de Paris, comme en témoignent les accords bilatéraux conclus entre plusieurs chefs de gouvernement au cours des deux années précédant la négociation finale. Mais il s'agissait également d'écouter et de répondre à ceux qui sont les plus menacés par le changement climatique, comme l'Alliance des petits États insulaires (AOSIS), qui est profondément préoccupée par l'élévation du niveau de la mer. En réponse à ces préoccupations, une « coalition pour une haute ambition » a émergé à Paris et a été à l'origine de l'intégration d'un objectif

encore plus ambitieux dans l'Accord de Paris, à savoir limiter le réchauffement à 1,5 °C.

Ces développements introduisent la notion d'un cadre de résolution des problèmes mondiaux au sein desquels divers scénarios pourraient être positionnés. Ce cadre ne dépend pas uniquement des tendances telles que le changement technologique, qui se manifeste à un rythme accéléré voire effréné dans presque toutes les histoires du 21^e siècle, mais il est né de l'intérêt personnel à long terme et de la façon dont la société écoute et réagit aux problèmes d'aujourd'hui.

ÉNERGIE PRIMAIRE PAR SOURCE DANS LES TROIS SCÉNARIOS





Sky nécessite un leadership et des coalitions émergentes provenant de tous les secteurs de la société. Le changement climatique est un problème mondial commun qui exige une solution tenant compte de la complexité des multiples intérêts publics et privés.

Océans imagine un monde où l'influence a une immense portée, où le pouvoir est décentralisé, où les intérêts concurrents sont pris en compte et où le commerce est roi. Le leadership n'est pas fort, mais une reconnaissance évolutive des intérêts communs est une caractéristique du commerce. Le potentiel économique est libéré par le déploiement de la technologie et les améliorations de l'efficacité énergétique stimulées grâce au moteur commercial.

Au contraire, **Montagnes** est un monde où le statu quo du pouvoir est solidement ancré et fermement détenu par les parties influentes en place. La stabilité en est la plus haute récompense : ceux qui se trouvent au sommet du pouvoir font converger leurs intérêts pour débloquer des ressources progressivement et prudemment, sans être exclusivement soumis aux forces immédiates du marché. La croissance économique est quelque peu modérée, mais l'autorité centralisée offre la perspective d'une transformation des villes, d'une révolution des modes de transport et d'une utilisation généralisée du CSC – des caractéristiques importantes pour limiter les émissions globales.



MONTAGNES, OCÉANS ET SKY : COMMENT DIFFÈRENT-ILS DANS LEUR APPROCHE ?

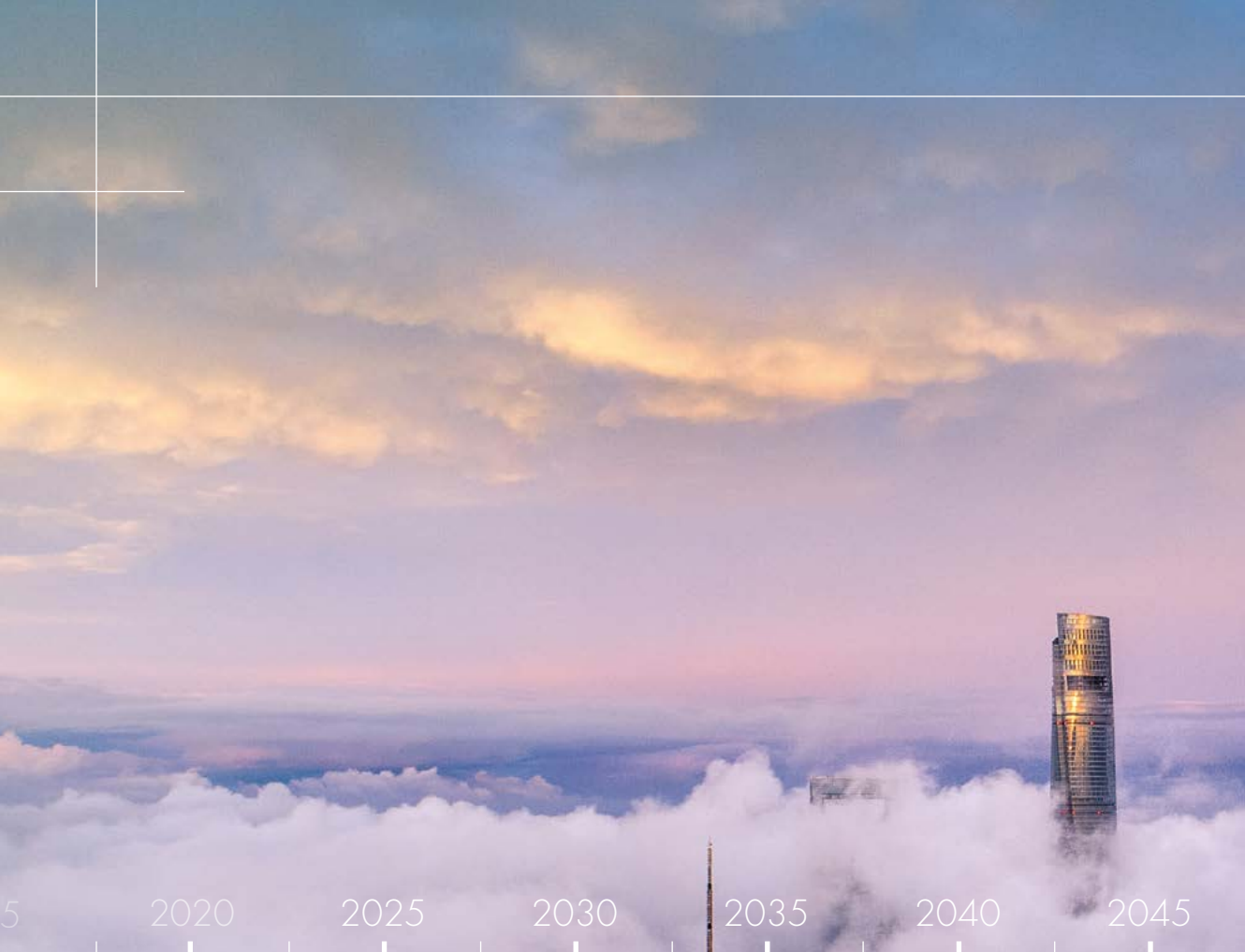
La méthodologie de modélisation et développement du scénario **Sky** diffère de la méthodologie appliquée dans les scénarios Shell antérieurs, tels que **Montagnes** et **Océans**. Elle est aussi différente de l'approche adoptée par la plupart des organisations énergétiques ayant développé les scénarios visant les 2 °C.

Montagnes et **Océans** ont tous deux été conçus au fil d'une série d'ateliers dont le but était d'identifier les tendances sociétales clés ayant le potentiel de façonner le paysage du 21^e siècle. De ce travail ont émergé des schémas narratifs qui ont servi de base aux deux scénarios. Ces schémas narratifs ont alors été testés par modélisation énergétique afin d'explorer pleinement l'impact des tendances dans chaque scénario sur le système énergétique. Accompagnée de retours d'information et de contrôles, cette modélisation a fait émerger un scénario plausible et cohérent où l'exposé et les chiffres énergétiques étaient solidement convergents. Les scénarios étaient ouverts et ne visaient pas à atteindre des objectifs, de sorte que des résultats tels que le réchauffement du système climatique ont émergé de la realpolitik des scénarios et des choix énergétiques qui en ont résulté.

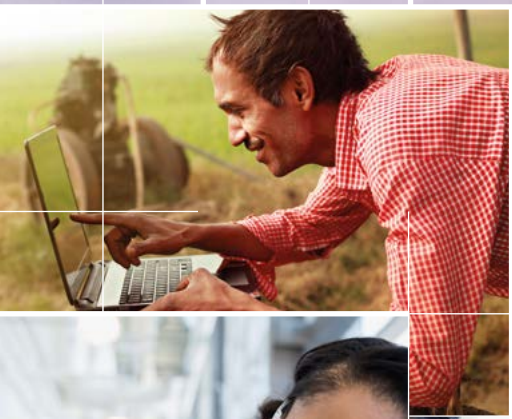
En revanche, un scénario limité aux 2 °C établit d'emblée ce niveau de réchauffement comme un objectif donné, indépendamment des conditions politiques et sociales prévalant à tout moment. Une voie et un scénario énergétiques se

développent alors comme résultat, et tous deux peuvent éventuellement remettre en question la plausibilité d'atteindre la limite fixée pour le réchauffement. Cette approche de l'élaboration des scénarios est qualifiée de « normative ».

Comme déjà évoqué en introduction, **Sky** adopte une approche hybride dans le but d'être utile aux décideurs sociétaux d'aujourd'hui. Il est clairement reconnu qu'entre 2018 et environ 2030, le potentiel d'une transformation radicale du système énergétique à court terme est limité, au vu du capital installé dans l'ensemble de l'économie et des technologies disponibles, même si de nouvelles politiques agressives sont adoptées. Mais on suppose également que dans cette même période, et à l'issue des deux cycles de cinq ans de contribution déterminés au niveau national (NDC) prévus dans l'Accord de Paris, les coûts de renforcement des capacités et de la technologie seront réduits de sorte qu'après 2030, le déploiement pourra se faire à un rythme accéléré pour garantir un résultat nettement en dessous de 2 °C.



5 2020 2025 2030 2035 2040 2045





2050

2055

2060

2065

2070

2075

2080

CHAPITRE 4

SKY - UN SCÉNARIO DE RÉUSSITE

4. SKY - UN SCÉNARIO DE RÉUSSITE

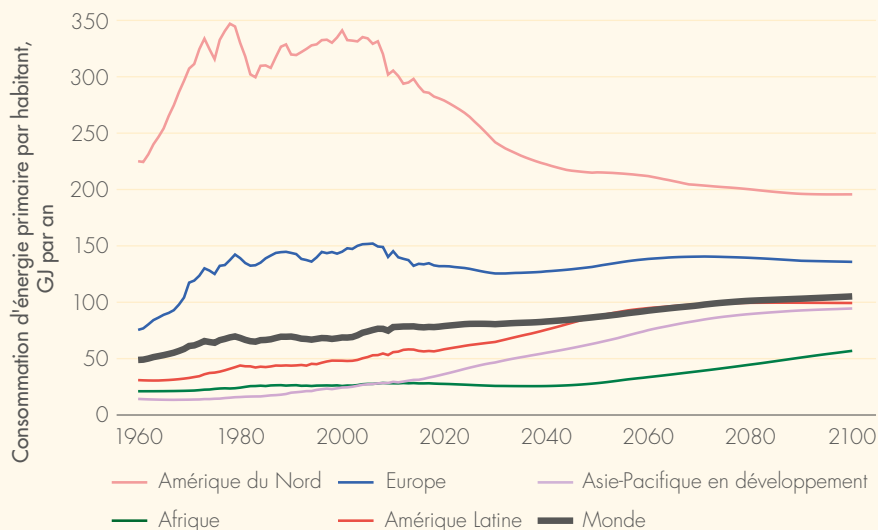
Sky commence par les mesures prises au cours de la première décennie suivant l'Accord de Paris. Les gouvernements réagissent positivement au cycle rapide d'évaluation, de révision et d'amélioration des contributions nationales, tel que prévu dans l'Accord de Paris. Avant le bilan de 2023, les contributions nationales sont largement reconduites avec un changement notable, à savoir l'engagement de la Chine à réduire ses émissions. Dans **Sky**, d'ici le bilan de 2028, toutes les contributions ont été radicalement améliorées, l'Inde indiquant désormais qu'elle aura atteint une stabilisation de ses émissions d'ici les années 2030.

Au cours des années 2020 dans **Sky**, les avancées en matière de réduction des émissions sont relativement lentes alors que les capacités se renforcent. Mais dès 2030, le rythme de la transformation s'accélère rapidement alors que l'on commence à relever les principaux défis de développement durable du 21^e siècle.

Réussite : De l'énergie pour tous

Dans **Sky**, la population mondiale passe de 7,5 milliards d'individus en 2017 à 10 milliards en 2070, puis se stabilise. La demande énergétique augmente également tout au long du siècle, avec une quasi-stabilisation à partir de 2080. Il est important de noter que la consommation par habitant reste relativement

UNE VIE MEILLEURE POUR TOUS



Remarque : aujourd'hui, une meilleure qualité de vie pour tous peut être obtenue avec une moyenne de 100 GJ par habitant. Plus tard dans le siècle, cela pourra être atteint avec un chiffre encore plus bas grâce aux gains d'efficacité.

Source : Analyse Shell, IEA (données historiques)

faible dans **Sky** en raison de gains d'efficacité sans précédent des services énergétiques – on constate au cours du siècle une efficacité multipliée par environ trois. En conséquence, la demande en énergie primaire par habitant converge à près de 100 GJ par an, ce qui est bien inférieur aux chiffres constatés aujourd'hui dans les économies industrialisées, mais atteint néanmoins un niveau permettant de fournir un large éventail de services énergétiques nécessaires pour une meilleure qualité de vie. À titre d'exemple, un réfrigérateur moderne et à haute efficacité énergétique consommera à peine plus d'un GJ par an.

Avec une population mondiale de 10 milliards d'individus à la fin du siècle et une utilisation énergétique par habitant en augmentation, le système énergétique de **Sky** est environ multiplié par deux par rapport à 2010.

Réussite : La gestion du charbon

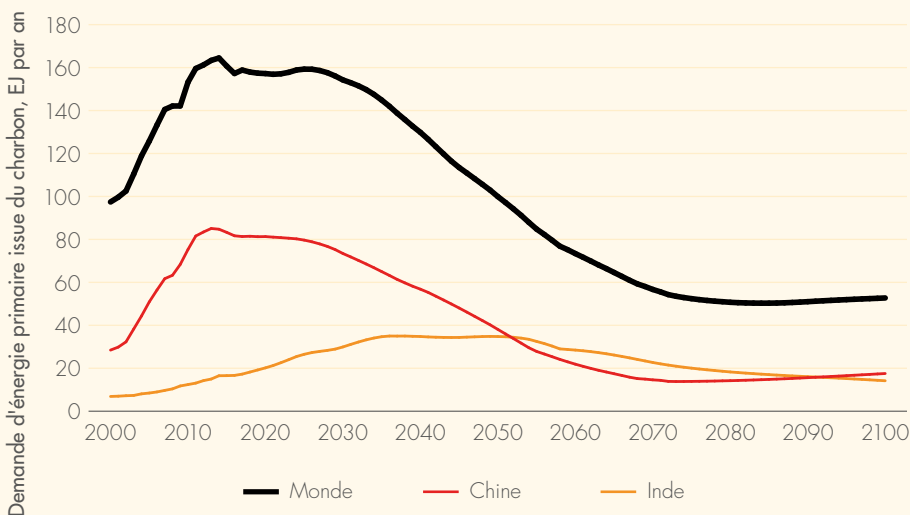
Lors de la COP23 de 2017, une vingtaine d'États ont formé l'Alliance pour la sortie du charbon, avec la promesse d'éliminer progressivement l'énergie traditionnelle au charbon sur leurs territoires. Dans **Sky**, quelques années après, davantage de pays rejoignent l'Alliance avec pour résultat une diminution de l'énergie basée sur le charbon dans toutes les régions du monde. Au Vietnam et même en Inde, les nouvelles constructions d'unités pour la production d'énergie à partir de charbon prennent fin avant 2030. D'ici les années 2030, des installations solaires et éoliennes supplémentaires répondent à la demande additionnelle d'électricité.

Dans **Sky**, les efforts de la Chine pour accélérer l'élimination progressive du charbon signifient que le pic de demande mondiale de charbon est à présent derrière nous, avec un déclin



Dans **Sky**, les émissions de CO₂ absolues atteignent un pic avant 2040 en Inde, qui sera alors le pays le plus peuplé de la planète.

LE PIC D'UTILISATION DU CHARBON EST DERRIÈRE NOUS DANS **SKY**, AVEC UNE CONSOMMATION TOTALE EN RAPIDE DÉCLIN DÈS LE DÉBUT DES ANNÉES 2030



Source : Analyse Shell, IEA (données historiques)

rapide en perspective, bien que le charbon demeure important dans certains pays asiatiques et que le charbon métallurgique continue d'être un intrant essentiel pour la fusion. D'ici 2070, la part du charbon dans l'énergie primaire au niveau mondial tombe autour des 6 %, contre 25 % en 2020.

Réussite : Transformation des technologies récalcitrantes et au point mort

Dans la première décennie qui suit l'Accord de Paris, les émissions de CO₂ des systèmes énergétiques sont largement verrouillées par les technologies existantes, le stock de capital, et la résistance au changement de la société. Mais dans **Sky**, d'ici 2030, le système s'ouvre sous l'impulsion, dans les années 2020, d'avancées significatives dans les technologies énergétiques et l'échelle de fabrication, avec à la clef des baisses de prix pour les consommateurs et les entreprises. Cela est facilité par l'intervention ciblée des gouvernements en matière de recherche et de développement et par l'importante phase de commercialisation anticipée, avec des gains importants dans des domaines tels que les

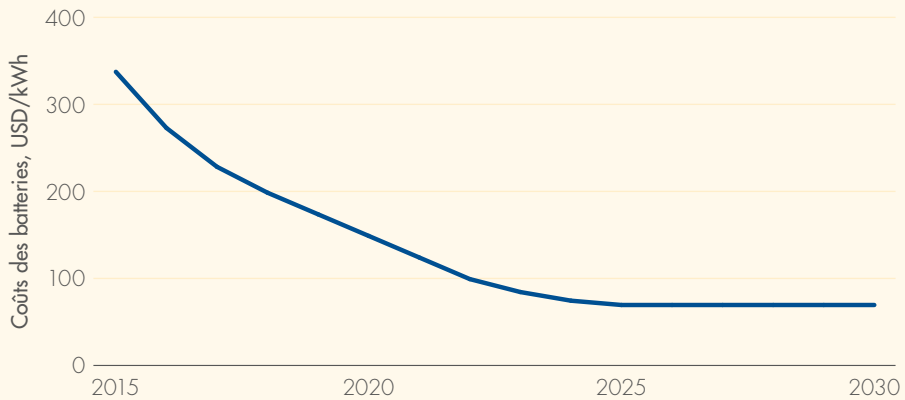
technologies de stockage par batterie, le CSC et les biocarburants avancés.

Réussite : Les gouvernements accélèrent le rythme

Dans **Sky**, les gouvernements du monde entier mettent en œuvre des cadres législatifs incitant à augmenter l'efficacité énergétique et à réduire rapidement les émissions de CO₂, à la fois en poussant les plus anciennes technologies énergétiques vers la sortie et en encourageant la concurrence pour déployer de nouvelles technologies au fur et à mesure qu'elles deviennent rentables.

Par exemple, au niveau national et infranational, les gouvernements accélèrent la transition énergétique en adaptant les marchés de l'énergie aux nouvelles technologies renouvelables et en imposant des taxes ou contraintes élevées sur les émissions de carbone issues de la production thermique conventionnelle. Sur de nombreux territoires, la législation oblige les réseaux à n'accepter que les énergies 100 % renouvelables d'ici les années 2040.

LE COÛT DES BATTERIES CHUTE RAPIDEMENT DANS SKY, EN PARTIE GRÂCE AU FINANCEMENT DES NOUVELLES TECHNOLOGIES PAR LES GOUVERNEMENTS



Source : Analyse Shell, Bloomberg New Energy Finance (données historiques)

Les appareils ménagers, les bâtiments commerciaux et résidentiels et le transport de personnes sont tous touchés par des normes agressives en matière d'efficacité ou d'émissions. La création de zones zéro émission par les autorités municipales oblige à l'élimination des véhicules plus anciens, et dans de nombreuses villes, les véhicules électriques les remplacent naturellement du fait de leur aspect pratique et de la mise à disposition à grande échelle des points de recharge. Les primes à la casse accélèrent le remplacement des équipements obsolètes et moins efficaces dans les logements et les bureaux. Mais la mesure anti-émissions la plus importante mise en place par les gouvernements du monde entier est l'adoption de mécanismes efficaces de tarification implicite ou explicite du carbone.

Depuis Paris, les politiques gouvernementales consistant à intégrer la tarification du carbone

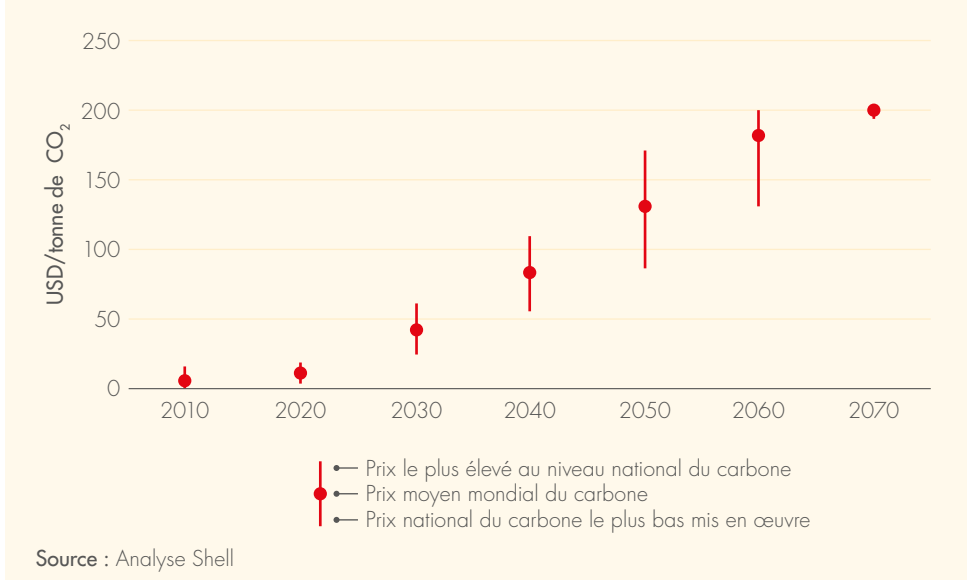
ont pris de l'ampleur. Lors du OnePlanet Summit de 2017, plusieurs pays et États du continent américain se sont engagés à accroître leur utilisation de ces mécanismes. Au cours de la même année, la Chine a annoncé le lancement de son système national d'échange de droits d'émission, à commencer par le secteur de l'électricité. Et début 2018, la Californie, le Québec et l'Ontario opéraient dans le cadre de systèmes d'échange de droits d'émission associés.



Dans Sky, le solaire maintient de forts taux de croissance de 20 % en moyenne par an, dépassant 6500 GW de capacité installée d'ici 2035. Cela couvrira une superficie de 100 000 km², soit l'équivalent d'une zone de la taille de la Corée du Sud. Dès lors et jusqu'en 2070, près de 1000 GW devront être ajoutés chaque année, lorsque l'empreinte mondiale des installations solaires PV s'approchera de la zone de l'Espagne.



LES GOUVERNEMENTS ADOPTENT RAPIDEMENT DES MÉCANISMES DE TARIFICATION DU CARBONE DANS LE MONDE ENTIER DANS LES ANNÉES 2020 ; UNE HARMONISATION COMPLÈTE EST ATTEINTE D'ICI 2070



Dans **Sky**, la tarification du carbone par les gouvernements émerge sous la forme d'une série de taxes, prélèvements et mécanismes de marché. Étonnamment vite, les gouvernements parviennent à une compréhension commune du niveau approprié du coût des émissions.

D'ici 2030 dans **Sky**, la tarification du carbone par les gouvernements est fermement établie dans tous les pays de l'OCDE et la Chine, la Russie et l'Inde faisant partie de la seconde vague d'entrants dans les marchés du charbon. La mise en œuvre à l'échelle mondiale de la tarification du carbone par les gouvernements est terminée d'ici la fin des années 2030, tous les systèmes atteignant alors une limite crédible pour dissuader les émissions.

Dans **Sky**, la tarification du carbone a deux autres conséquences importantes. Tout d'abord, elle accélère l'adoption du CSC par les grands émetteurs tout en favorisant le déploiement de technologies à émissions zéro nettes ou négatives telles que la bioénergie avec CSC.

Deuxièmement, la tarification du carbone encourage la réduction des émissions dans l'ensemble de l'économie, en particulier par

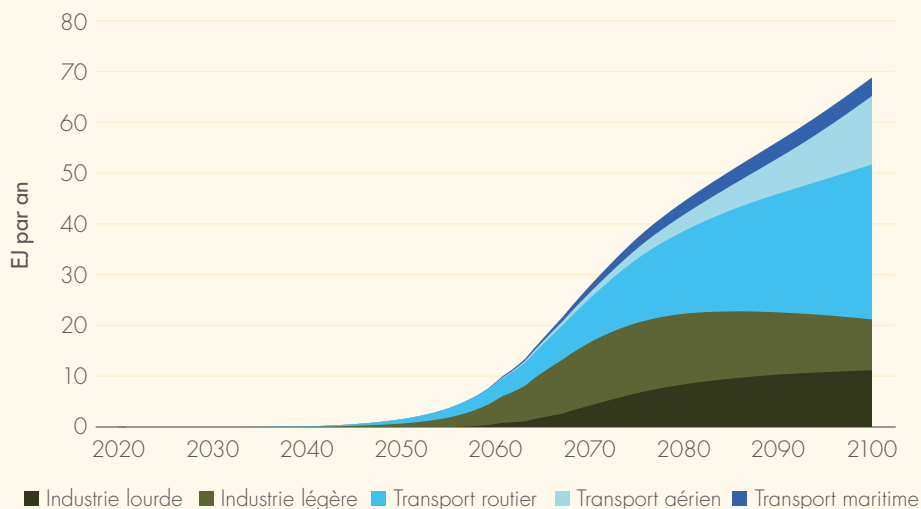
l'amélioration de l'efficacité énergétique, ce qui entraîne des changements significatifs dans le comportement des consommateurs et des producteurs.

Réussite : L'émergence de nouveaux systèmes énergétiques

Dans **Sky**, des systèmes d'électrolyse de l'hydrogène onshore et offshore commencent également à émerger dans le monde entier. Au départ, ils utilisent l'excédent croissant d'électricité produite à partir de sources renouvelables, mais ils deviennent ensuite des systèmes de charge de base entièrement intégrés. En conséquence, après 2040, l'hydrogène émerge en tant que vecteur d'énergie avec une croissance stable jusqu'à atteindre 10 % de la consommation énergétique mondiale d'ici la fin du siècle.

Alors que l'utilisation du pétrole et du gaz chute au fil du temps dans **Sky**, les installations alors obsolètes sont réutilisées pour le stockage et le transport de l'hydrogène gazeux. En effet, l'offre croissante de GNL au début du siècle a permis à l'hydrogène de s'implanter et de

DANS **SKY**, L'HYDROGÈNE ÉMERGE COMME VECTEUR D'ÉNERGIE APRÈS 2040, PRINCIPALEMENT POUR L'INDUSTRIE ET LE TRANSPORT



Remarque : d'ici 2100, l'hydrogène alimente un quart de toutes les demandes énergétiques du transport et plus de 10 % de l'énergie industrielle

Source : Analyse Shell

“

L'hydrogène croît en tant que vecteur d'énergie dès 2040 dans Sky, avec 800 millions de tonnes par an de capacité globale d'ici 2070 – soit plus du double du marché GPL mondial actuel.



se développer. Un immense déploiement de réseaux électriques et de canalisations d'hydrogène garantit un approvisionnement en électricité et en hydrogène sûr et abordable, ce qui stimule le changement de secteur, en particulier dans les transports et l'industrie.

Même si l'aviation et le transport maritime continuent à dépendre du pétrole brut pendant les premières décennies de **Sky**, le carburant synthétisé à partir de la biomasse commence à prendre de plus en plus de parts de marché. **Sky** émet l'hypothèse que cela se fera sous la forme de biocarburants liquides étant donné leur plus grande flexibilité, mais si la conversion au méthane s'avère la plus réussie, cela pourrait également se faire sous la forme de biogaz comprimé ou liquéfié pour les utilisations

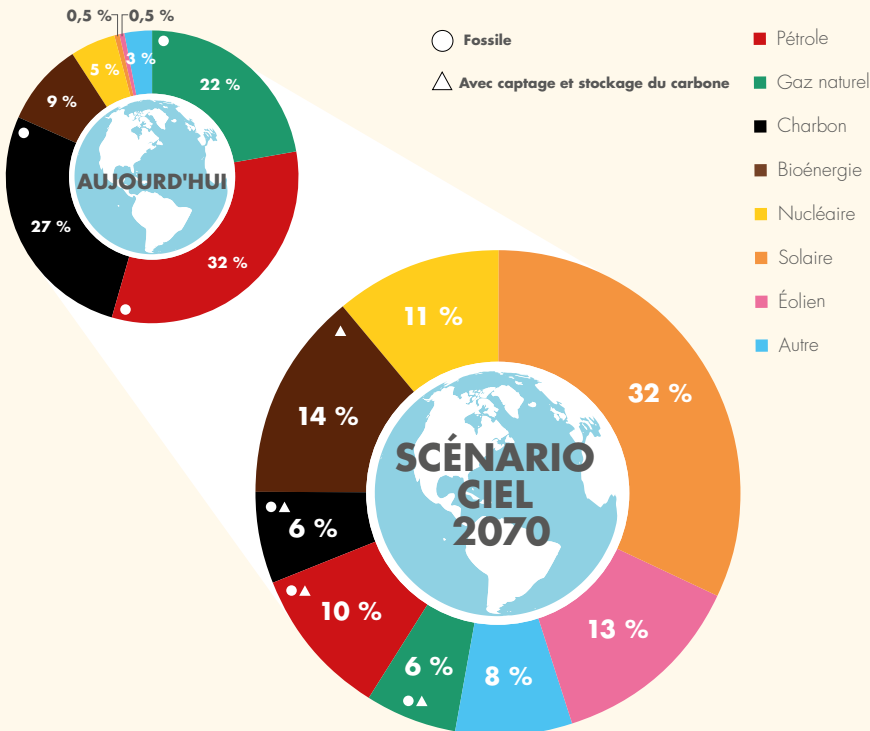
maritimes, ferroviaires et routières. Dans les dernières étapes de la transition, l'hydrogène apparaît comme un nouveau vecteur d'énergie, en particulier pour l'aviation.

Réussite : Paris fonctionne

Dans **Sky**, l'Accord de Paris est une réussite grâce à la mise en œuvre par les gouvernements d'une politique énergétique ciblée à tous les niveaux, parallèlement à une action agressive dans toute l'économie mondiale, y compris dans le secteur de l'énergie.

Cela et d'autres mesures similaires se multiplient rapidement. Au début, le leadership gouvernemental est le moteur de la rapidité du changement, mais de plus en plus, la pression des pairs donne l'impulsion en réponse au

DANS UN MONDE À ZÉRO ÉMISSION NETTE EN 2070, LE SOLAIRE, LA BIOÉNERGIE ET L'ÉOLIEN DOMINENT L'ALIMENTATION EN ÉNERGIES RENOUVELABLES MÊME SI LE PÉTROLE RESTE LA PLUS GRANDE SOURCE D'ÉNERGIE FOSSILE.



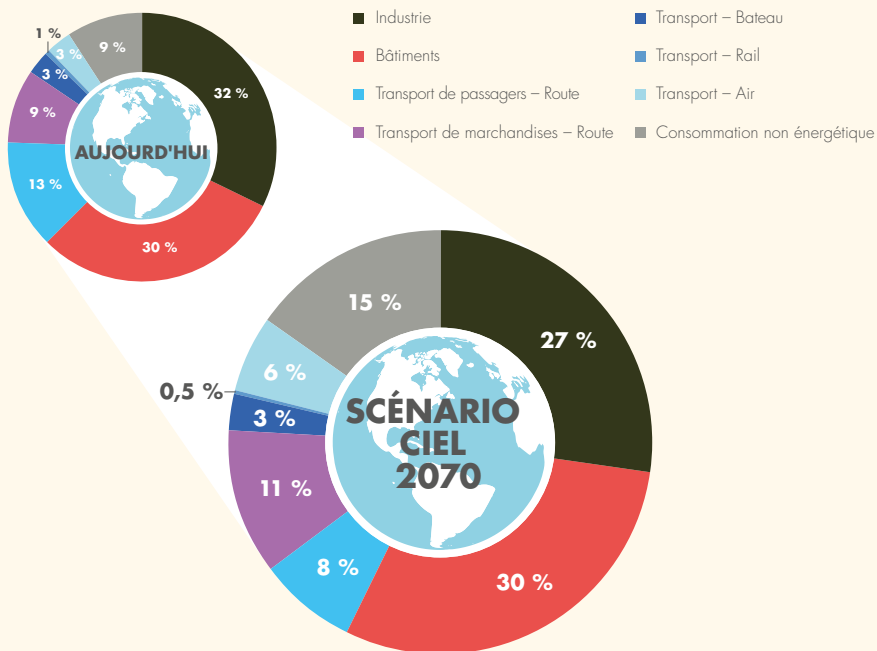
Source : Analyse Shell

cadre de transparence intégré dans l'Accord de Paris. Les nouvelles technologies deviennent de plus en plus concurrentielles à mesure que le déploiement de masse augmente. Le mécanisme d'étapes quinquennales fonctionne dans le scénario Sky.

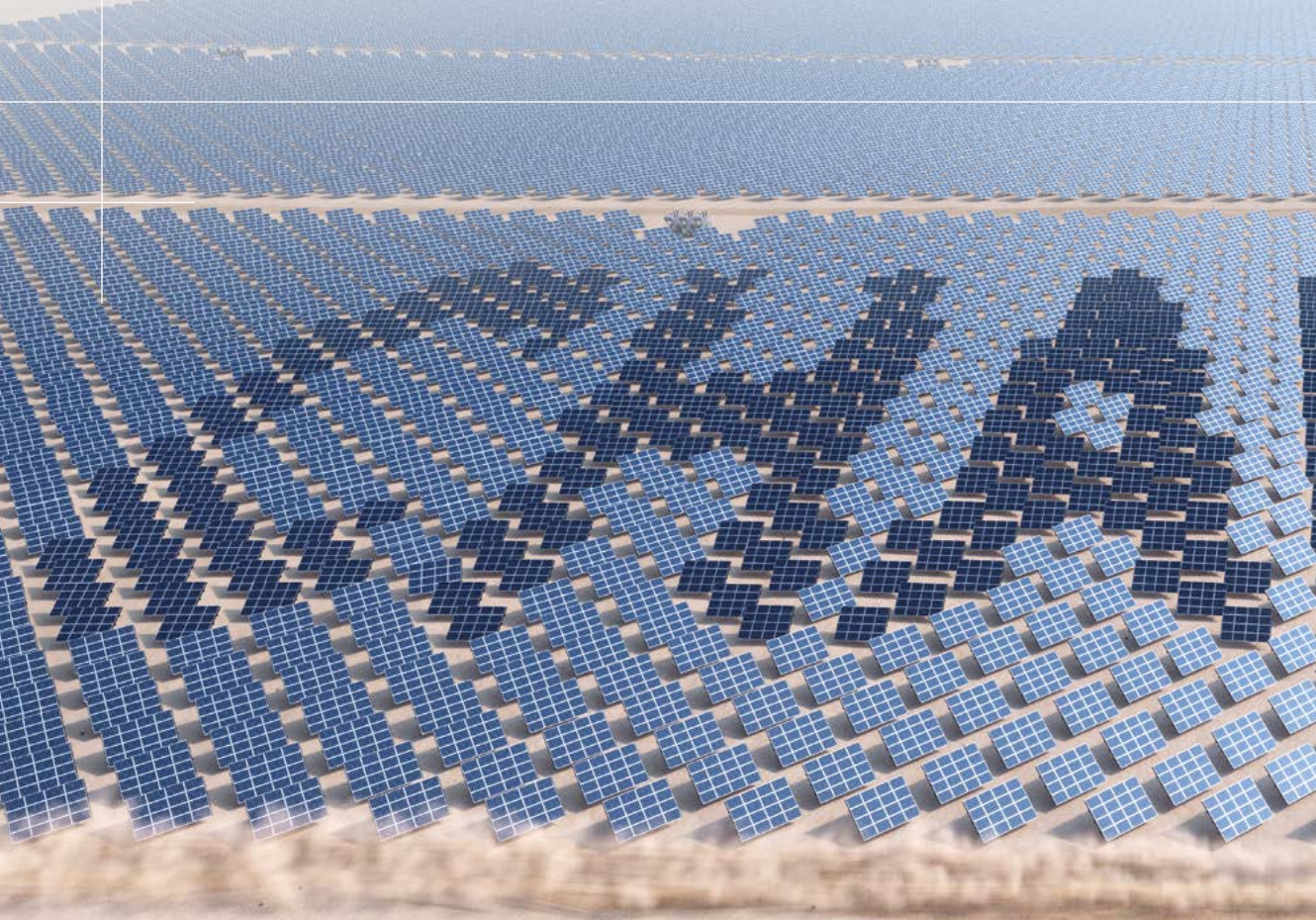
Tous les pays n'ont pas atteint zéro émission nette d'ici 2070. Mais dès 2020, les pays progressistes suivent l'exemple de la Suède en anticipant leur engagement légal à atteindre zéro émission nette d'ici 2045. Parallèlement au Brésil et à d'autres grandes économies, la plupart des pays européens atteignent zéro émission nette d'ici 2060, et certains voient même leurs émissions devenir négatives – en d'autres termes, le CO₂ est extrait de

l'atmosphère. Cela fonctionne en combinant l'utilisation de la biomasse au CSC. Ces pays sont alors en mesure de proposer des transferts vers des émissions négatives aux pays encore situés dans des territoires à émissions positives, atteignant ainsi l'équilibre mondial appelé par l'Accord de Paris.

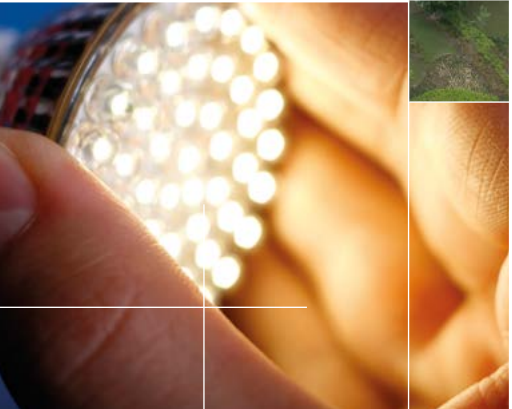
TOTAL MONDIAL DE LA CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE PAR SECTEUR DANS SKY



Source : Analyse Shell



2015 2020 2025 2030 2035 2040 2045





2050

2055

2060

2065

2070

2075

20

CHAPITRE 5

TRANSFORMATIONS SECTORIELLES

5. TRANSFORMATIONS SECTORIELLES

Dans **Sky**, le cheminement vers zéro émission nette en 2070 implique des changements à chaque niveau du système économique et énergétique, depuis la configuration urbaine jusqu'à la demande énergétique des consommateurs, en passant par les révolutions technologiques nécessaires pour fournir des alternatives viables et rentables aux énergies fossiles. Et dans le monde de **Sky**, la transformation des systèmes énergétiques dans le but de produire moins de gaz à effet de serre coïncide avec les transformations dans d'autres secteurs qui produisent le tiers restant des émissions de gaz à effet de serre.

L'une des principales tendances des systèmes énergétiques dans **Sky** est l'électrification, à savoir le remplacement croissant des énergies fossiles (telles que le gaz naturel pour la cuisine et l'essence pour la mobilité) par l'électricité.

Une révolution réussie dans le transport

D'ici 2020, les bases d'une transformation révolutionnaire du système de transport sont posées. Le groupement de pays « Global Clean Energy Ministerial », qui a vu le jour en 2009 après la Conférence de Copenhague sur le climat vise à encourager la transition vers

une économie mondiale de l'énergie propre. Ce groupement a déjà adopté parmi ses toutes premières actions une initiative sur les véhicules électriques, avec pour objectif le déploiement de 20 millions de véhicules électriques dans le monde d'ici 2020 et 30 % de ventes de véhicules neufs d'ici 2030. Le Royaume-Uni s'était en outre engagé à ne plus vendre de véhicules particuliers à moteur à combustion d'ici 2040.

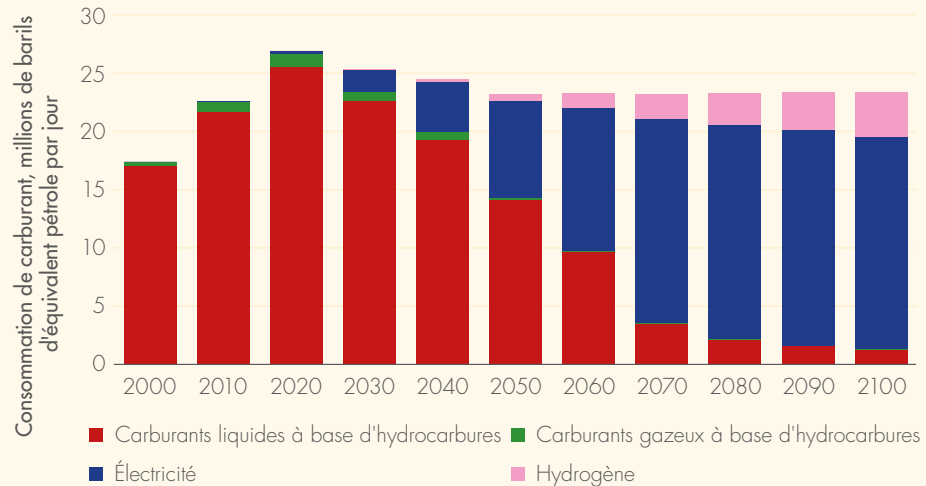
Dans **Sky**, cette transformation se réalise bien plus rapidement que prévu ; dès 2030, plus de la moitié des voitures vendues dans le monde sont électriques, ce chiffre s'élevant à

36



Dans **Sky, les véhicules de tourisme électriques atteignent la parité tarifaire avec les voitures à moteur à combustion d'ici 2025. D'ici 2035, 100 % des voitures neuves vendues sont électriques dans l'UE, aux États-Unis et en Chine, les autres pays et régions suivant de près.**

LE MIX DE CARBURANTS DES VÉHICULES DE TOURISME OPÈRE UNE TRANSITION RAPIDE DANS SKY, L'ÉLECTRICITÉ DEVENANT DOMINANTE D'ICI 2070 ET LES CARBURANTS LIQUIDES DIMINUANT DE PRESQUE MOITIÉ ENTRE 2020 ET 2050



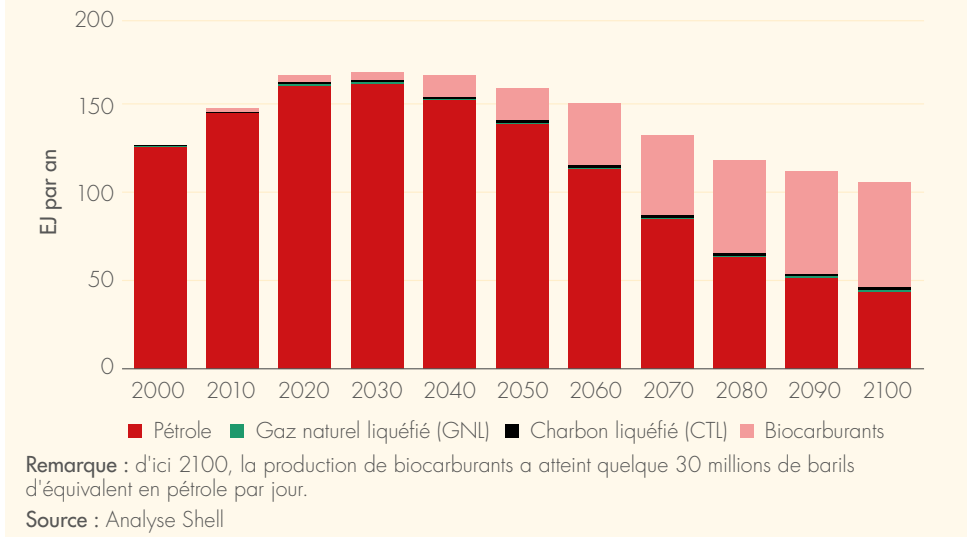
Source : Analyse Shell

100 % pour les voitures de tourisme en 2050. Cette croissance s'explique entre autres par le fait que dans les grandes villes prospères, les travailleurs apprécient la liberté et l'aspect pratique que leur apportent les parcs de véhicules électriques autonomes. Une autre raison de cette hausse est l'offre de nouvelles options prometteuses. Par exemple, dans Sky, une conception de châssis standardisée émerge en combinaison avec une architecture de batterie ou de pile à combustible (FCEV), le tout expédié dans des emballages presque plats à des sociétés de conception locales pour la fabrication de carrosseries sur mesure grâce à des techniques d'impression en 3D. Et un CarOS (système d'exploitation) spécialisé évolue, incluant la gestion des batteries et le fonctionnement autonome, fourni sous forme de boîte d'interface universelle unique.

De cette façon, la pénétration sur le marché des véhicules électriques s'accélère grâce à une nouvelle approche de fabrication et à une proposition de valeur au client qui offre une personnalisation complète, récompense appréciée pour la perte de performance différentielle du moteur. Le changement est aussi profond que l'a été l'arrivée des chaînes de montage.

Dans Sky, les biocarburants jouent un rôle crucial dans la transition énergétique, et ce pour tous les modes de transport. Les combustibles liquides restent privilégiés en tant que carburants à haute densité énergétique, mais compte tenu de la nécessité de réduire les émissions de CO₂, l'utilisation des biocarburants prend rapidement de l'ampleur. Tandis que les carburants de première génération tels que l'éthanol de canne à sucre restent disponibles jusqu'au milieu du

LES BIOCARBURANTS AVANCÉS CONNAISSENT UNE CROISSANCE RAPIDE DANS SKY, RÉPONDANT À UN BESOIN CONTINU DE CARBURANT LIQUIDE À BASE D'HYDROCARBURES.



siècle avant de décliner, l'impulsion vient de nouvelles voies de synthèse qui produisent des carburants équivalents pour l'aviation, le transport routier et le transport maritime. Ces combustibles peuvent être dérivés d'une gamme plus large de matières premières de la biomasse, ce qui réduit la dépendance aux cultures vivrières.

Dans Sky, la transformation des véhicules de tourisme est largement terminée d'ici 2070. La consommation de carburants fossiles liquides diminue quasiment de moitié entre 2020 et

2050 et chute de 90 % d'ici 2070 dans le secteur. Et même si le transport routier se maintient au diesel dans les années 2050, en raison de la nécessité d'un carburant à haute densité énergétique, ce secteur connaît également sa propre transformation, répartie entre le biodiesel, l'hydrogène et l'électrification.

L'univers de la construction

Les changements dans l'univers de la construction, qu'il s'agisse des logements ou des propriétés commerciales, évoluent au fil des décennies, mais les fondations sont établies dès les années 2020. Pendant cette période, les gouvernements mettent en œuvre des changements radicaux dans les codes de construction, fixent des normes d'efficacité énergétique élevées pour les appareils électroménagers, établissent de nouvelles infrastructures pour le chauffage urbain et régional, et adoptent des pratiques qui encouragent un développement urbain compact attrayant.

Les efforts d'efficacité sont tels que la demande finale d'énergie pour les services résidentiels, qui comprennent le chauffage, la cuisine, l'éclairage et l'utilisation des appareils ménagers, reste stable aux alentours de 90 EJ pendant tout le siècle, alors même que la population mondiale en croissance a de plus en plus accès à ces commodités.



L'efficacité des réfrigérateurs domestiques américains a triplé depuis 1970. Pour offrir une vie meilleure à tous tout en gérant la demande énergétique, Sky harmonise ces succès dans toute l'économie.

L'électrification du parc immobilier progresse rapidement et l'utilisation locale du gaz naturel décline progressivement à partir de 2030. D'ici 2070, en Amérique du Nord et dans presque toute l'Europe, le gaz naturel n'est plus utilisé pour le chauffage résidentiel et la cuisine.

Transformation industrielle

Dans l'industrie, le changement requis pour atteindre zéro émission nette suit un cheminement plus graduel, en grande partie dicté par la mise en œuvre progressive des systèmes gouvernementaux de tarification du carbone et l'augmentation du prix qui en résulte à mesure que les gouvernements répondent à l'Accord de Paris. La transformation est profonde et suit trois voies distinctes :

- L'efficacité s'améliore constamment, la plupart des procédés industriels s'approchant des limites d'efficacité thermodynamique et mécanique d'ici les années 2050.
- Certains processus glissent vers l'électricité, en particulier pour l'industrie légère où la consommation électrique double entre 2020 et 2040. L'hydrogène émerge également comme un combustible important pour l'industrie légère d'ici 2050 alors que la consommation de gaz naturel diminue. Mais un changement similaire pour l'industrie lourde n'intervient pas avant 2050, l'hydrogène, la biomasse et l'électricité se substituant au gaz naturel et à certaines utilisations du charbon.

- Le charbon reste important dans le secteur métallurgique et dans certains autres procédés tout au long du siècle, mais avec l'augmentation des prix du carbone mise en œuvre par les gouvernements, le CSC apparaît comme la solution.

L'industrie profite aussi d'un intérêt accru pour l'économie circulaire, qui voit le recyclage à grande échelle se développer tout au long du siècle, à tel point que l'extraction de certaines ressources diminue en conséquence.

Un monde électrique

À mesure que l'électricité s'intègre rapidement dans le transport, le chauffage résidentiel, la cuisine et les processus industriels, son rôle dans le système énergétique prend de l'ampleur. D'ici les années 2070, l'électricité dépasse 50 % de la consommation énergétique finale, contre moins de 20 % dans les années 2010.

La pénétration des énergies renouvelables s'accroissant, les problèmes liés à l'intermittence des énergies renouvelables et aux infrastructures réseaux reçoivent l'attention des acteurs politiques. Les moyens de production d'électricité centralisés et décentralisés entrent de plus en plus en concurrence directe avec la production thermique conventionnelle. Cela entraîne une baisse des prix de l'électricité sur certains marchés en dessous du coût variable des centrales au charbon et au gaz moins efficaces, précipitant par là leur mise hors service.



Dans Sky, l'électricité nucléaire augmente régulièrement, avec 1 400 GW de capacité d'ici 2070 contre 450 GW en 2020.



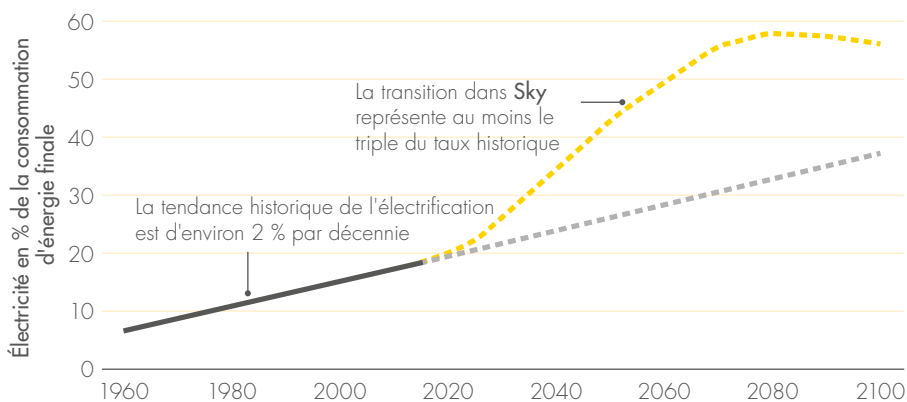


L'ÉLECTRICITÉ AU 21^E SIÈCLE

Aujourd'hui, la demande mondiale d'électricité se situe environ à 22 000 térawattheures (TWh) par an. Dans **Sky**, elle s'élève à environ 100 000 TWh par an au cours de la seconde moitié du siècle, soit environ 1 400 TWh de production supplémentaire par an à compter d'aujourd'hui. À titre de référence, une fois achevée, la centrale nucléaire d'Hinkley Point de 3,3 GW en cours de construction au Royaume-Uni ajoutera environ 29 TWh, de sorte que ce rythme de développement équivaut à près de 50 centrales électriques géantes dans le monde chaque année, soit une installation supplémentaire par semaine.

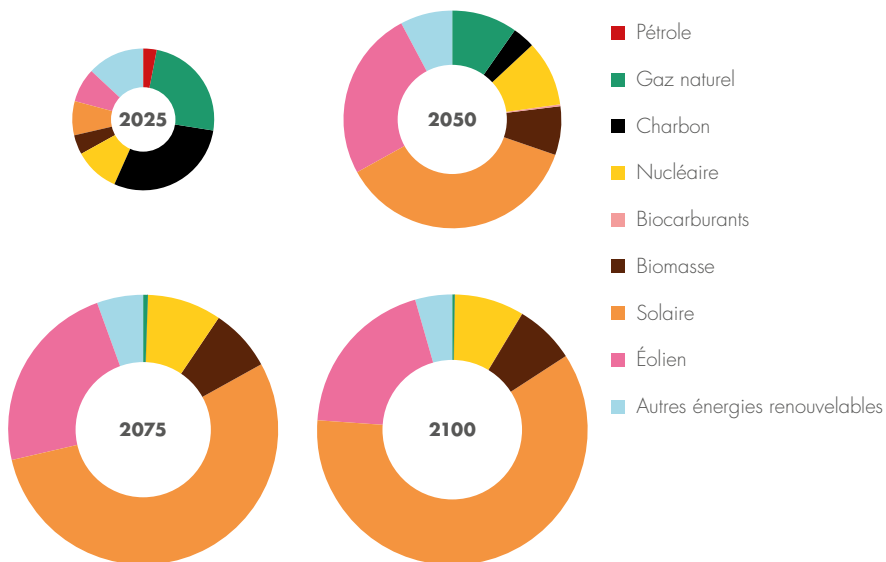
La production mondiale d'énergie éolienne et solaire était d'environ 1 300 TWh en 2016, dont 200 TWh qui ont été ajoutés entre 2015 et 2016. Cela vient s'incorporer à une production totale d'électricité supplémentaire d'environ 600 TWh ces années-là. Ainsi, les nouvelles installations solaires et éoliennes sont encore loin de répondre à la demande de production supplémentaire. Bien que les deux augmentent rapidement, les centrales thermiques resteront nécessaires au moins jusqu'au milieu du siècle. Cela signifie également que les émissions provenant de la production d'électricité à l'échelle mondiale ne diminueront à moyen terme que dans la mesure où le gaz naturel et le nucléaire pourront remplacer le charbon.

LES TENDANCES ACTUELLES EN MATIÈRE D'ÉLECTRIFICATION NE SONT PAS SUFFISANTES POUR **SKY**



Source : Analyse Shell, IEA (données historiques)

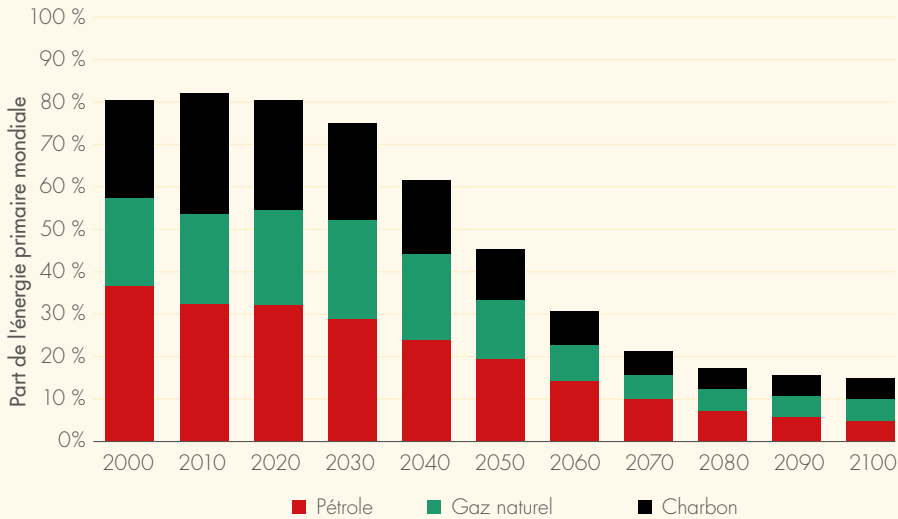
LE MIX ÉLECTRIQUE BASCULE FORTEMENT VERS LE SOLAIRE AU COURS DU SIÈCLE



Remarque : le diamètre du diagramme circulaire représente la demande totale d'électricité.

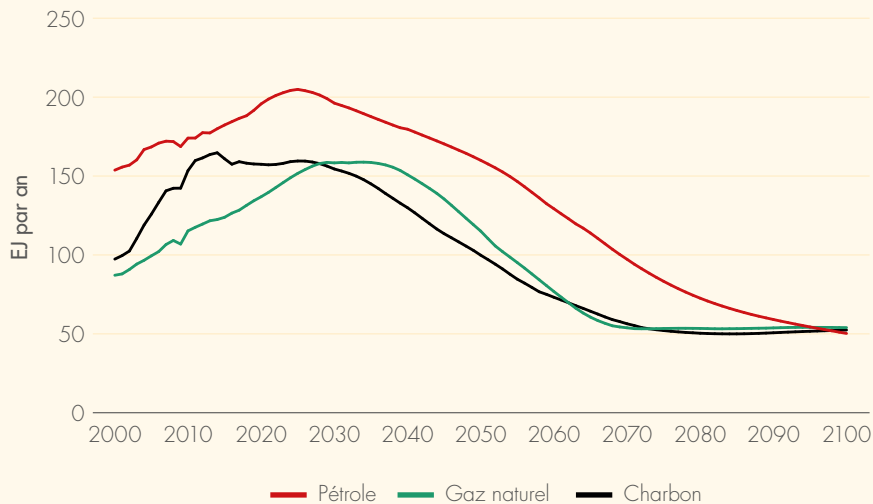
Source : Analyse Shell

DANS **SKY**, D'ICI LE MILIEU DU SIÈCLE, LA PART MAJORITAIRE DE L'ÉNERGIE FOSSILE DANS LE SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE MONDIAL FINIT PAR CÉDER



Source : Analyse Shell

DANS **SKY**, LE PIC DE DEMANDE DE CHARBON EST DÉJÀ DERRIÈRE NOUS, LE PIC DE DEMANDE DE PÉTROLE SUIT DANS LES ANNÉES 2020, ET APRÈS UNE PHASE DE STABILISATION, LA DEMANDE DE GAZ CHUTE RAPIDEMENT À COMPTER DE 2040



Source : Analyse Shell

Dans **Sky**, les questions de fiabilité de l'électricité sont en grande partie gérées en combinant une meilleure conception du marché (par exemple, les marchés de capacité), l'intégration des réseaux (par exemple, l'intégration transfrontalière en Europe), la gestion de la demande (par exemple, les réseaux intelligents) et le déploiement d'un stockage rentable de la chaleur, des batteries et de l'hydrogène. La baisse des coûts d'investissement permet d'assurer que la construction de systèmes d'énergies renouvelables soit abordable, c'est-à-dire dans les limites des dépenses historiques pour le nouveau système énergétique en tant que part du PIB mondial.

D'ici les années 2070, le secteur de la production électrique a progressé à travers deux transformations radicales. La première est une transformation d'échelle, l'électricité se rapprochant de niveaux cinq fois supérieurs à ceux de 2017. La composition des sources a également changé, les carburants fossiles étant absents du secteur et le solaire répondant à plus de la moitié des besoins en électricité à l'échelle mondiale en 2070 tout en continuant à s'accroître. Un nouvel ajout au secteur est la production tirée de la combustion de la biomasse, liée au CSC afin d'offrir un réservoir de carbone important.

Un nouveau système énergétique

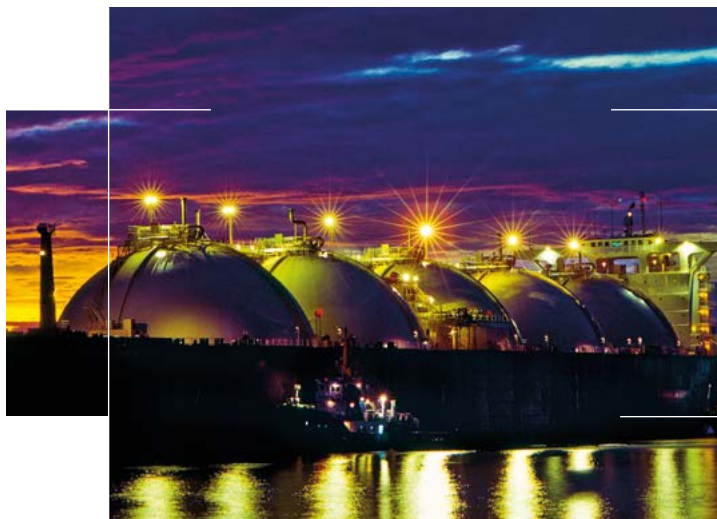
Dans **Sky**, les premiers signes de transition évidents émergent dans les années 2020, avec une stagnation de la demande en pétrole, le déclin du charbon, la hausse du gaz naturel en remplacement du charbon, et le rapprochement entre le solaire et le nucléaire en tant que plus grande part non fossile du système énergétique.

D'ici 2070, la production de pétrole reste à environ 50-60 millions de barils par jour du fait du large éventail de services qu'elle assure encore. Le transport non routier continue à utiliser beaucoup de carburants liquides à base d'hydrocarbures, avec une croissance globale jusqu'en 2070. Les biocarburants viennent compléter le mix de carburants liquides, l'hydrogène jouant un rôle de plus en plus important après 2050.

Le gaz naturel, sous sa forme gazeuse et liquide, joue un rôle essentiel dès le départ dans le remplacement du charbon au niveau de la production d'électricité et dans le soutien à l'intermittence des énergies renouvelables à mesure que l'éolien et le solaire se développent dans le secteur de l'électricité. Mais puisque le solaire PV augmente rapidement, que le prix des batteries diminue et que le coût élevé des émissions de carbone joue son rôle dissuasif, même le gaz naturel succombe à la transition. Il s'agit du dernier carburant fossile à connaître un pic, suite auquel la demande chute rapidement après 2040. D'ici 2055, l'utilisation du gaz naturel pour la production d'électricité retrouve ses niveaux de 2015 à l'échelle mondiale.

Vers le milieu du siècle, le mix énergétique commence à sembler très différent, le solaire émergeant en tant que source d'alimentation dominante en énergie primaire d'ici 2055 environ.

Les émissions de CO₂ par les systèmes énergétiques connaissent un pic au milieu des années 2020 à environ 35 gigatonnes (Gt), après quoi un déclin s'installe durablement.



La demande mondiale de gaz naturel atteint un plateau d'ici 2028 dans Sky à 4 600 milliards de mètres cubes par an (mmca), contre 3 700 mmca en 2017.

Autres gaz à effet de serre et secteurs hors énergie

Sky arrive à zéro émission de CO₂ nette pour le système énergétique mondial d'ici 2070, mais avec une répartition variée selon les secteurs et les pays. Cela couvre tout le carbone contenu dans l'utilisation du charbon, pétrole et gaz dans l'énergie, mais exclut les matières premières utilisées pour les produits non énergétiques, comme les plastiques.

Cependant, de nombreuses autres activités humaines ont modifié la composition des gaz à l'état de traces de l'atmosphère, ce qui a également contribué au réchauffement du système climatique. La fabrication du ciment en est un exemple, où la calcination du calcaire libère du CO₂.

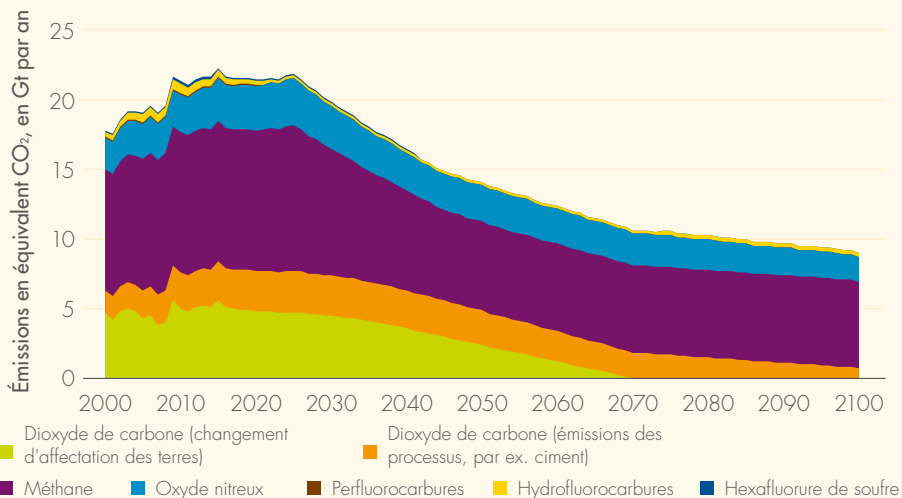
Le système agricole a contribué à l'ajout de méthane dans l'atmosphère principalement en raison de l'élevage bovin et de la riziculture. Le changement d'utilisation des terres au fil de plusieurs siècles, comme la déforestation et la dégradation des sols par l'agriculture, a également réduit la capacité de transport du carbone de la biosphère terrestre, ce qui, à

son tour, a contribué à l'ajout de CO₂ dans l'atmosphère.

Dans l'ère moderne, toutes ces activités se sont accélérées, et de nouveaux gaz à l'état de traces à longue durée de vie sont apparus, dont certains présentent des potentiels de réchauffement extraordinaires. Citons par exemple l'hexafluorure de soufre, courant dans les transformateurs isolés au gaz, qui présente un potentiel de réchauffement 24 000 fois supérieur à celui du CO₂.

Dans le scénario **Sky**, d'importants changements interviennent dans tous les secteurs producteurs de gaz à effet de serre. Tandis que les éléments du tableau ci-après représentent des bonnes pratiques déjà utilisées dans certains endroits, **Sky** préconise leur adoption universelle d'ici environ 2030, mais avec quelques retards anticipés dans les économies les moins développées. Pour les gaz à courte durée de vie tels que le méthane, l'exigence consiste à réduire drastiquement les émissions plutôt qu'à atteindre le zéro net, puisque ces gaz se dissipent dans l'atmosphère en quelques années.

LES GAZ À EFFET DE SERRE ISSUS DU SYSTÈME NON ÉNERGÉTIQUE DIMINUENT ÉGALEMENT FORTEMENT DANS **SKY**

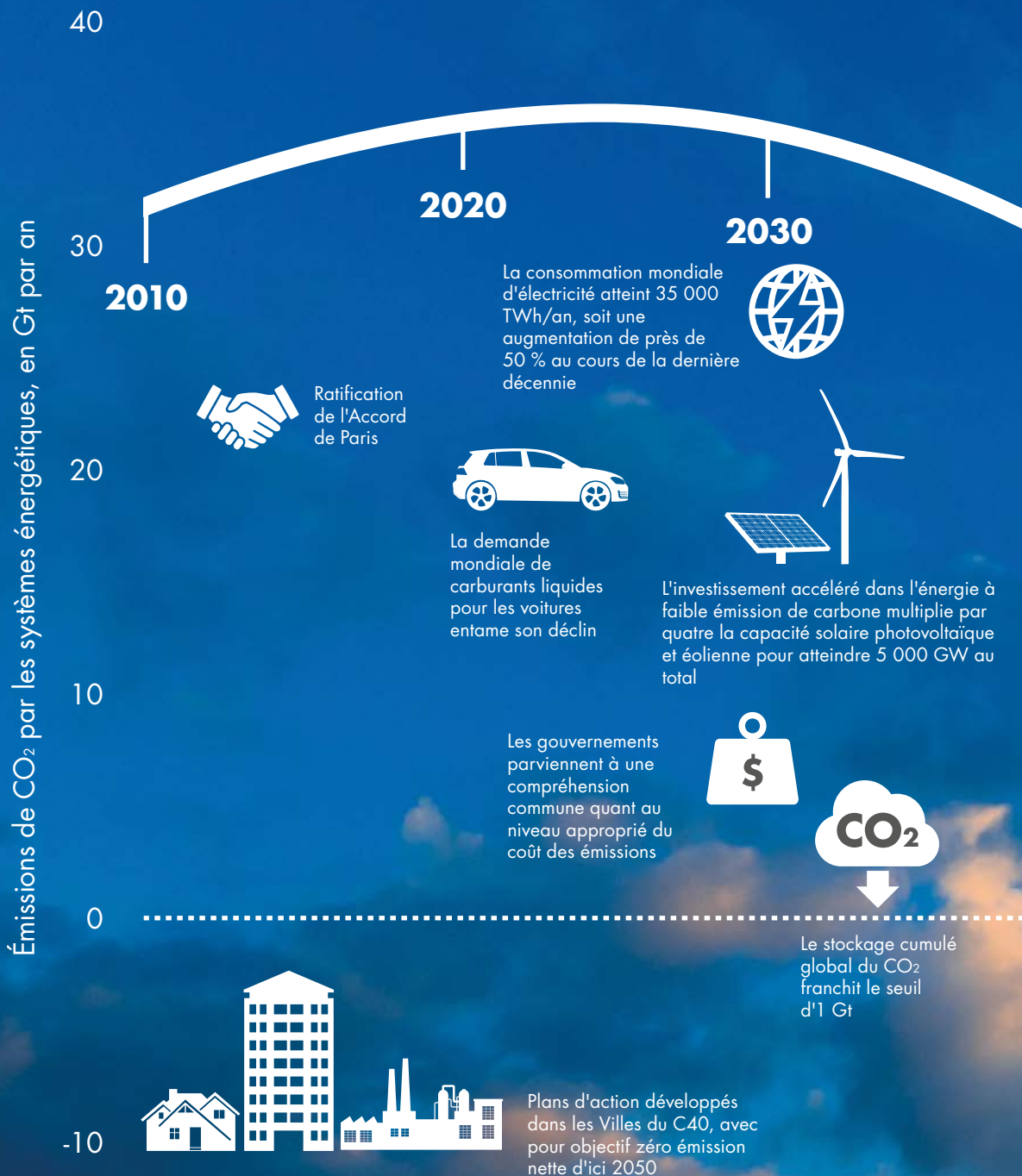


Source : Analyse Shell, MIT (Massachusetts Institute of Technology)

Bien que **Sky** mette l'accent sur les émissions de CO₂ des systèmes énergétiques, il est nécessaire d'avoir une vision sur tous les aspects des émissions de gaz à effet de serre pour compléter le scénario et comprendre la hausse potentielle de la température de surface. Cette vision a été développée sur la base d'une mise en œuvre totale de toutes les étapes du tableau.

GAZ	SECTEUR	ACTION PRÉCONISÉE PAR SKY
Dioxyde de carbone	Ciment	<ul style="list-style-type: none"> ■ Substitution progressive du ciment dans la construction ■ Substitution partielle du calcaire en tant que matière première, par ex. par des cendres volantes ■ Utilisation du captage et stockage du carbone (CSC)
	Industrie (émissions liées aux procédés)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Utilisation du CSC
	Agriculture	<ul style="list-style-type: none"> ■ Arrêt de la déforestation visant à gagner des terres ■ Mise en œuvre de programmes de stockage de carbone dans les sols, par ex. agriculture sans labourage, rotation de l'affectation des terres
	Urbanisation et développement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Création de villes vertes par la plantation d'arbres à grande échelle ■ Maintien de ceintures vertes à l'intérieur et autour des villes ■ Limiter l'étalement des villes grâce à des logements de plus haute densité ■ Adresser l'utilisation traditionnelle de la biomasse par le biais de programmes modernes d'accès à l'énergie
Méthane	Extraction de charbon	<ul style="list-style-type: none"> ■ Réduction de la consommation de charbon ■ Mise en œuvre de pratiques optimales pour les activités de dégazage et d'exploitation du méthane dans les mines de charbon (par ex. Guide de l'UNECE) ■ Gestion des mines abandonnées
	Industrie pétrolière et gazière	<ul style="list-style-type: none"> ■ Réduction de la consommation de pétrole et de gaz ■ Mise en œuvre par les leaders de l'industrie pétrolière et gazière des pratiques optimales à partir de 2020, et adoption des meilleures pratiques de production dans le monde entier d'ici 2050.
	Élevage de bétail	<ul style="list-style-type: none"> ■ Offre de produits alternatifs aux consommateurs ■ Changement de régimes d'alimentation du bétail pour minimiser le méthane
	Riziculture	<ul style="list-style-type: none"> ■ Réduction des inondations forcées dans les rizières
	Urbanisation et développement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Captage du méthane provenant de sites d'enfouissement
Oxyde nitreux	Agriculture	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mise en œuvre de la gestion des engrais azotés, c'est-à-dire le taux d'épandage, la formulation (type d'engrais), le calendrier d'épandage, l'emplacement
	Procédés industriels	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mise en œuvre des techniques de décomposition catalytique et de destruction thermique
Gaz fluorés	Divers (industrie informatique, réfrigération, transformateurs, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Substitution progressive des PFC, HFC et SF₆ ■ Mise en place de la gestion des pratiques optimales ■ Adoption de programmes de récupération pour les équipements mis au rebut (par ex. réfrigérateurs, transformateurs)

L'AMPLEUR DU CHANGEMENT MONDIAL DANS **SKY** EST SANS PRÉCÉDENT



Premiers pays à atteindre l'objectif de zéro émission nette

Toutes les régions atteignent l'objectif de zéro émission nette

2040



Premier vol intercontinental à l'hydrogène



Le solaire PV dépasse le pétrole en tant que plus grande source d'énergie.



La plupart des camions sont alimentés à l'électricité ou à l'hydrogène

2050



L'Inde est le leader mondial du solaire photovoltaïque



L'Inde et la Chine atteignent chacune 1 Gt de CO₂ stocké par an

2060



850 000 turbines de 10 MW

2070



La déforestation nette prend fin

de

Derniers pays à atteindre l'objectif de zéro émission nette



Systèmes énergétiques globaux à 1 000 EJ par an (le double de 2010)



L'hydrogène représente 10 % de l'énergie finale



Les biocarburants remplacent le pétrole comme principal composant des combustibles liquides



Le stockage de CO₂ atteint 12 Gt par an



Après avoir célébré 30 ans d'émissions presque nulles, les villes sont sur le point d'atteindre leurs objectifs d'économie circulaire à l'échelle mondiale

2080

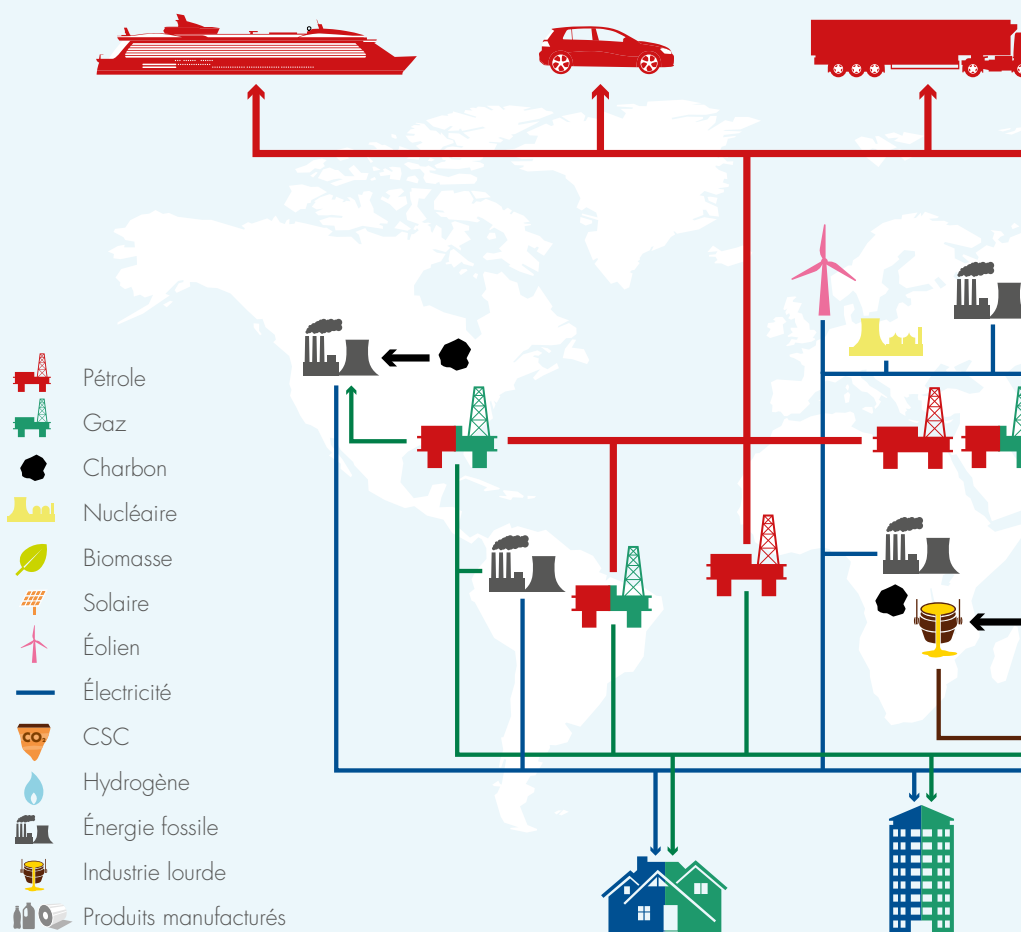
2090

2100

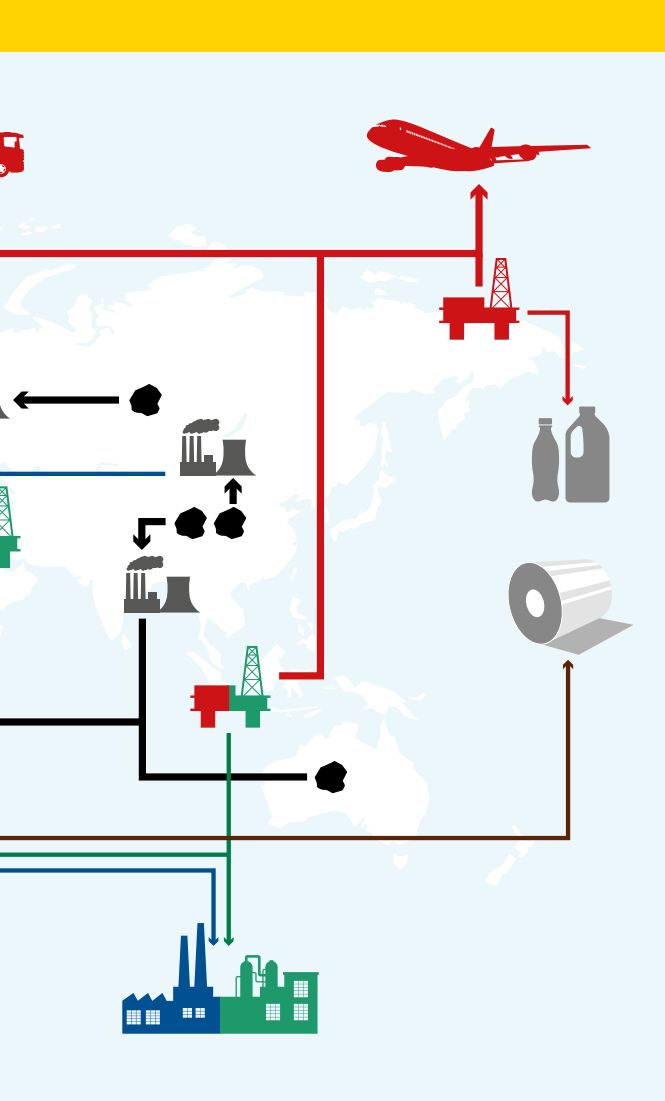
UN NOUVEAU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE

Au cours des 200 dernières années, notre rapport à l'énergie a radicalement changé. Pour la majeure partie de la population mondiale du début du 19e siècle, les besoins énergétiques étaient satisfaits individuellement par la collecte et la combustion du bois, et les livraisons de charbon dans les villes commençaient à peine. Les bougies servant à l'éclairage domestique étaient soit fabriquées à la maison, soit achetées auprès d'un cirier local, qui utilisait diverses graisses animales. Cent ans plus tard, mais principalement dans les pays riches, l'éclairage était assuré par le gaz de ville, les lampes à kérosène et, pour un nombre croissant de personnes, l'électricité. Bien qu'il reste aujourd'hui un nombre

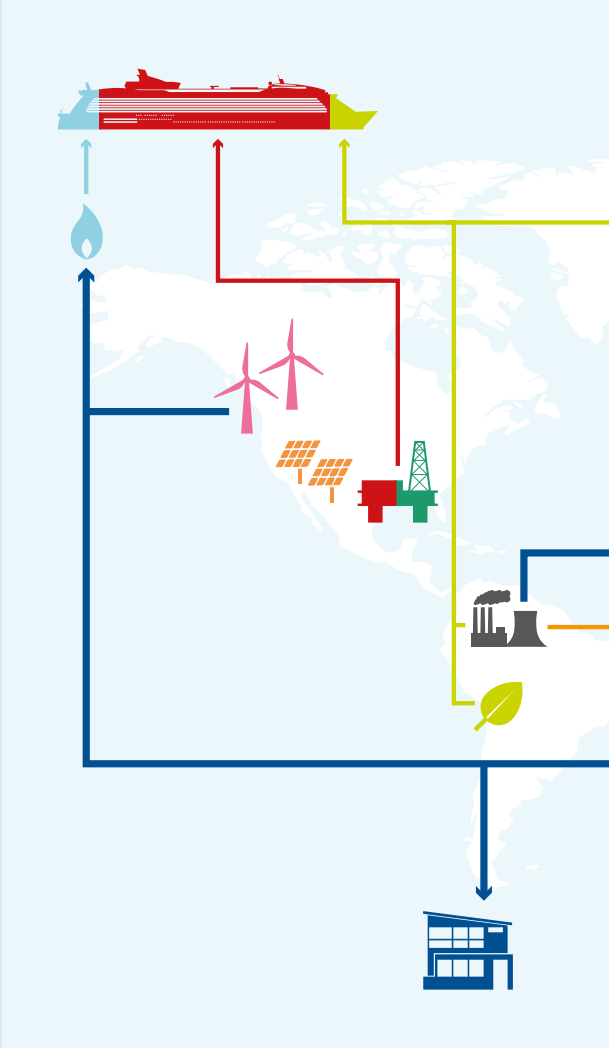
AUJOURD'HUI – UN SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE BASÉ SUR LES CARBURANTS FOSSILES

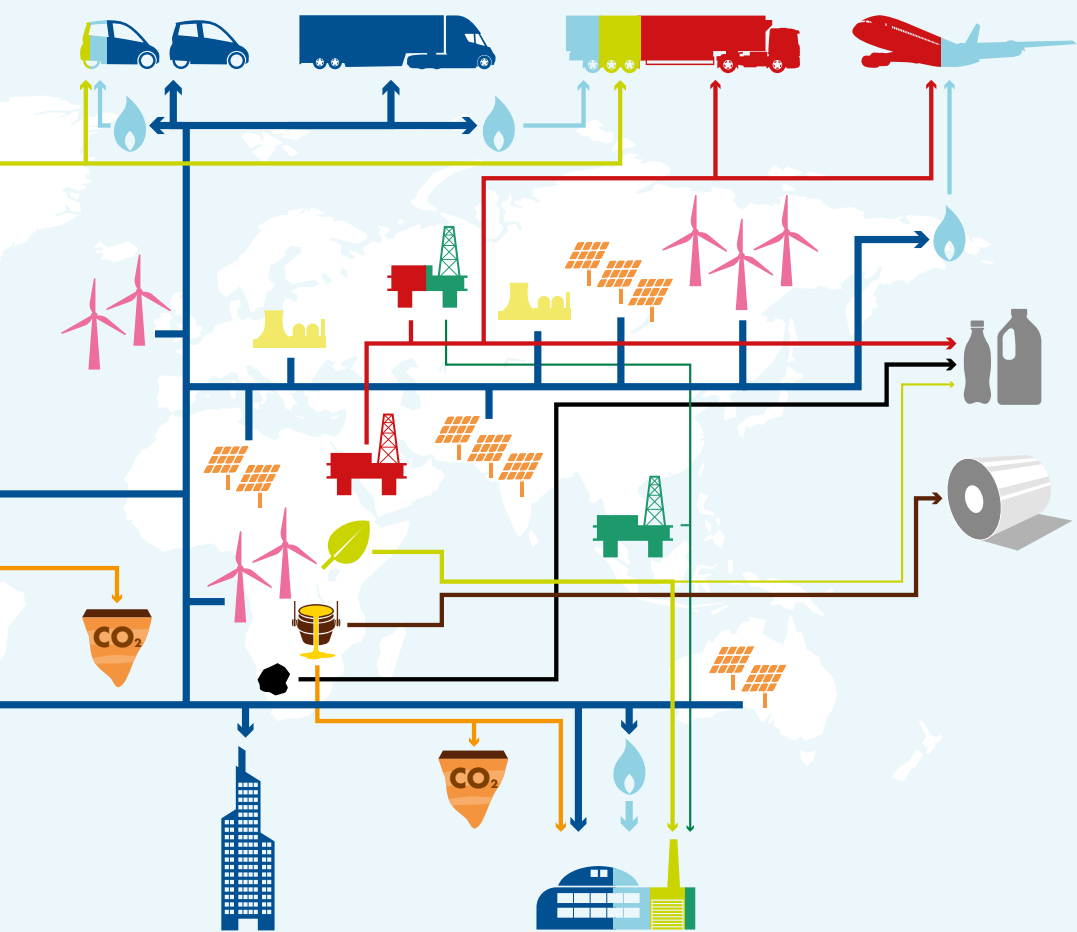


préoccupant de personnes ayant peu ou pas d'accès à l'énergie, une grande partie de la population mondiale utilise régulièrement des produits pétroliers, du gaz naturel et de l'électricité. Mais à quoi pourrait ressembler la dernière partie de ce siècle si nous atteignons l'objectif de zéro émission nette ? Dans **Sky**, un système énergétique basé sur l'électricité supplante le système largement basé sur les carburants fossiles d'aujourd'hui.



SKY EN 2070 – UN SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE BASÉ SUR L'ÉLECTRICITÉ







15 2020 2025 2030 2035 2040 2045





2050

2055

2060

2065

2070

2075

20

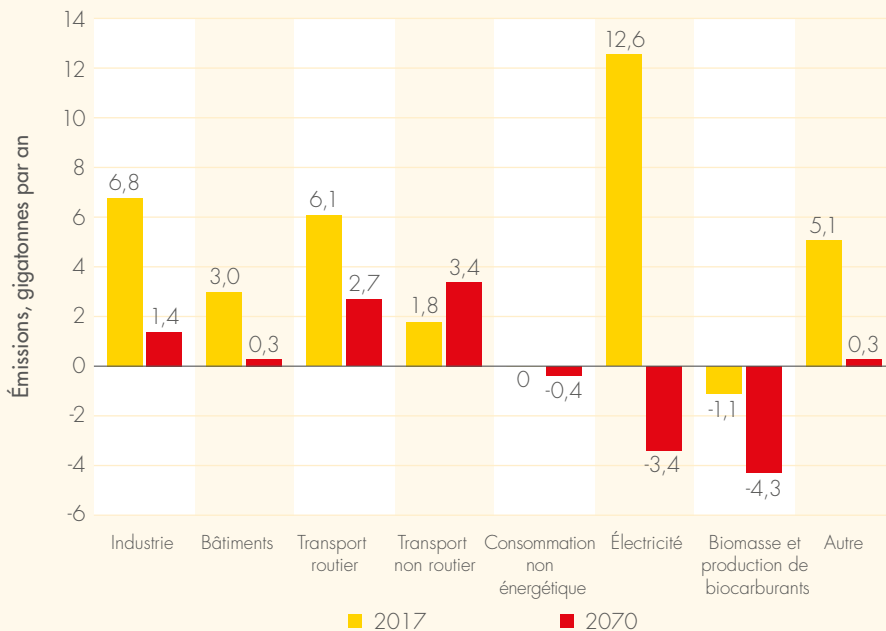
CHAPITRE 6
ATTEINDRE L'ÉQUILIBRE

6. ATTEINDRE L'ÉQUILIBRE

Émissions restantes

Dans **Sky**, la consommation de combustibles fossiles diminue fortement après 2030 – mais elle ne peut être éliminée dans tous les secteurs. Même avec un large éventail de technologies disponibles et un délai de déploiement de 50 ans, les technologies et les services énergétiques ne peuvent pas tous être remplacés par des solutions de recharge non émettrices. En effet, dans les secteurs qualifiés de « difficiles à réduire », des alternatives pratiques restent encore à développer et la tendance à privilégier l'innovation par rapport au déploiement reste à l'ordre du jour.

COMMENT LES ÉMISSIONS DE CO₂ DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE DANS **SKY** SONT RAMENÉES À ZÉRO D'ICI 2070



Remarque : « Autre » représente d'autres activités du secteur de l'énergie, telles que le transport et le raffinage de l'énergie fossile, une production thermique centralisée, et à l'avenir, la production d'hydrogène.

Source : Analyse Shell

ÉLIMINATION DU CARBONE À TRAVERS SON UTILISATION

Le système de captage et utilisation du carbone (CCU) fonctionne très différemment du CSC (stockage géologique permanent). Il existe aujourd'hui des exemples concrets de captage et d'utilisation, comme la conversion du CO₂ en produits chimiques (par exemple, l'urée, base des engrais) et la production de plastiques tels que les polycarbonates. Ces processus ont tous besoin du CO₂ en tant que matière première, mais ne sont pas nécessairement conçus pour le stocker de façon permanente. Si le carbone est renvoyé dans l'atmosphère, par exemple par la dégradation ou l'incinération du produit fabriqué, l'impact net du processus peut être nul en termes de niveaux de CO₂ atmosphérique.

Dans un système énergétique futur, le CCU pourrait devenir efficace de deux manières :

- Le CCU pourrait être axé sur la fabrication d'hydrocarbures synthétiques, ce qui pourrait remplacer le besoin d'hydrocarbures fossiles. Toutefois, l'industrie des combustibles synthétiques aurait besoin d'une innovation technologique substantielle et devrait ensuite se développer de manière très significative avant qu'elle ne puisse avoir un impact matériel. Il est donc peu probable que cette voie contribue de manière significative sur le calendrier considéré dans **Sky**. Les combustibles synthétiques ne constituent pas un puits d'absorption en eux-mêmes car

une fois fabriqués et utilisés, le CO₂ retourne dans l'atmosphère.

- Le CCU pourrait être appliqué à la fabrication de certains produits, tels que les matériaux de construction ou les plastiques. Mais pour agir en tant que mécanisme d'atténuation semblable au CSC, le CCU doit conduire à un stockage plus ou moins permanent. Le stock total du produit doit être maintenu pendant très longtemps (au moins un siècle ou plus) pour que le CCU se rapproche de l'équivalence du CSC. Dans **Sky**, les combustibles fossiles et les matières premières de la biomasse sont utilisés pour fabriquer ce type de produits, agissant comme un puits efficace d'absorption du carbone.

Cette situation signifie que l'attribution d'une valeur d'atténuation au CCU joue un rôle critique. Pour le CSC, la tâche est relativement simple : chaque tonne stockée peut être comptabilisée comme une atténuation permanente et contribuera à la tâche globale visant à atteindre zéro émission nette. Cela ne peut pas s'appliquer au CUC. Alors que le carbone peut être intégré dans l'urée ou les polycarbonates, il n'existe pas de protocole établi pour le définir en tant qu'atténuation permanente. Il reste du travail à faire dans ce domaine.

Bien que toutes les facettes du système énergétique actuel aient changé ou soient en transition en 2070, l'utilisation restante de combustibles fossiles génère des émissions d'environ 15 Gt de CO₂ par an, qui seront réduites à 11 Gt d'ici 2100. Cela représente à peu près un tiers de ce qui est émis aujourd'hui. Pour cette raison, les puits d'absorption des émissions (c.-à-d. l'élimination du CO₂ de l'atmosphère) figurent dans la plupart des scénarios énergétiques à long terme et à faibles émissions, y compris dans **Sky**.

L'Accord de Paris reconnaît cette réalité lorsqu'il appelle à un équilibre entre les émissions par les sources et les absorptions par les puits de gaz à effet de serre. Plus important encore, l'Accord reconnaît que même après d'importants efforts d'atténuation grâce à la substitution, les émissions de gaz à effet de serre perdureront, ce qui signifie que les puits seront essentiels à un certain niveau.

Mécanismes d'équilibrage dans le système énergétique

Dans le secteur de l'énergie, **Sky** utilise trois mécanismes qui empêchent la libération de CO₂, ou éliminent le CO₂ de l'atmosphère. Au total, ces mécanismes gèrent un billion de tonnes de CO₂ tout au long du siècle.

1. CSC conventionnel appliqué dans les grandes installations émettrices telles que les cimenteries ou les fonderies de minerai de fer. Le CO₂ est stocké dans des formations géologiques, généralement à deux ou trois kilomètres sous la surface. La technologie de CSC est appliquée à une échelle adaptée dans plusieurs installations à travers le monde à l'heure actuelle.
2. CSC conventionnel appliqué dans les centrales électriques fonctionnant avec une matière première de biomasse produite de façon durable. En totalité, ce mécanisme aboutit à une élimination nette de CO₂ dans l'atmosphère.
3. La production de divers produits, tels que les plastiques, à partir de combustibles fossiles ou d'une matière première de la biomasse. Ces matériaux sont ensuite utilisés par la société et peuvent fournir un stockage efficace du carbone plutôt que de le libérer dans l'atmosphère sous forme de CO₂. Lorsque le carbone est dérivé de la biomasse, ce mécanisme entraîne également une élimination nette de CO₂ dans l'atmosphère.

Le problème des émissions de gaz à effet de serre va au-delà de la consommation d'énergie, et il existe également une interaction entre le système énergétique et les systèmes naturels, par exemple, lors de l'utilisation de la bioénergie. **Sky** reconnaît cela ainsi que le périmètre d'action existant dans un système pour aider l'autre et inversement.



Dans Sky, les changements dans l'utilisation des terres et la fin de la déforestation sont essentiels pour atteindre le résultat global. Mais la reforestation à grande échelle peut changer la donne, en ouvrant la possibilité de faire encore mieux que l'ambitieux objectif de réchauffement de 1,5 °C de l'Accord de Paris.



Solutions fondées sur la nature : reforestation, restauration et déforestation évitée

Le changement d'affectation des terres dans le monde entier au cours du siècle dernier (mais qui remonte à des centaines d'années) a contribué à l'augmentation du CO₂ atmosphérique et continue de le faire. Le « Global Carbon Project » a estimé que les changements d'affectation des terres ont entraîné l'émission de 5 Gt de CO₂ par an pour chacune des 20 dernières années. Si ces changements peuvent être arrêtés, de nombreux écosystèmes dégradés peuvent être restaurés. L'organisation The Nature Conservancy a estimé qu'environ 500 Gt de CO₂ au total pouvaient être extraits de l'atmosphère à des coûts aujourd'hui inférieurs à 100 USD/tonne de CO₂ et stockés de manière durable par des sols améliorés et un couvert forestier étendu.

Le quatrième mécanisme présenté dans le scénario est un mécanisme largement compris et très utilisé aujourd'hui : reforestation, restauration des terres dégradées et déforestation évitée. Si l'on ne s'attaque pas à ces domaines en même temps qu'au système énergétique, il n'est pas possible d'aboutir à zéro émission nette. **Sky** émet l'hypothèse que d'importantes mesures relatives aux terres seront prises pour rééquilibrer les systèmes d'utilisation des terres et les systèmes agricoles et faire en sorte que, d'ici 2070, la déforestation nette soit ramenée à zéro.

En outre, une reforestation à très grande échelle pourrait accompagner ces mesures, offrant la possibilité d'éliminer du carbone supplémentaire de l'atmosphère et se rapprochant ainsi de l'objectif de l'Accord de Paris, à savoir limiter l'augmentation de la température moyenne à la surface du globe à seulement 1,5 °C.

L'ampleur du changement requis en matière d'affectation des terres exigera des mesures de la part des gouvernements, tant à l'échelle nationale qu'au moyen de mécanismes de coopération internationale, comme ceux qui sont prévus dans l'Accord de Paris.

La conception, la mise en œuvre et l'utilisation de ces mécanismes peuvent permettre de susciter la participation du secteur privé, ce qui pourrait alors accélérer les activités nécessaires.

Le processus de restauration et de reforestation étant décennal, il est essentiel d'agir très rapidement. C'est pourquoi, dans **Sky**, ces pratiques centrées sur la nature jouent un rôle important, en parallèle à la transformation de l'utilisation de l'énergie dans l'ensemble de l'économie. En effet, dans les décennies à venir, une partie de l'élan initial pour ces développements pourra venir du soutien de l'industrie et de l'utilisation d'activités certifiées et de certificats négociés pour compenser les émissions liées à l'énergie qui sont difficiles à atténuer. Le Régime de compensation et de réduction du carbone pour l'aviation internationale (CORSIA), approuvé par l'industrie de l'aviation en 2016 pour contrer l'augmentation des émissions dans ce secteur, est un bon exemple : les solutions fondées sur la nature figurent parmi les catégories de compensation proposées. Au fil du temps, cependant, dans **Sky**, des systèmes tels que CORSIA s'orientent vers l'une des trois catégories de captage du carbone ci-dessus à des fins de compensation.

D'ici 2070, l'objectif de zéro émission nette est atteint au sein du système énergétique, et l'interaction entre système énergétique et systèmes naturels continue. Comme illustré, l'équilibre du système naturel est atteint en combinant l'utilisation du CO₂ et le stockage géologique du CO₂ avec les matières premières de la biomasse pour équilibrer les émissions issues des combustibles fossiles qui continuent à être rejetées dans l'atmosphère.

Grâce à un éventail plus large d'actions dans tous les secteurs, y compris les mesures prises pour ramener la déforestation nette à zéro et entamer le processus de restauration des terres, l'objectif global de l'Accord de Paris visant à équilibrer les émissions anthropiques restantes de gaz à effet de serre avec des puits dans la seconde moitié du siècle est atteint.



SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE : REVOIR L'AMBITION À LA HAUSSE À TRAVERS LA RESTAURATION DE LA NATURE

Dans **Sky**, on émet l'hypothèse que les émissions de CO₂ provenant du changement d'affectation des terres tombent à zéro d'ici 2070, parallèlement au système énergétique qui atteint zéro émission nette dans le même temps. Mais la restauration des écosystèmes, notamment la reforestation à grande échelle, peut jouer un rôle critique supplémentaire en produisant une réduction nette de CO₂ dans l'atmosphère et en ouvrant ainsi la voie à l'ambitieux résultat de 1,5 °C.

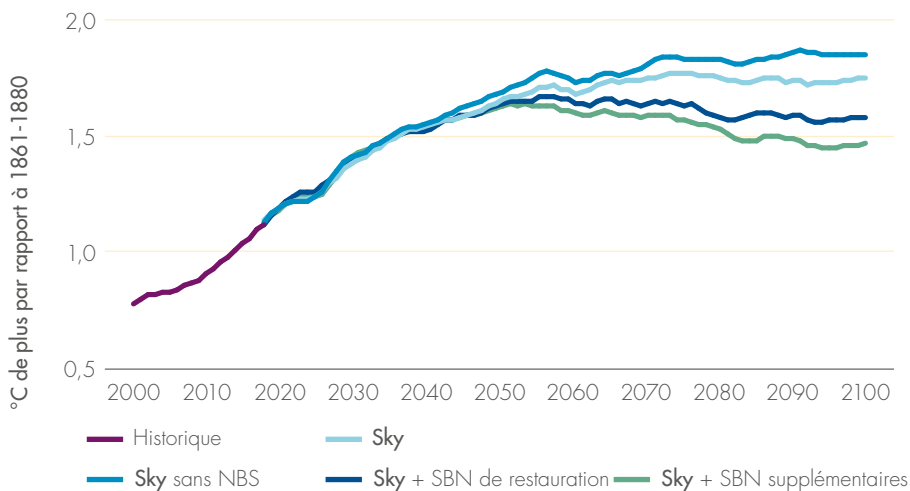
Si les barrières sociales peuvent être surmontées, telles que l'impact sur les communautés agricoles, ces solutions fondées sur la nature (SfN) peuvent contribuer à limiter le pic de réchauffement puisque le déploiement peut s'avérer bien plus rapide que la transformation des technologies énergétiques.

Les études réalisées par des institutions telles que le MIT, le Centre des écosystèmes de Woods Hole et The Nature Conservancy ont montré qu'une réduction supplémentaire au-delà de **Sky**

de 10 Gt de CO₂ par an est réalisable grâce à la reforestation, bien que la tâche soit d'une très grande ampleur. Quelque 700 millions d'hectares de terres devraient être reboisés durant le siècle, soit une zone presque aussi grande que le Brésil.

Dans le scénario **Sky**, nous avons traité deux sensibilités en prenant conseil auprès de The Nature Conservancy (TNC) et du MIT. La première sensibilité concerne l'évitement accéléré de la déforestation et l'adoption d'une échelle de restauration similaire. Nous l'avons intitulée « **Sky** + SfN de restauration ». Cela ajoute 5 Gt de réduction du CO₂ par an à **Sky**. La seconde sensibilité, « **Sky** + SfN supplémentaires », est requise pour limiter le réchauffement à 1,5 °C et émet l'hypothèse que de nombreux coûts et barrières sociales peuvent être surmontés plus efficacement afin qu'une réduction supplémentaire de 10 Gt de CO₂ par an (c.-à-d. 15 Gt par an au total) puisse être atteinte.

AMBITION REVUE À LA HAUSSE DANS **SKY**

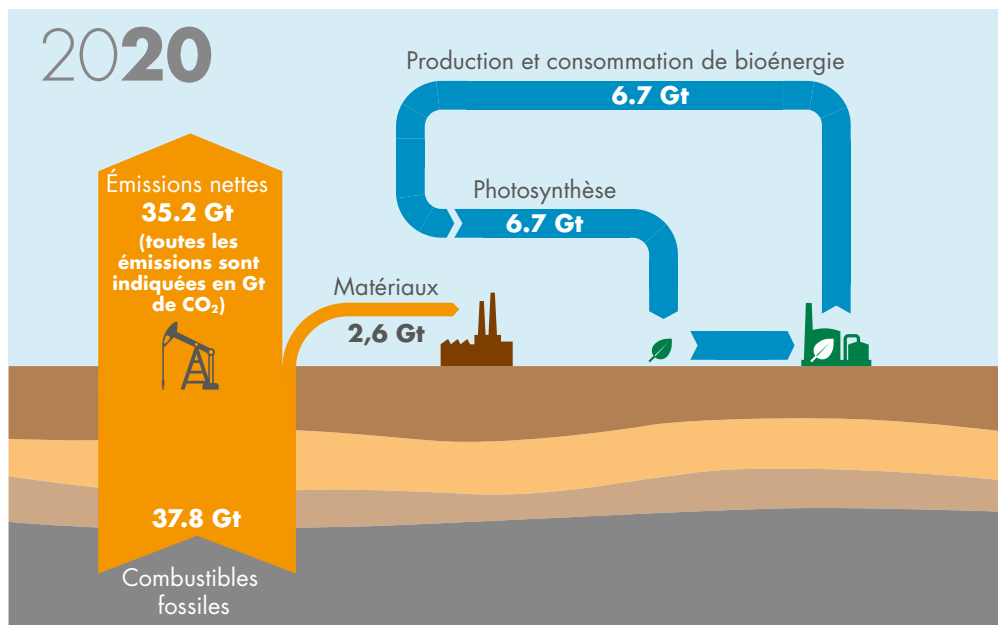


Source : Analyse Shell, MIT (Massachusetts Institute of Technology)

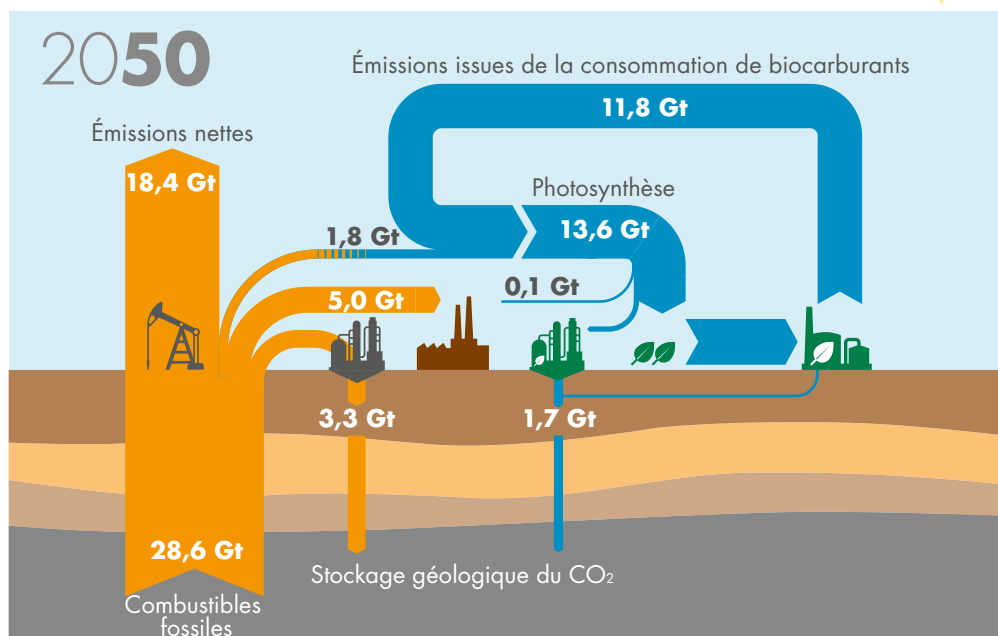


LE BILAN EN CO₂ ÉVOLUTIF DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE DANS SKY

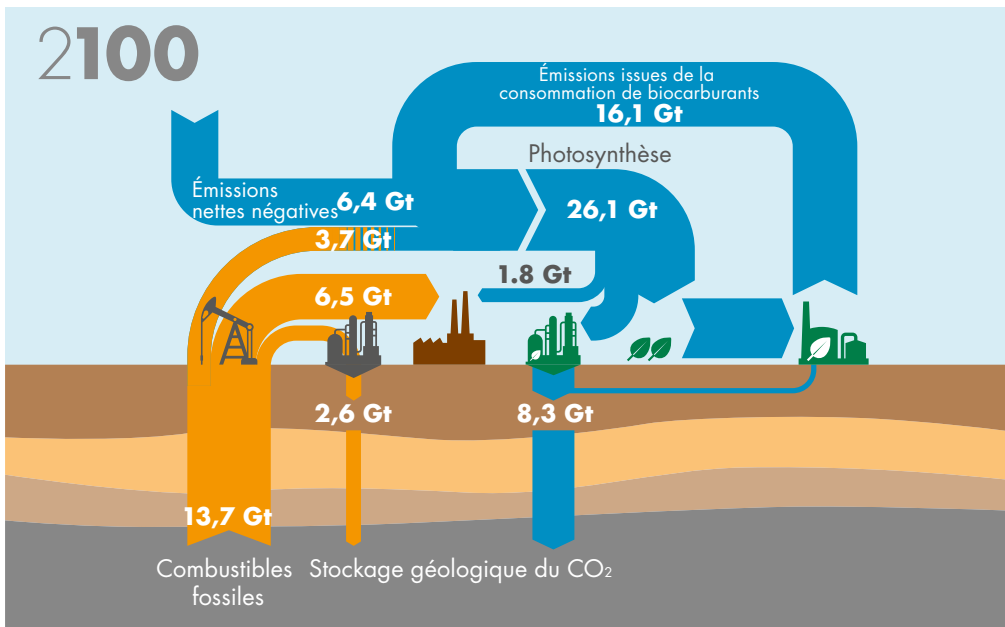
🏠 Production de combustibles fossiles
 🏭 CSC
 🌱 Production de biocarburants
 🏭 Bioénergie avec CSC
 🏭 Carbone dans les produits
 🌱 Biomasse croissante



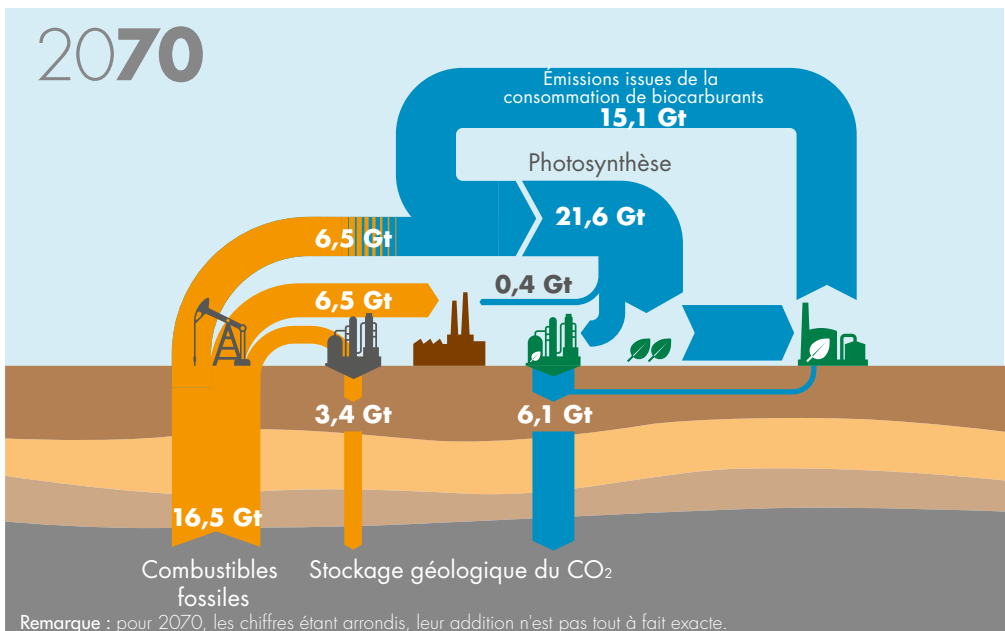
Aujourd'hui, la majeure partie du carbone issu de la production d'énergie fossile est brûlé et rejeté dans l'atmosphère, et le CO₂ absorbé par le bois et autres végétaux utilisés pour l'énergie est également renvoyé dans l'atmosphère.



Dans Sky, d'ici 2050, le stockage du CO₂ s'intensifie rapidement. Cela provient de contributions égales du carbone intégré dans la production de matériaux et du CSC. L'énergie fossile avec CSC arrive en tête, mais la bioénergie avec CSC (BECCS) n'est pas loin derrière.

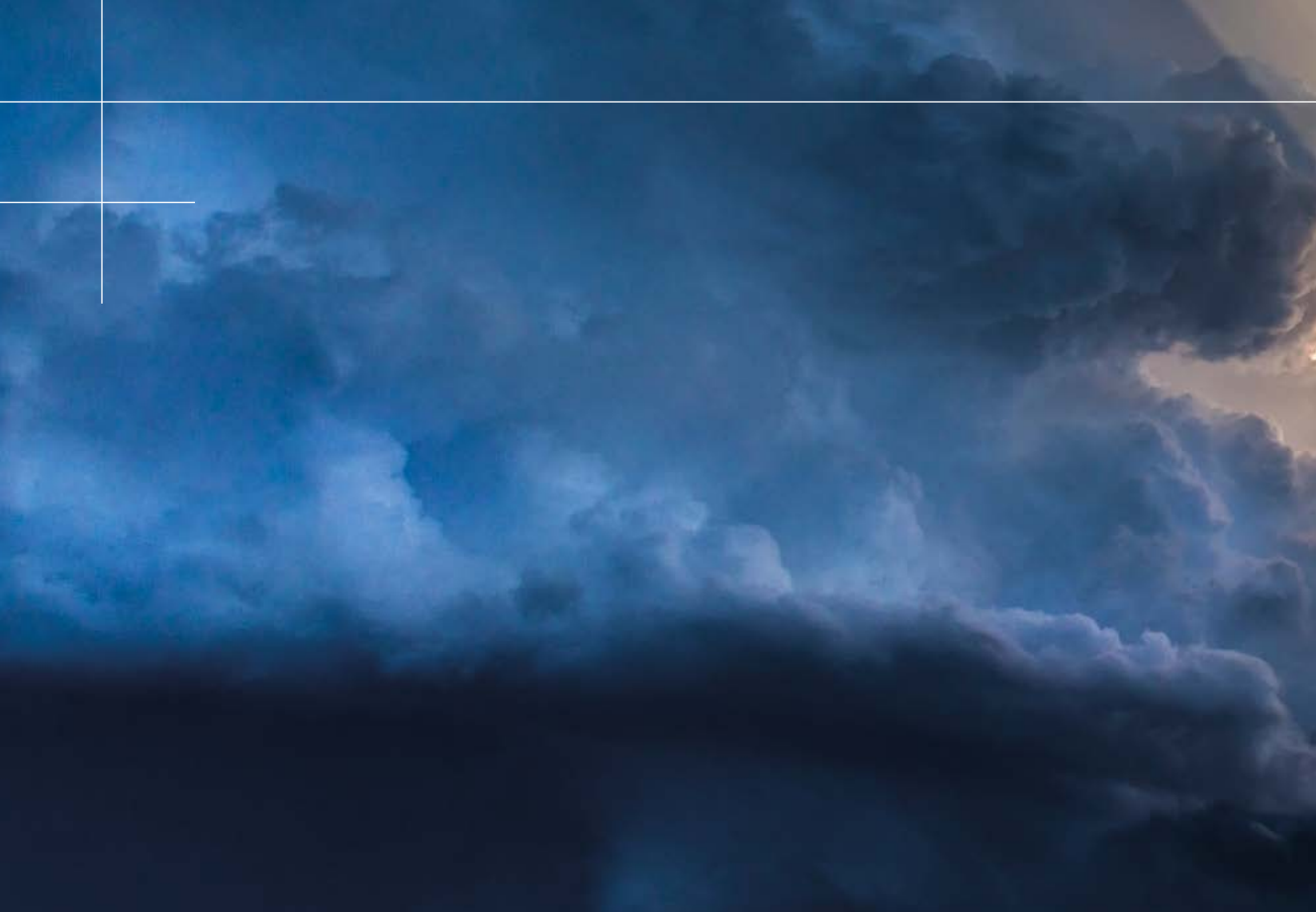


Dans Sky, à 2100, le système bioénergétique a atteint la limite de sa base de ressources et est deux fois plus important que le système d'énergie fossile en termes de CO₂. Avec la gestion active du CO₂, le système énergétique total entraîne une réduction du CO₂ dans l'atmosphère.



Dans Sky, en 2070, le système énergétique a atteint zéro émission nette. La production d'énergie fossile est divisée par deux par rapport à aujourd'hui. Outre le CSC direct et l'utilisation de carbone pour les matériaux, les émissions d'énergie fossile restantes sont entièrement compensées par le CO₂ capté à partir d'un système bioénergétique élargi.





15 2020 2025 2030 2035 2040 2045





2050

2055

2060

2065

2070

2075

20

CHAPITRE 7

L'AMBITION DE PARIS RÉALISÉE

7. L'AMBITION DE PARIS RÉALISÉE

Dans **Sky**, au-delà de 2070, les niveaux de captage du carbone se stabilisent autour de 12 Gt par an, mais la consommation de combustibles fossiles continue de diminuer. Cela fait entrer le système énergétique global dans une zone d'émissions négatives, ce qui réduit l'accumulation de carbone dans la biosphère. En conséquence, le réchauffement atteint son pic au cours des années 2070 et se stabilise au cours du siècle.

D'ici 2100, le réchauffement du système climatique est maintenu autour de 1,75 °C, selon l'analyse de la trajectoire des émissions du système énergétique décrit par **Sky** par un cabinet expert indépendant. En outre, l'industrie de l'élimination du carbone, dont l'héritage est précieux, offre à la société du 22^e siècle la possibilité de poursuivre la restauration du climat.

En plus des actions couvrant le système énergétique décrit dans **Sky**, d'importantes mesures de reforestation et la restauration des écosystèmes naturels, tels que les zones humides, offrent la possibilité de limiter le réchauffement à 1,5 °C, l'ambition ultime de l'Accord de Paris.

Bien entendu, le grand défi est de savoir s'il existe la volonté politique, et par là-même la volonté sociétale, de mettre en place et maintenir les cadres indispensables pour s'attaquer à cette tâche impressionnante consistant à recâbler l'ensemble de l'économie mondiale dans les 50 prochaines années.

Le scénario Sky décrit ce que nous croyons être une voie à suivre possible du point de vue technologique, industriel et économique. Il devrait donner de l'espoir à chacun de nous, et même nous inspirer. En termes plus pratiques, cette analyse peut fournir des indications utiles sur les domaines dans lesquels une attention particulière pourrait produire les meilleurs résultats.



Le **futur** dépend de ce que nous faisons au **présent**.

Mahatma Gandhi



Remerciements

Nous tenons à remercier les nombreuses personnes consultées en externe dans le cadre de l'élaboration de **Sky**.

Nous remercions en particulier The Nature Conservancy.

Nous souhaitons reconnaître le Programme conjoint sur la science et la politique en matière de changement climatique du MIT pour son évaluation des impacts climatiques de **Sky** par rapport aux impacts des scénarios **Montagnes** et **Océans**.

Pour le scénario **Sky**, le MIT a modélisé l'impact en utilisant son cadre de Modélisation du système mondial intégré (IGSM). Shell a fait don de 100 000 \$ au Programme conjoint en reconnaissance de cet effort. Le MIT publiera un Rapport du Programme conjoint sur le travail qu'il a accompli.

Ce travail s'appuie en partie sur des données historiques provenant des World Extended Energy Balances de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) © OECD/IEA 2017. Le travail a été préparé par Shell International B.V. et ne reflète pas nécessairement les opinions de l'AIE.

Des tableaux de données et informations contextuelles supplémentaires sont consultables sur www.shell.com/skyscenario.

A night landscape featuring a mountain range in the background and a body of water in the foreground. The sky is dark with visible stars and a faint aurora borealis. The water reflects the sky and the mountains. The overall color palette is dominated by dark blues and purples.

Sky, une extension des scénarios **Montagnes** et **Océans**

GLOSSAIRE

Unités énergétiques

EJ	exajoule (10^{18} joules)
kWh	kilowattheure (1 Wh vaut 3600 J). L'unité Wh est couramment utilisée pour la production d'électricité, et J pour l'énergie plus largement.
GJ	gigajoule (10^9 joules). Le joule (J) est une unité de quantification de l'énergie ; 4,2 J sont nécessaires pour augmenter la température d'un gramme d'eau de 1 °C.
Gt	gigatonne (10^9 tonnes)
GW	gigawatt (10^9 watts, un milliard de watts). 1 GW est la taille typique d'une centrale électrique au charbon, au gaz ou nucléaire moderne.
mmca	milliards de mètres cubes par an
TWh	térawattheure (10^{12} wattheures, ou mille milliards de wattheures). Une centrale électrique d'1 GW fonctionnant pendant 300 jours par an produira environ 7 TWh.

Autres termes

BECS	bioénergie avec captage et stockage du carbone
CCU	captage et utilisation du carbone
CDN	contribution déterminée au niveau national ; les mesures prises par les pays pour réduire les émissions de gaz à effet de serre dans le cadre de l'Accord de Paris
CSC	captage et stockage du carbone
énergie finale	la demande de vecteurs énergétiques, tels que l'électricité ou les combustibles liquides, par les consommateurs finaux, tels que l'industrie, les ménages et les transports, pour toutes leurs utilisations énergétiques. Le gaz naturel utilisé pour le chauffage domestique est compté comme énergie finale ; utilisé pour produire de l'électricité dans une centrale électrique, il est compté comme énergie primaire.
énergie primaire	l'approvisionnement en sources d'énergie, y compris le pétrole, le gaz naturel, le charbon, la bioénergie, l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables. L'énergie primaire est l'énergie tirée de la nature, sous sa première forme utilisable.
GPL	gaz de pétrole liquéfié
SfN	solutions fondées sur la nature ; l'utilisation de l'évitement de la déforestation, de la reforestation et d'autres restaurations des écosystèmes naturels
solaire PV	panneaux solaires photovoltaïques utilisés pour la production d'électricité
VE	véhicule électrique, défini soit en tant que véhicule électrique à batterie ou véhicule électrique hybride rechargeable
VEPC	véhicule électrique à pile à combustible
ZEN	zéro émission nette, c'est-à-dire un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions par les puits de gaz à effet de serre

MENTIONS LÉGALES

Le présent livret contient les données du nouveau scénario **Sky** de Shell. Contrairement aux scénarios exploratoires Montagnes et Océans déjà publiés par Shell, le scénario **Sky** est basé sur l'hypothèse que la société atteint l'objectif de l'Accord de Paris visant à maintenir les températures moyennes mondiales nettement en dessous de 2 °C. Contrairement aux scénarios Montagnes et Océans de Shell, qui se déroulaient de manière ouverte sur la base d'hypothèses et de quantifications plausibles, le scénario **Sky** a été spécifiquement conçu pour atteindre l'objectif de l'Accord de Paris d'une manière techniquement possible. Ces scénarios font partie d'un processus continu utilisé par Shell depuis plus de 40 ans pour remettre en question le point de vue des dirigeants sur l'environnement commercial futur. Ils sont conçus pour permettre à la direction de prendre en compte même les événements qui ne sont que peu probables. Les scénarios ne sont donc pas des prédictions d'événements ou de résultats futurs probables, et les investisseurs ne doivent pas s'appuyer sur ceux-ci pour prendre des décisions d'investissements concernant des titres Royal Dutch Shell Plc.

En outre, il est important de noter que le développement du portefeuille d'actifs existant de Shell a pris des dizaines d'années. Même si nous sommes convaincus que notre portefeuille d'actifs restera résilient dans une large gamme de perspectives, y compris le scénario 450 de l'AIE (Perspectives énergétiques mondiales pour 2016), il comprend des actifs couvrant un vaste éventail d'intensités énergétiques, dont certaines qui sont supérieures à la moyenne. Alors que nous cherchons à améliorer l'intensité énergétique moyenne de nos opérations à travers le développement de nouveaux projets et cessions, nous n'avons pas de plans immédiats pour passer à un portefeuille à zéro émission nette dans le cadre de notre horizon d'investissement sur 10 à 20 ans. Bien que nous n'ayons pas de plans immédiats pour passer à un portefeuille à zéro émission nette, en novembre 2017, nous avons annoncé notre ambition de réduire notre empreinte carbone nette conformément à la mise en œuvre par la société de l'objectif de l'Accord de Paris visant à maintenir la température moyenne mondiale nettement en dessous de 2 °C au-dessus des niveaux préindustriels. Ainsi, en supposant que la société s'aligne sur les objectifs de l'Accord de Paris, nous visons à réduire notre empreinte carbone nette, qui

comprend non seulement nos émissions de carbone directes et indirectes, associées à la production des produits énergétiques que nous vendons, mais aussi les émissions de nos clients résultant de leur utilisation des produits énergétiques que nous vendons, de 20 % en 2035 et de 50 % en 2050.

Les sociétés dans lesquelles Royal Dutch Shell plc détient directement ou indirectement une participation constituent des entités juridiques distinctes. Dans ce livret, les termes « Shell », « le groupe Shell » et « Royal Dutch Shell » sont parfois utilisés pour des raisons pratiques pour désigner Royal Dutch Shell plc et ses filiales en général. De même, les termes « nous », « notre » et « nos » sont également utilisés pour faire référence aux filiales en général ou aux personnes qui travaillent pour ces filiales. Ces expressions sont également utilisées lorsque l'identification de telle société ou de telles sociétés n'a pas d'objectif utile en soi. Les termes « filiales », « filiales de Shell » et « sociétés Shell » sont utilisés dans ce livret pour désigner les sociétés sur lesquelles Royal Dutch Shell exerce un contrôle direct ou indirect. Les entités et arrangements non constitués en société sur lesquels Shell a un contrôle conjoint sont généralement désignés par « joint-ventures » et « coexploitations » respectivement. Les entités sur lesquelles Shell a une influence notable sans toutefois les contrôler seule ou conjointement sont désignées par « associés ». L'expression « intérêt de Shell » est utilisée pour des raisons pratiques pour indiquer la participation directe et/ou indirecte de Shell dans une entreprise, un partenariat ou une société, après exclusion des intérêts de tiers.

Ce livret contient des déclarations prospectives relatives à la situation financière et aux résultats d'exploitation, ainsi qu'aux activités de Royal Dutch Shell. Toutes les déclarations autres que les énoncés de faits historiques sont, ou peuvent être considérées comme des déclarations prospectives. Les déclarations prospectives portent sur des projections futures et sont basées sur les attentes et hypothèses actuelles de la direction de Royal Dutch Shell. Elles comportent des risques connus ou non ainsi que des incertitudes qui pourraient faire en sorte que les résultats, performances ou événements réels diffèrent sensiblement de ceux exprimés ou sous-entendus dans ces déclarations. Les déclarations prospectives comprennent notamment celles relatives à l'exposition potentielle de Royal Dutch

Shell aux risques du marché et des informations exprimant les attentes, croyances, estimations, prévisions, projections et autres hypothèses de la direction. Ces déclarations prospectives sont identifiées par l'utilisation de termes et d'expressions tels que « anticiper », « croire », « pourrait », « estimer », « attendre », « buts », « avoir l'intention », « pourrait », « objectifs », « perspectives », « plan », « probablement », « projet », « risques », « calendrier », « chercher », « devrait », « cible », « ferai » et autres termes ou expressions similaires. Il y a un certain nombre de facteurs susceptibles d'affecter les opérations à venir de Royal Dutch Shell et qui pourraient faire que ces résultats diffèrent sensiblement de ceux qui figurent sur cette page web, y compris mais sans s'y limiter : (a) fluctuations des prix du pétrole brut et du gaz naturel ; (b) changements dans la demande des produits Shell ; (c) fluctuations des devises ; (d) résultats de forage et de production ; (e) estimation des réserves ; (f) perte de part de marché et concurrence du secteur ; (g) risques environnementaux et physiques ; (h) risques associés à l'identification de propriétés et de cibles d'acquisition potentielle appropriées, et réussite de la négociation et conclusion positive de ces transactions ; (i) risque de conduite d'activités dans des pays en développement et pays soumis à des sanctions internationales ; (j) développements législatifs, fiscaux et réglementaires y compris mesures réglementaires concernant le changement climatique ; (k) conditions de marché économiques et financières dans différents pays et régions ; (l) risques politiques y compris les risques d'expropriation et de renégociation des termes des contrats avec des services gouvernementaux, retards ou avancements dans l'approbation de projets et retards dans le remboursement de coûts partagés ; et (m) modification des conditions commerciales. Rien ne peut garantir que les versements de dividendes à l'avenir seront égaux ou supérieurs aux dividendes précédemment versés. Toutes les déclarations prospectives figurant dans le présent livret sont expressément qualifiées dans leur intégralité par les mises en garde contenues ou mentionnées dans cette section. Les lecteurs ne doivent pas accorder une confiance excessive à ces déclarations prospectives. Des facteurs supplémentaires pouvant affecter les résultats futurs figurent dans le document 20-F Royal Dutch Shell pour l'exercice achevé au 31 décembre 2017 (disponible sur www.shell.com/investor et

www.sec.gov). Ces facteurs de risque qualifient également expressément toutes les déclarations prospectives contenues dans le présent livret et doivent être pris en compte par le lecteur. Toutes les déclarations prospectives ne sont valables qu'à la date de ce livret [26 mars 2018]. La Royal Dutch Shell et ses filiales ne sont aucunement tenues de mettre publiquement à jour ou de réviser les déclarations prospectives en fonction de nouvelles informations, événements futurs ou autres faits dont elles auraient connaissance. Au vu de ces risques, les résultats peuvent différer de façon sensible de ceux exprimés, sous-entendus ou suggérés à partir des déclarations prospectives contenues dans cette page web.

Il est possible que nous ayons utilisé certains termes, tels que « ressources », dans le présent livret que les recommandations de la SEC (Commission des opérations de bourse des États-Unis) nous interdisent strictement d'inclure dans les enregistrements que nous déposons auprès de la SEC. Les investisseurs américains sont priés d'examiner de près les informations contenues dans notre formulaire 20-F, Fichier n°1-32575, disponible sur le site www.sec.gov. Ce formulaire est également disponible auprès de la SEC en appelant le 1-800-SEC-0330.

2020

2025

2030

2035

2040

2045

www.shell.com/skycenario

© 2018 Shell International B.V.

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, stockée dans un système de recherche, publiée ou transmise, sous quelque forme et par quelque moyen que ce soit, sans l'autorisation écrite préalable de Shell International B.V.